

DOI: 10.5846/stxb202008282243

朱佳兴,周慧,熊育久,严恩萍,莫登奎无人机近景摄影技术在崖壁植物多样性研究中的应用.生态学报,2021,41(16):6665-6678.

Zhu J X, Zhou H, Xiong Y J, Yan E P, Mo D K. Application of UAV close-range photography in the study of plant diversity on cliff walls. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6665-6678.

无人机近景摄影技术在崖壁植物多样性研究中的应用

朱佳兴^{1,2,3}, 周 慧^{1,2,3}, 熊育久^{4,5}, 严恩萍^{1,2,3}, 莫登奎^{1,2,3,*}

1 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

2 湖南省林业遥感大数据与生态安全重点实验室, 长沙 410004

3 国家林业局南方森林资源管理与监测重点实验室, 长沙 410004

4 中山大学土木工程学院, 广州 510275

5 中山大学广东省南方水安全调控工程技术研究中心, 广州 510275

摘要:崖壁植物具有不可及或不易及的特点,有关崖壁植物的调查一直面临着高成本、高风险和难鉴定的难题。本研究创新性地提出一种采用无人机近景摄影技术对崖壁植物拍照及专家鉴定的调查方法,通过分析崖壁植物群落的 Margalef、Simpson 与 Pielou 这 3 种多样性指数的变化,探究海拔、光照、立地条件与水汽条件这 4 种因子对崖壁植物多样性的影响。研究结果表明:本次调查共发现崖壁植物 267 种,分属于 58 科、140 属;崖壁植物物种数目与海拔高度变化服从正态分布,物种数量在中海拔 700—800m 达到峰值,Simpson 指数与 Pielou 指数在低海拔时达到最高,随海拔的升高而下降,但不表现出明显的变化规律;崖壁植物在不同的立地条件下,植物群落的物种组成、优势种类与出现频率均有所不同;崖壁植物的相关性分析显示,在光照条件出现差异或立地条件不同时,崖壁植物各指数之间存在着不同的显著性关系;近水崖壁植物与对照组的分析结果对比显示,崖壁植物的数量与物种组成受崖壁间水汽条件的影响,崖壁水汽条件越高的地区有着更丰富的植物种类。本研究表明崖壁植物的分布特征是受海拔、光照、立地条件以及水汽条件等多因素的综合作用而成。

关键词: 无人机; 崖壁植物; 近景摄影; 植物多样性; 植物相关关系

Application of UAV close-range photography in the study of plant diversity on cliff walls

ZHU Jiaying^{1,2,3}, ZHOU Hui^{1,2,3}, XIONG Yujiu^{4,5}, YAN Enping^{1,2,3}, MO Dengkui^{1,2,3,*}

1 College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Hunan Provincial Key Laboratory of Forestry Remote Sensing Big Data and Ecological Security, Changsha 410004, China

3 South Key Laboratory of Forest Resources Management and Monitoring, State Forestry Administration, Changsha 410004, China

4 School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

5 Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The surveys about cliff plants have been faced with the problems of high costs, high risks and difficult identification because they are inaccessible. In this study, an innovative survey method, UVA close-range photography, is proposed for the identification of cliff plants. By studying the relationship of the Margalef index, Simpson index and Pielou index of cliff plants, the effects of altitude, light, site conditions and water vapor conditions on cliff plants are explored. In total 267 species of cliff plants which belong to 58 families and 140 genera are found in this survey. The results show that the relationship between the species of cliff plants and the change of altitude follows a normal distribution, reaching the

基金项目:国家自然科学基金(32071682, 31901311); 湖南省教育厅重点项目(19A525, 18A151)

收稿日期:2020-08-28; **网络出版日期:**2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dengkuimo@csuft.edu.cn

peak at the middle altitude 700—800m. The Simpson index and Pielou index reach the peak at low altitude, which decrease with the increase of altitude, but do not show an obvious change rule; under different site conditions, the species composition, dominant species and occurrence frequency of plant communities are different; the correlation analysis of cliff plants shows that there are different significant relationships among the indexes of cliff plants when the light conditions are different or the site conditions are different. The difference between the cliff plants close to the water area and the control group shows that the species composition and quantity of cliff plants are affected by the water vapor conditions among the cliff walls, and the higher the water vapor condition is, the more abundant plant species are in the area. The characteristics of the distribution of cliff plants are the result of the combination of altitude, light, site conditions and water vapor conditions.

Key Words: UAV; cliff plant; close-range photography; plant diversity; plant correlation

“世界自然遗产”武陵源地属湘西北武陵山系,处于湘、黔、川、鄂交界山区,是中国 14 个陆地生物多样性关键区域之一^[1]。武陵源区内植物多样性丰富、植物垂直带谱明显、群落结构复杂,属中国-日本植物区系的华中植物区,是该植物区的核心地带,蕴藏着众多的古老珍贵植物和中国特有植物资源^[2-6]。在区域构造体系中,武陵源处于新华夏第三隆起带,印支运动塑造了其奇特的石英砂岩峰林地貌景观^[7-11]。武陵源共有石峰 3103 座,峰体分布在海拔 200—1200m,峰体高几十米至几百米不等,丰富的石英砂峰体上孕育了不同的植物群落^[12]。自 1959 年至今,国内外专家学者根据不同侧重点采集调查了该区域的植物,但研究范围均在人类足迹可以达到的地域,而生长于崖壁之上的植物一直未系统调查研究^[13-14]。

植物多样性及其动态一直是现代生态学的研究热点之一^[15-19]。国内外学者对植物多样性的调查研究结果表明,海拔梯度、光照、立地因子、湿度等环境因子是影响植物种群分布和生长的重要因素^[20]。崖壁植物生存环境险恶,往往不可及或不易及,传统调查方法,例如攀岩,危险性高,因此有关崖壁植物的多样性研究分析并不常见。崖壁地势陡峭,土层稀薄乃至缺失,且其保水及养分涵养能力差,恶劣的特殊生境造成崖壁植物除具有一般植物的生物学、生态学、生理学及遗传学特性外,通常还具有强抗性、耐受性、生态适应多重性等特性^[21]。因此,崖壁植物的调查研究对于确定石漠化、干旱等极端立地条件下的先锋植物,改善治理石漠化、干旱地区的生态条件意义重大。

崖壁植物研究最初采用攀爬和样方调查方法,该方法危险性大、只能调查攀爬可达的植物群落,严重局限样本代表性^[21-24]。国外学者曾采用望远镜收集崖壁植物数据,通过对监测崖壁进行网格区划,结合最佳函数开展崖壁物种研究,但该调查方法不具可重复性、物种识别受主观因素影响大^[25-28]。随着无人机技术的飞速发展,其起降时间灵活、成本低等优点,使无人机在植被调查与监测中获得广泛应用^[29-32]。针对崖壁特殊环境无人机植被调查研究较少,笔者提出一种基于无人机近景摄影的高效调查方法,为崖壁植物调查研究提供一种新方案,基于该调查方法采集的崖壁植物影像数据,试图解明以下 4 个科学问题:1) 不同光照条件下崖壁植物数量随海拔变化有何规律? 2) 崖壁植物多样性与海拔、立地条件之间的关系? 3) 崖壁植物多样性指数间的相关关系如何? 4) 水汽条件是否影响崖壁植物多样性? 以期为崖壁植物调查提供一种有效的新方法,为研究极端生境下植物生态多样性提供一种新思路。

1 研究地概况

武陵源世界自然遗产位于中国中部、湖南省西北部,地处东经 110°20′30″—110°41′15″、北纬 29°16′25″—29°24′25″之间,区内石英砂岩形状丰富多样,峰柱高耸孤立,其上土层贫瘠,保水能力极差。加之石英砂岩峰常年暴露在阳光下,夏季峰柱表面温度极高,水分蒸发快,对植物生存生长极为不利,因此峰柱上的植被在物种组成及生物多样性、植物生存策略多样性等方面均表现出十分强烈的特殊性。武陵源世界自然遗产地属中亚热带山原型季风性湿润气候,区内年平均降水量 1380—1450mm。境内年平均无霜期 274d。

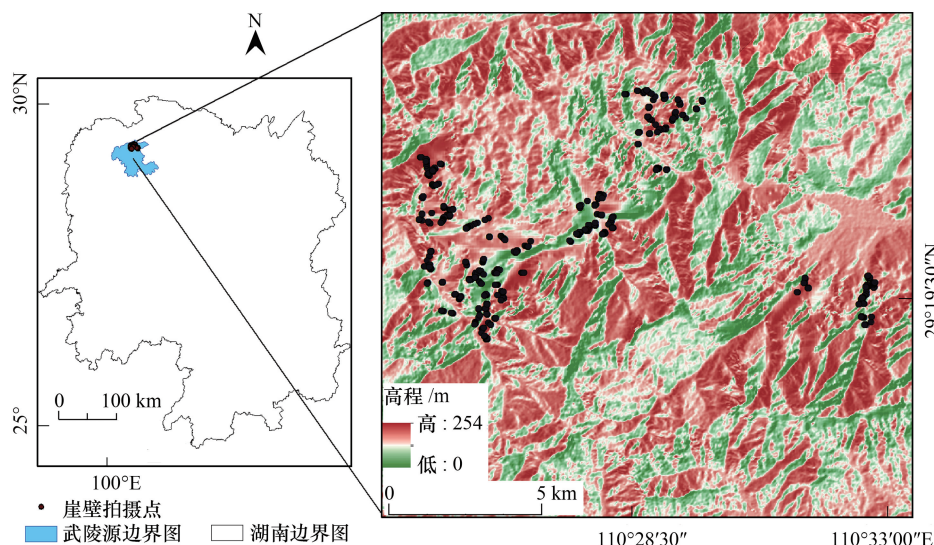


图1 研究区概况

Fig.1 The study area

2 材料和方法

2.1 实地调查

考虑植物的物候性(例如开花、结果或落叶)和天气情况,无人机数据采集于2019年7—9月。实地调查前,在谷歌地球中按不同海拔高度,随机挑选出覆盖整个研究区的150组崖壁样本,后经实地考察和飞行试验,受航拍高度、GPS信号和崖壁可达性等因素限制,剔除了预先筛选的部分崖壁、沿调查路线补充了部分崖壁样本,最终实地调查了197座崖壁。

无人机近景摄影时,使用DJI Mavic 2 PRO无人机从平坦开阔的道路、广场或林窗等地起飞和降落。首先,无人机起飞后,在飞行员可视范围内飞向选定崖壁,缓慢靠近壁面,从崖壁底部垂直自下而上每间隔10m(保证崖壁植物在同一壁面上的连续性)采集一组崖壁照片。无人机拍摄时距离崖壁面3—6m(保证照片清晰展示崖壁植物特征),每次10m间隔平稳停顿后拍摄2—3张崖壁植物照片,在后期处理中择优保留照片。

2.2 植物鉴定

全面收集、整理武陵源世界自然遗产地的植物资源文献,由3名以上经验丰富的植物分类专家对照片上的植物(仅乔木、灌木、藤本)展开“背靠背”鉴定工作,交叉验证植物鉴定结果。

2.3 数据入库

将崖壁植物鉴定结果输入Excel表格,建立崖壁植物数据库,每条崖壁植物与无人机拍摄图片时的经纬度、海拔高度、拍摄角度和拍摄时间相对应。根据无人机拍摄角度来划分崖壁植物所处阴阳面,同时记录每种植物的科属和立地条件。

2.4 数据处理

研究区域的最低海拔约为400m,最高海拔约为1100m。考虑到研究区地形的险峻和采集难度,将海拔按100m间隔划分梯度,并统计崖壁植物数量沿海拔梯度的变化规律。每一海拔梯度,对崖壁除草本植物外的其它植物进行出现频数计数,以确定物种的丰富度。

根据物种鉴定结果,计算背阳面和向阳面植物群落多样性指数,包括Margalef丰富度指数(D_{Ma})、Simpson指数(D)和Pielou均匀度指数(J),具体计算公式如下:

Margalef 丰富度指数

$$D_{Ma} = (S - 1) / \ln N$$

Simpson 指数

$$D = 1 - \sum p_i^2$$

Pielou 均匀度指数

$$J = (-\sum p_i \ln p_i) / \ln S$$

式中, S 代表物种数目, $p_i = n_i / N$, 表明第 i 个物种的相对多度, n_i 为第 i 个种的个体数目, N 为群落中所有种的个体总数。

运用 Excel 2013、SPSS 软件进行数据统计及分析。对崖壁阴阳面、不同立地条件和水汽条件下的植物科属种数量与植物相关关系进行统计和显著性分析。

3 结果与分析

本次调查共发现 267 种崖壁植物, 分属 58 科和 140 属。其中出现频数最多的科为杜鹃花科 (Ericaceae, $s=2077$)、其次有壳斗科 (Fagaceae, $s=1299$)、松科 (Pinaceae, $s=1042$), 出现频率分别为 22.2%、13.9% 和 11.1%。物种数量最高科的为蔷薇科 (Rosaceae, $n=27$), 其次为杜鹃花科 (Ericaceae, $n=17$), 樟科 (Lauraceae, $n=14$), 茜草科 (Rubiaceae, $n=12$), 豆科 (Fabaceae, $n=12$)。巴山松 (*Pinus tabuliformis* var. *henryi*)、乌冈栎 (*Quercus phillyreoides*)、虎皮楠 (*Daphniphyllum oldhamii*) 等植物分布范围较广, 且在所有植物中频数占据最高比例。

3.1 不同光照条件下植物分布变化规律

阳面拥有植物记录 5468 条, 分属 53 科、126 属、236 种, 阴面拥有植物记录 3890 条, 分属 52 科、116 属、187 种。阴阳面物种分布存在差异, 其中菝葜科 (Smilacaceae)、省沽油科 (Staphyleaceae) 只在阴面分布, 而胡颓子科 (Elaeagnaceae)、马鞭草科 (Verbenaceae)、柿科 (Ebenaceae) 仅分布在阳面。崖壁阴阳面植物物种数目随海拔高度的变化服从正态分布, 阴阳面植物科属种数目与 Margalef 指数均在海拔 700—800m 分段内达到峰值 (图 2、图 3)。阴阳面的崖壁植物在不同的海拔分段中出现不同的优势种 (表 1)。

崖壁阳面植被变化现象显示: 在低海拔区段, 崖壁植物种类较少, 各植物种类所出现的频率无显著差异, 随着海拔的升高, 乌冈栎 (*Quercus phillyreoides*)、满山红 (*Rhododendron mariesii*)、巴山松 (*Pinus tabuliformis* var. *henryi*) 逐渐成为明显的崖壁植物优势物种。阳面崖壁植物的 Simpson 指数在低海拔 500—600m 达到峰值, 随海拔的变化未表现明显规律, 阳面植物 Pielou 指数变化趋势与总 Pielou 指数变化趋势相同, 随海拔呈“w 型”变化。

阴面崖壁植物的 Margalef 指数在海拔 400—500m 区间达到最低, 在 900—1100m 海拔区间出现回升现象 (图 3)。阴面的 Simpson 指数峰值出现在 400—500m 低海拔区间, 阴面崖壁植物的 Pielou 指数随海拔的升高呈先下降后上升的变化趋势, 其最低值出现在海拔 800—900m 区间, 随着海拔的升高, 巴山松 (*Pinus tabuliformis* var. *henryi*) 逐渐替代乌冈栎 (*Quercus phillyreoides*) 成为阴面出现频数最多的优势种。

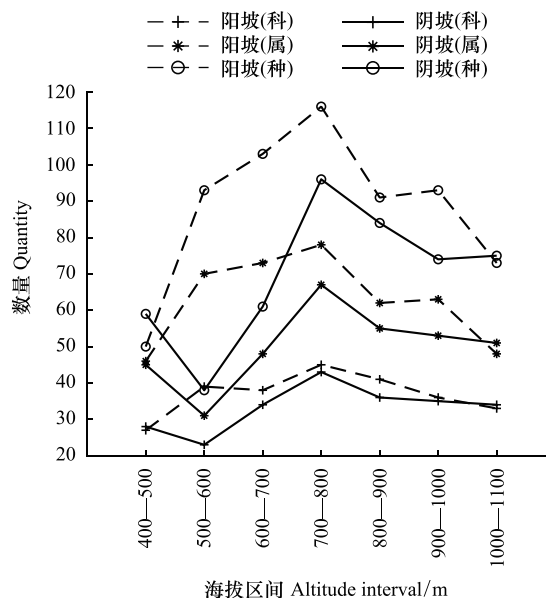


图 2 阳面、阴面植物分布科、属、种分布

Fig.2 Sunny side, shady side plant distribution family, genus, species distribution

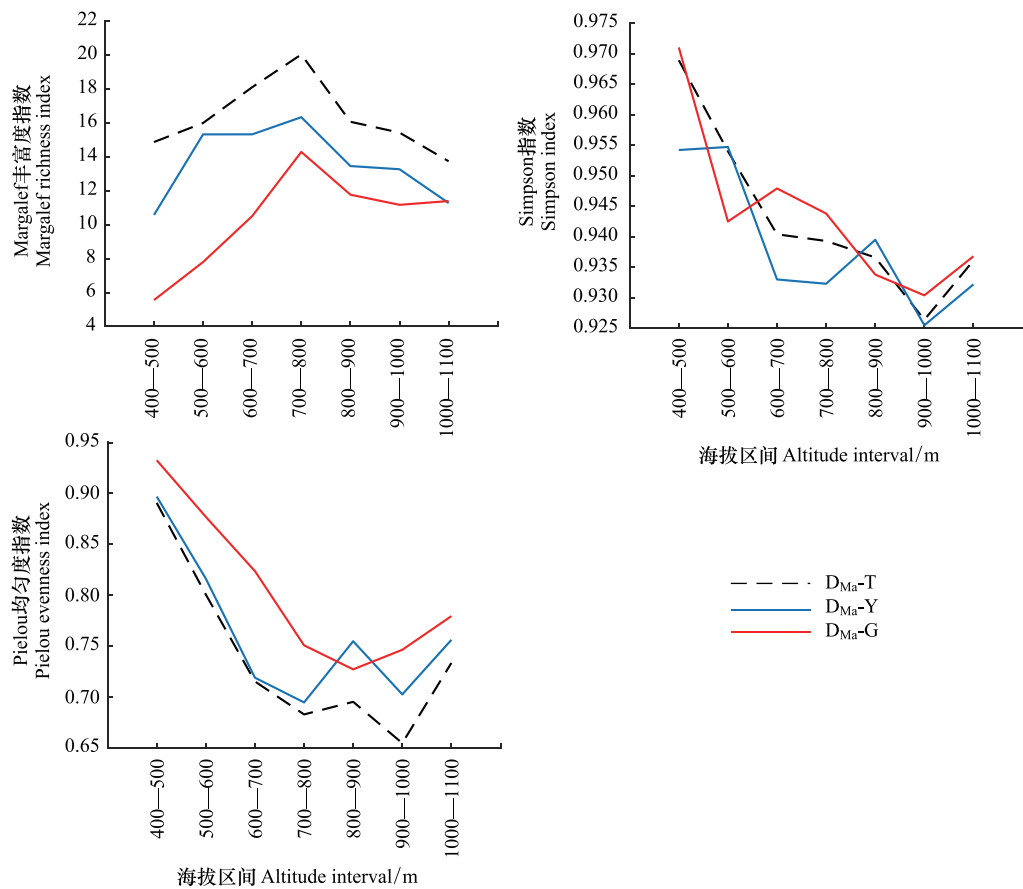


图3 阳面、阴面植物丰富度指数、多样性指数、均匀度指数垂直分布

Fig.3 Plant richness index, diversity index and evenness index were distributed vertically on sunny and dark sides

D_{Ma-T} 、 D_{Ma-Y} 、 D_{Ma-G} 分别代表崖壁总群落、阳面崖壁群落和阴面崖壁群落

表 1 不同海拔高度崖壁优势植物种分布

Table 1 Distribution of dominant plant species on cliff at different altitudes					
编号 Serial number	海拔梯度 Altitude/m	样本数 Sample size	优势种及出现频数 Dominant species and frequency of occurrence		
Y-1	400—500	111	满山红 12	乌冈栎 12	冠盖藤 6
			<i>Rhododendron mariesii</i>	<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Pileostegia viburnoides</i>
Y-2	500—600	415	乌冈栎 49	虎皮楠 38	满山红 33
			<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Daphniphyllum oldhamii</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>
Y-3	600—700	791	乌冈栎 127	虎皮楠 71	满山红 70
			<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Daphniphyllum oldhamii</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>
Y-4	700—800	1148	乌冈栎 172	巴山松 124	满山红 109
			<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>
Y-5	800—900	809	乌冈栎 108	巴山松 96	满山红 73
			<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>
Y-6	900—1000	1120	乌冈栎 163	巴山松 162	满山红 117
			<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>
Y-7	1000—1100	603	巴山松 97	乌冈栎 68	满山红 60
			<i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	<i>Quercus phillyreoides</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>
G-1	400—500	132	虎皮楠 8	满山红 8	乌冈栎 8
			<i>Daphniphyllum oldhamii</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>	<i>Quercus phillyreoides</i>
G-2	500—600	116	虎皮楠 13	满山红 12	乌冈栎 12
			<i>Daphniphyllum oldhamii</i>	<i>Rhododendron mariesii</i>	<i>Quercus phillyreoides</i>

续表

编号 Serial number	海拔梯度 Altitude/m	样本数 Sample size	优势种及出现频数 Dominant species and frequency of occurrence		
G-3	600—700	306	乌冈栎 39 <i>Quercus phillyreoides</i>	满山红 28 <i>Rhododendron mariesii</i>	巴山松 22 <i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>
G-4	700—800	783	乌冈栎 105 <i>Quercus phillyreoides</i>	虎皮楠 66 <i>Daphniphyllum oldhamii</i>	满山红 58 <i>Rhododendron mariesii</i>
G-5	800—900	1186	乌冈栎 154 <i>Quercus phillyreoides</i>	巴山松 147 <i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	虎皮楠 112 <i>Daphniphyllum oldhamii</i>
G-6	900—1000	695	巴山松 99 <i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	乌冈栎 91 <i>Quercus phillyreoides</i>	满山红 68 <i>Rhododendron mariesii</i>
G-7	1000—1100	672	巴山松 110 <i>Pinus tabuliformis</i> var. <i>henryi</i>	满山红 79 <i>Rhododendron mariesii</i>	乌冈栎 49 <i>Quercus phillyreoides</i>

Y 表示阳面植物,G 表示阴面植物

3.2 不同光照条件/不同立地条件下崖壁植物多样性及均匀度的变化

将崖壁植物的生境记录为石壁、台阶、台阶和石壁、崖顶四种类型(如图 4),共划分为石壁、台阶、崖顶三种立地条件。其中巴山松(*Pinus tabuliformis* var. *henryi*)、白豆杉(*Pseudotaxus chienii*)、秤钩风(*Diploclisia affinis*)、灯笼树(*Enkianthus chinensis*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、红柄木犀(*Osmanthus armatus*)、篌竹(*Phyllostachys nidularia*)、虎皮楠(*Daphniphyllum oldhamii*)、娥眉鼠刺(*Itea omeiensis*)、老鼠矢(*Symplocos stellaris*)、满山红(*Rhododendron mariesii*)、密花树(*Myrsine seguinii*)、南烛(*Vaccinium bracteatum*)、山樱花(*Cerasus serrulata*)、铁仔(*Myrsine africana*)、乌冈栎(*Quercus phillyreoides*)、无梗越橘(*Vaccinium henryi*)、吴茱萸五加(*Gamblea ciliata* var. *evodiifolia*)、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)、银木荷(*Schima argentea*)、紫果槭(*Acer cordatum*)这 21 种植物在 3 种立地条件中均有记录。在不同的立地条件下,崖壁植物多样性指数随海拔的变化呈不同的趋势。

在石壁中,崖壁植物的总 Margalef 丰富度指数与阳面植物的 Margalef 丰富度指数随海拔的升高均呈先上升后下降的趋势(图 4)。崖壁植物总 Simpson 指数和阴面植物的 Simpson 指数呈现先下降后上升的趋势,而阳面植物的 Simpson 指数呈“W”变化趋势(图 6)。崖壁植物的总 Pielou 指数均小于阴阳面植物的 Pielou 均匀度指数(图 7)。

在台阶中,植物阴阳面植物的 Margalef 指数在中海拔 700—800 区间最高,Simpson 指数无明显上升和下



图 4 崖壁植物立地条件区分示意
Fig.4 Diagram of site conditions of cliff plants

降趋势。崖壁植物总 Pielou 均匀度指数与阴面植物的 Pielou 均匀度指数呈先下降后上升的趋势,最高值和最低值分别出现在低海拔 400—500m 区间和中海拔 800—900m 区间,阳面植物 Pielou 均匀性呈“W”变化趋势。

在崖顶中,植物的 Margalef 指数呈波浪型上升趋势,总 Margalef 指数与阴面 Margalef 指数在高海拔 1000—1100m 达到最高值,植物 Pielou 指数与其余立地条件相比波动幅度最小,较其余立地环境而言更稳定。

不同立地条件下,崖壁植物的物种组成、优势种类与出现频率均有所不同,立地条件是影响崖壁植物多样性的因素之一。

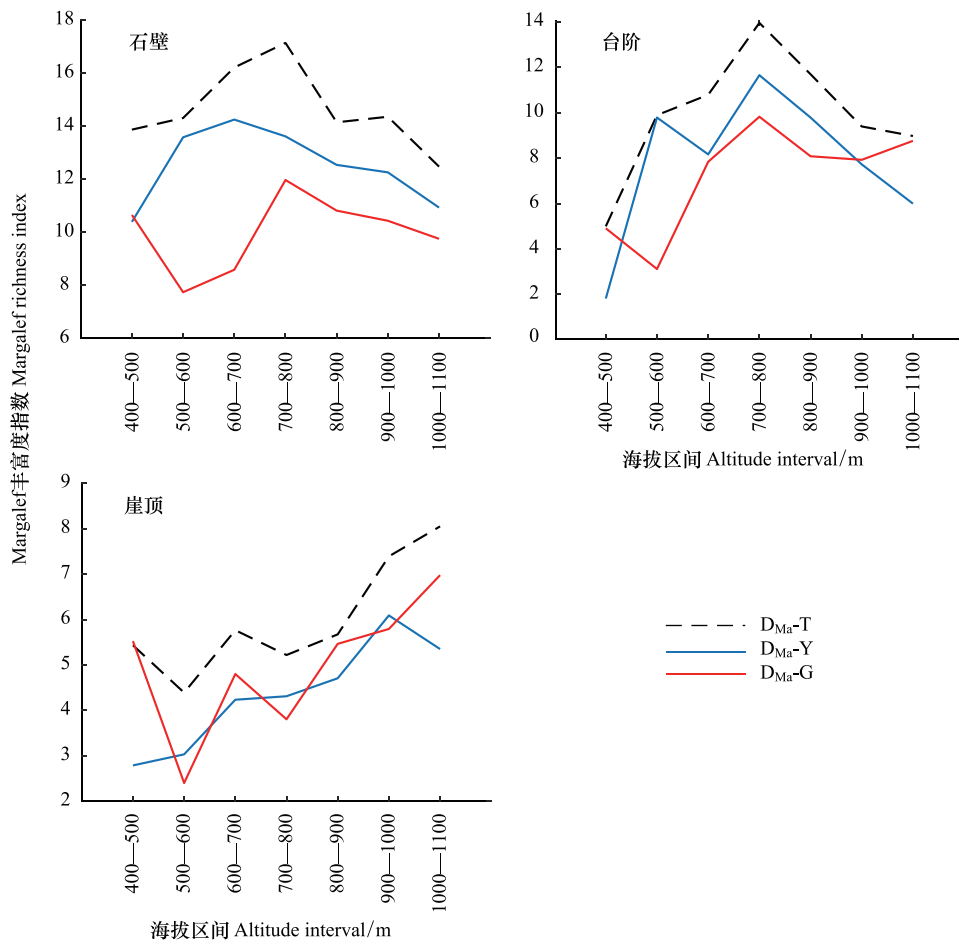


图 5 不同立地条件崖壁植物丰富度指数的垂直分布

Fig.5 Vertical distribution of plant richness index under different site conditions

图中数据为平均值±标准误差;D_{Ma}-T、D_{Ma}-Y、D_{Ma}-G 分别代表群落总体、阳面、阴面的 Margalef 丰富度指数

3.3 植物多样性指数间的相关关系

相关分析结果表明(表 2),崖壁植物总 Margalef 指数与阳面植物 Margalef 指数呈正相关关系($P<0.05$);总群落 Simpson 指数与阴阳面植物 Simpson 指数之间呈正相关关系($P<0.01$),与总群落和阴面植物 Pielou 均匀度指数之间呈正相关关系($P<0.01$);阳面、阴面植物的 Simpson 指数与总群落和阴面植物的 Pielou 均匀度指数呈正相关关系($P<0.05$),崖壁植物各相关性指数与海拔高度无显著相关性。

相关分析结果表明(表 3),在石壁立地条件中,植物总群落 Margalef 指数与阳面植物的 Margalef 指数呈正相关关系($P<0.05$);植物总群落 Simpson 指数与阴阳面植物 Simpson 指数呈正相关关系($P<0.01$),与植物总群落 Pielou 均匀度指数和阴阳面植物 Pielou 均匀度指数呈正相关关系($P<0.01$);阴面植物 Simpson 指数与阳面植物 Simpson 指数、Pielou 均匀度指数呈正相关关系($P<0.05$),与总群落和阴面植物的 Pielou 均匀度指

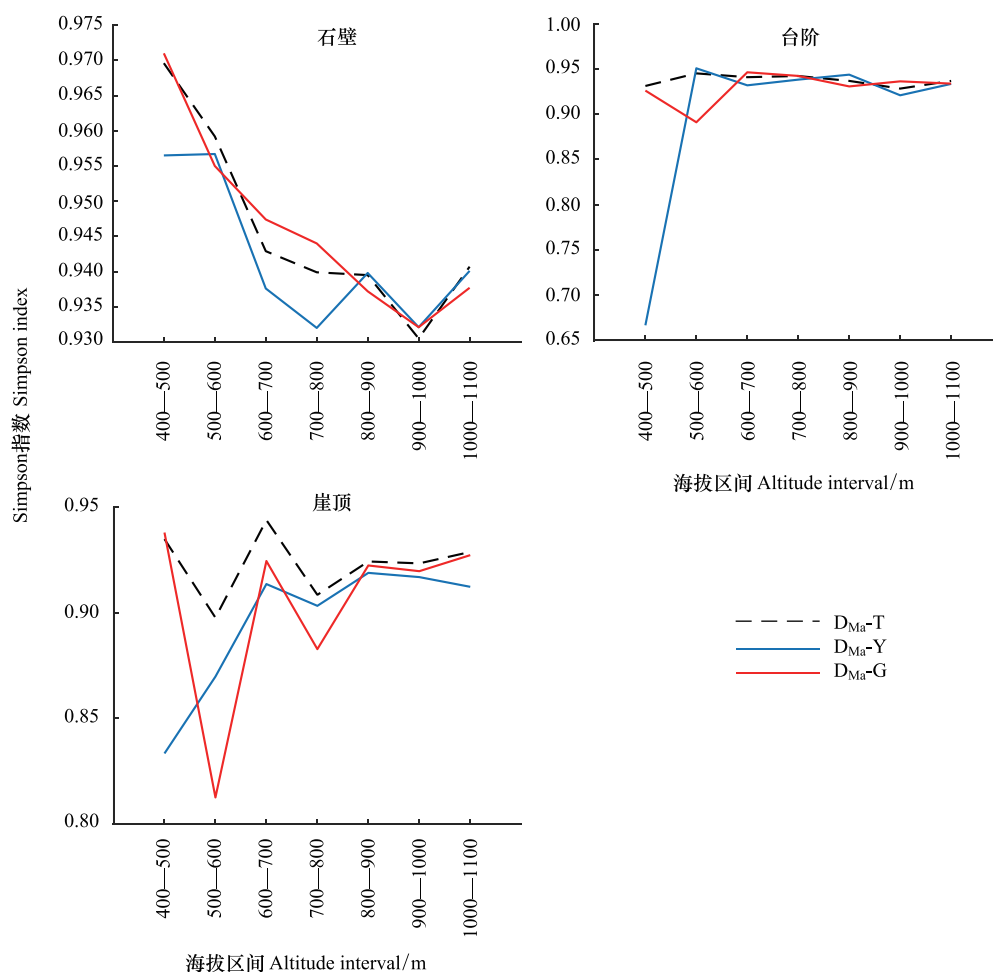


图6 不同立地条件崖壁植物多样性指数的垂直分布

Fig.6 Vertical distribution of plant diversity index under different site conditions

图中数据为平均值±标准误差; D_{Ma-T} 、 D_{Ma-Y} 、 D_{Ma-G} 分别代表群落总体、阳面、阴面的 Simpson 指数

数呈正相关关系 ($P < 0.01$); 阳面植物多样性指数与总群落和阳面的均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.01$), 与阴面植物 Pielou 指数呈正相关关系 ($P < 0.05$); 植物总均匀度指数与阳面、阴面植物均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.01$); 阳面与阴面植物 Pielou 均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.05$)。

相关分析结果表明(表4),在台阶立地条件中,植物总群落 Margalef 指数与阳面植物的 Margalef 指数呈正相关关系 ($P < 0.01$),与阳面植物 Simpson 指数呈正相关关系 ($P < 0.05$); 阴面植物的 Margalef 指数与阴面植物的 Simpson 指数呈正相关关系 ($P < 0.05$); 植物群落的 Pielou 均匀度指数与阴面、阳面植物的 Pielou 均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.01$); 阳面植物 Pielou 均匀度指数与阴面 Pielou 均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.05$)。

相关分析结果表明(表5),在崖顶立地条件中,植物群落的 Margalef 指数与阴阳面植物 Margalef 指数和海拔呈正相关关系 ($P < 0.05$); 阴面植物 Margalef 指数与阴面植物 Simpson 指数呈正相关关系 ($P < 0.01$); 阳面植物 Margalef 指数与阳面植物 Simpson 指数呈正相关关系 ($P < 0.05$),与海拔呈正相关关系 ($P < 0.01$); 植物群落总 Simpson 指数与阴面植物 Simpson 指数呈正相关关系 ($P < 0.01$); 阳面植物多样性指数与海拔呈正相关关系 ($P < 0.05$); 植物群落总 Pielou 均匀度指数与阴阳面植物 Pielou 均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.01$); 阴阳面植物 Pielou 均匀度指数呈正相关关系 ($P < 0.05$)。

在光照条件出现差异或立地条件不同时,崖壁植物各指数之间存在着不同的显著性关系。这与其他植物群落研究^[33-34]中总结的 Margalef 指数与 Simpson 指数显著相关, Pielou 指数与各类多样性指数不相关的结论不同。

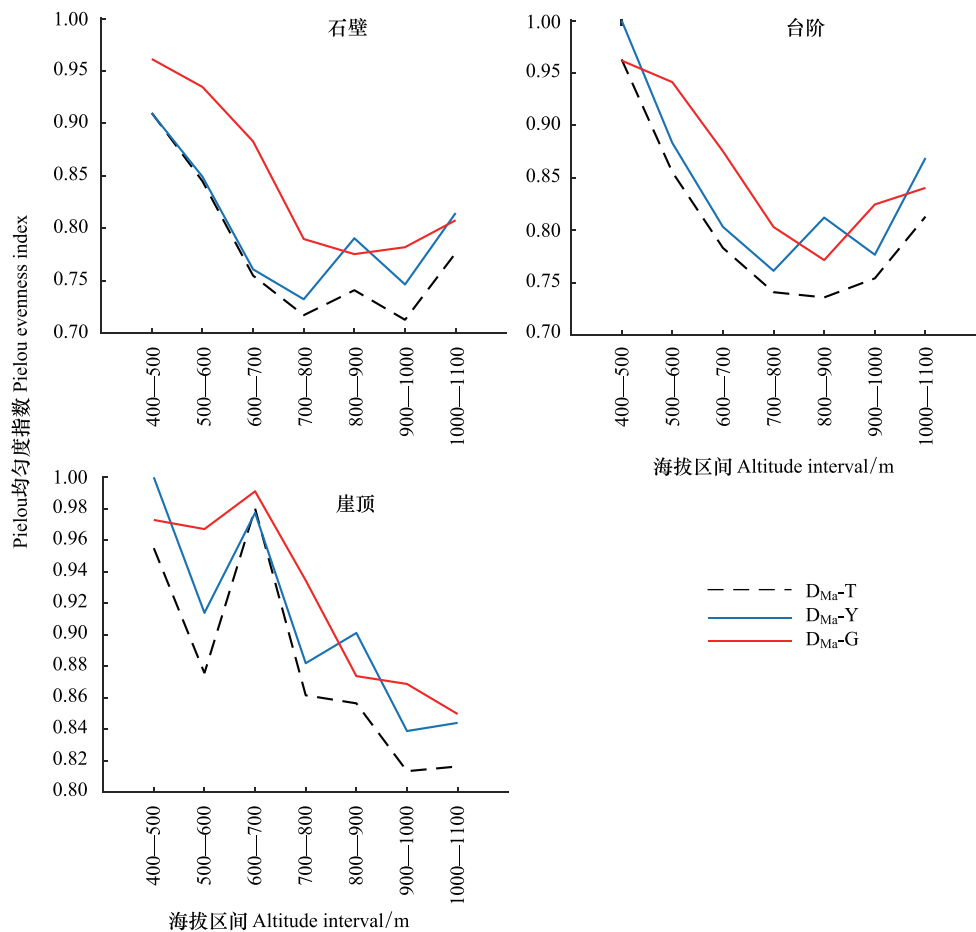


图 7 不同立地条件崖壁植物均匀度指数的垂直分布

Fig.7 Vertical distribution of plant uniformity index under different site conditions

图中数据为平均值±标准误差;D_{Ma}-T、D_{Ma}-Y、D_{Ma}-G 分别代表群落总体、阳面、阴面的 Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index

表 2 崖壁总植物物种多样性相关关系

Table 2 Correlation of species diversity of cliff plants

	Margalef 阴面	Margalef 阳面	Simpson 总指数	Simpson 阴面	Simpson 阳面	Pielou 总指数	Pielou 阴面	Pielou 阳面	海拔 Altitude
Margalef 总指数	0.523	0.854 *	-0.142	0.005	-0.229	-0.418	-0.273	-0.729	-0.240
Margalef 阴面		0.493	-0.823	-0.690	-0.805	-0.922	-0.919	-0.280	0.690
Margalef 阳面			-0.284	-0.317	-0.184	-0.506	-0.316	-0.702	-0.138
simpson 总指数				0.897 **	0.909 **	0.953 **	0.930 **	0.226	-0.867
simpson 阴面					0.640	0.837 *	0.839 *	0.138	-0.808
simpson 阳面						0.870 *	0.829 *	0.194	-0.794
pielou 总指数							0.958 **	0.413	-0.731
pielou 阴面								0.284	-0.817
pielou 阳面									0.246

* * 相关分析显著性水平 $P<0.01$, * 相关分析显著性水平 $P<0.05$

表 3 石壁植被物种多样性指数相关关系

Table 3 Correlation of species diversity index of rock wall

	Margalef 阴面	Margalef 阳面	Simpson 总指数	Simpson 阴面	Simpson 阳面	Pielou 总指数	Pielou 阴面	Pielou 阳面	海拔 Altitude
Margalef 总指数	0.241	0.774 *	-0.188	0.010	-0.412	-0.387	-0.073	-0.586	-0.306
Margalef 阴面		-0.323	-0.267	-0.158	-0.478	-0.304	-0.502	-0.280	0.249
Margalef 阳面			-0.292	-0.211	-0.306	-0.453	-0.071	-0.605	-0.161
Simpson 总指数				0.966 **	0.936 **	0.974 **	0.922 **	0.903 **	-0.845
Simpson 阴面					0.823 *	0.914 **	0.925 **	0.796 *	-0.909
Simpson 阳面						0.949 **	0.868 *	0.937 **	-0.712
pielou 总指数							0.897 **	0.968 **	-0.726
pielou 阴面								0.777 *	-0.874
pielou 阳面									-0.566

** 相关分析显著性水平 $P<0.01$, * 相关分析显著性水平 $P<0.05$

表 4 台阶植被物种多样性指数相关关系

Table 4 Correlation of species diversity index of vegetation

	Margalef 阴面	Margalef 阳面	Simpson 总指数	Simpson 阴面	Simpson 阳面	Pielou 总指数	Pielou 阴面	Pielou 阳面	海拔 Altitude
Margalef 总指数	0.574	0.951 **	0.574	0.260	0.806 *	-0.871	-0.719	-0.870	0.331
Margalef 阴面		0.328	-0.124	0.864 *	0.385	-0.700	-0.845	-0.691	0.705
Margalef 阳面			0.628	-0.018	0.852 *	-0.819	-0.587	-0.815	0.241
Simpson 总指数				-0.334	0.513	-0.211	0.063	-0.198	-0.268
Simpson 阴面					0.019	-0.407	-0.565	-0.463	0.414
Simpson 阳面						-0.870	-0.613	-0.809	0.567
Pielou 总指数							0.885 **	0.965 **	-0.671
Pielou 阴面								0.800 *	-0.766
Pielou 阳面									-0.561

** 相关分析显著性水平 $P<0.01$, * 相关分析显著性水平 $P<0.05$

表 5 崖顶植被物种多样性指数相关关系

Table 5 Correlation of species diversity index of cliff top

	Margalef 阴面	Margalef 阳面	Simpson 总指数	Simpson 阴面	Simpson 阳面	Pielou 总指数	Pielou 阴面	Pielou 阳面	海拔 Altitude
Margalef 总指数	0.865 *	0.819 *	0.437	0.604	0.498	-0.525	-0.755	-0.595	0.830 *
Margalef 阴面		0.590	0.701	0.880 **	0.287	-0.239	-0.636	-0.243	0.613
Margalef 阳面			0.180	0.397	0.839 *	-0.678	-0.808	-0.789	0.934 **
Simpson 总指数				0.881 **	0.104	0.484	0.041	0.409	0.067
Simpson 阴面					0.190	0.142	-0.307	0.115	0.317
Simpson 阳面						-0.475	-0.581	-0.632	0.807 *
Pielou 总指数							0.877 **	0.966 **	-0.793
Pielou 阴面								0.845 *	-0.915
pielou 阳面									-0.867

** 相关分析显著性水平 $P<0.01$, * 相关分析显著性水平 $P<0.05$

3.4 水汽条件对崖壁植物多样性的影响

本次采集崖壁植物数据中包含 1097 条近水崖壁植物数据。为了探究水汽条件对崖壁植物多样性有无影响,我们再随机抽取三组各 1097 条非近水崖壁数据作为对照进行分析。近水崖壁植物集中出现在低海拔 400—800m,海拔高于 800m 后植物科属种呈直线下降趋势,并在 1000m 海拔彻底消失(图 8)。同对照组数据相比,近水崖壁植物拥有更多的物种数量。其中防己科(Menispermaceae)、胡颓子科(Elaeagnaceae)、木通科

(Lardizabalaceae)、清风藤科(Sabiaceae)、芸香科(Rutaceae)仅出现在近水组中。

植物相关性指数表明(图 9),对照组的 Margalef 指数、Simpson 指数随着海拔的升高呈先上升后下降的趋势,而近水崖壁植物的 Margalef 指数、Simpson 指数随海拔的升高而降低。在近水崖壁植物分布的海拔 400—1000m 区间内,崖壁植物的 Pielou 均匀度指数呈“V”字型变化,在 900—1000m 达到最大值。由该结果可知,水汽条件对于崖壁植物群落多样性有重要影响;在水资源丰富、湿度较大的环境中,崖壁植物群落多样性更高;随着海拔的升高,水汽蒸腾作用的减弱,崖壁水汽条件逐渐变低,崖壁植物群落的丰富度和多样性下降。

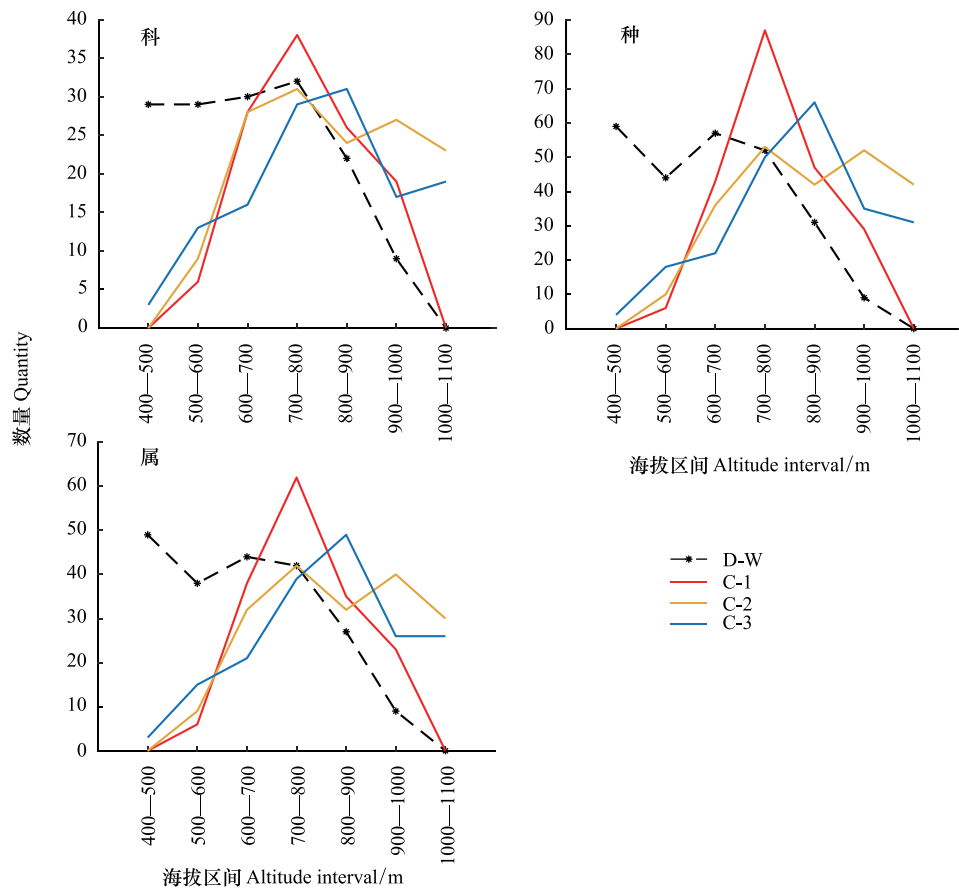


图 8 近水崖壁植物物种数量与对照组植物物种数量的垂直分布情况

Fig.8 Vertical distribution of the number of plant species near the cliff and the control group

图中数据为平均值±标准误差;D-W、C-1、C-2、C-3 分别代表近水崖壁数据、对照组 1、对照组 2、对照组 3

4 讨论与结论

植物多样性随环境因子的变化规律一直是生态学家研究的热点科学问题,其研究对象涉及森林、草地、灌丛等诸多植被类型^[35-37]。受限于调查方法的可达性,现有的崖壁植物调查均限于单面崖壁的小规模研究,尚未开展过随海拔梯度的崖壁植物群调查,崖壁植物多样性随环境因子的变化规律也尚无科学定论。根据以往查阅的资料,国内外专家学者已利用小型无人机航拍开展过喜马拉雅植被图的绘制^[38],也利用无人机进行过海岸崖壁植物的生境监测和多光谱点云研究^[39-40]。无人机技术为大规模的崖壁植物多样性调查提供了可能。

崖壁植物鉴定方法的选择是本次研究的一个重点内容。植物智能识别除了受照片拍摄的光线、姿态和方向变化的影响外,还会受植物年龄与叶片形状的影响^[41]。通过植物软件识别崖壁植物照片的结果准确度较低,其识别精度无法满足我们的鉴定需求。另外,此次调查是有关武陵源崖壁植物的第一次系统性调查,笔者

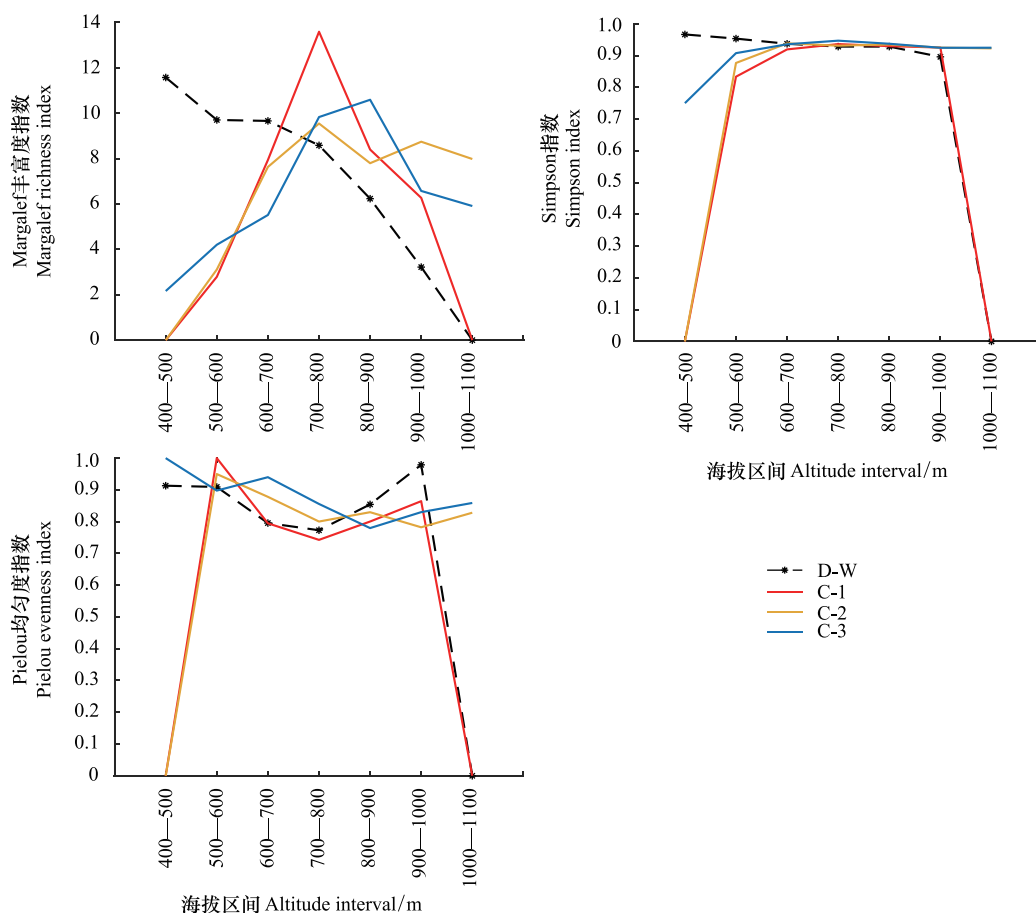


图9 近水崖壁植物多样性指数垂直分布

Fig.9 Vertical distribution of plant diversity index near the water cliff

图中数据为平均值±标准误差; D-W、C-1、C-2、C-3 分别代表近水崖壁数据、对照组 1、对照组 2、对照组 3

在鉴定之初无法确定此次调查的崖壁植物中是否存在新种的出现。为保证鉴定的准确性,研究中采取植物学家“背靠背”专家鉴定、交叉验证的方法。在未来的研究中,尝试通过深度学习提取植物特征开展自动识别研究,以期提高崖壁植物计算机自动鉴定及其精度。

目前无人机和数字摄影测量设备可通过精确地倾斜摄影和水平摄影降低投影面积偏低的影响^[42-43]。由于本次无人机调查的崖壁群数量多、范围广,还受电池续航有限等因素限制,我们无法对崖壁进行精确的倾斜摄影,崖壁的坡度在一定程度上会造成照片拍摄范围的不一致^[44-45]。本次调查崖壁的整体坡度都大于 80 度,因此我们忽略了坡度对崖壁的影响,将调查的重点放在了植物的物种组成和分布上,目前我们正在寻求解决该问题的新方法。后续我们将进行崖壁建模,对崖壁的坡度以及崖壁植物生长的微生境进行深入研究。

本次武陵源崖壁群植物调查研究表明,崖壁植物物种丰富度与优势物种会随海拔高度的变化而变化,而崖壁植物群落的 Simpson 指数与 Pielou 均匀度随海拔高度改变没有表现出明显变化规律。从阴阳面植物的分布特征来看,阳面较阴面拥有更高的物种丰富度。本在同一崖壁群类型中,崖壁植物数量的峰值普遍出现在中海拔地段,但崖壁植物的 Simpson 多样性指数与 Pielou 均匀度指数往往在低海拔区间最高,该结论是基于我们首次对崖壁植物系统调查后的新发现。

立地条件是指与植被生长发育有关的环境因子的综合^[39],例如海拔、光照的不同会导致水热条件的差异,影响微生物总体数量及其多样性^[46],进而微生物分解和土壤养分循环,对植物生长产生显著影响^[47]。本研究中,各立地条件间植物种类以及出现频率都存在一定的差异,因此,不同立地条件的崖壁植物有不同的组

成特征。崖壁植物群落立地条件的特殊性使其在改善荒漠化和恢复生态系统中具有很大的应用潜力,在 3 种立地条件中均出现的 21 种植物,有可能是石漠化、干旱等极端立地条件下的先锋植物。崖壁植物总群落、阳面、阴面植物群落中不同立地类型的 Marglef 丰富度指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数随海拔的升高变化趋势都存在明显的差异,但其变化并未表现出明显的特定规律,因此,崖壁植物的丰富度多样性均匀度受立地条件的影响,但随海拔高度的变化并无统一规律。

本次研究是利用无人机近景摄影技术系统调查崖壁植物的初次实践,采样范围和调查规模都远非已有崖壁植物调查研究可比。结果表明无人机近景摄影调查崖壁植物的方法可行,但无人机的等间隔垂直拍摄无法构建崖壁三维模型,因此对崖壁坡度和植物的微生境以及覆盖度等特征无法进行准确提取和分析。此外,本研究发现的崖壁植物多样性随海拔、光照、湿度等立地条件的变化规律和结论,是石英砂崖壁植物特有或是具有普适性,还需后续对不同岩石类型的崖壁植物群落调查研究。

致谢:张家界武陵源管理局给予支持,中南林业科技大学喻勋林教授、李家湘副教授、徐永福老师帮助植物鉴定,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 《中国生物多样性国情研究报告》编写组. 中国生物多样性国情研究报告. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 147-151.
- [2] 彭春良. 湖南索溪峪自然保护区的木本植物区系研究. 中南林学院学报, 1989, 9(1): 85-92.
- [3] 吴世福, 周宝红. 湖南省武陵源区蕨类植物初步研究. 上海师范大学学报: 自然科学版, 1997, 26(2): 73-77.
- [4] Wu S F, Li X G, Zhao H F. Study on the pteridophyte of Wulingyuan from Hunan Province, China. Bulletin of Botanical Research, 2002, 22(3): 380-384.
- [5] 廖博儒, 吴明煜, 戴灵鹏, 聂冉. 湖南武陵源种子植物区系初步研究. 武汉植物学研究, 2004, 22(3): 231-239.
- [6] 廖博儒, 柳菲. 武陵源与黄山、武夷山、南岳种子植物区系比较研究. 山东林业科技, 2009, 39(6): 8-13.
- [7] 陈国达. 武陵源峰林地貌形成的大地构造条件. 大地构造与成矿学, 1993, 17(2): 103-112.
- [8] 吕金波, 陈文光, 王纯君. 张家界砂岩地貌成因分析. 城市地质, 2015, 10(4): 25-32.
- [9] 黄林燕, 朱诚, 孔庆友. 张家界岩性特征对峰林地貌形成的影响研究. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29(5): 484-489.
- [10] 平亚敏, 杨桂芳, 张绪教, 田明中, 陈安泽, 葛之亮, 倪志云, 杨振. 张家界砂岩地貌形成时代: 来自阶地与溶洞对比的证据. 地质论评, 2011, 57(1): 118-124.
- [11] 陈平, 徐素宁. 武陵源砂岩峰林的自然属性与地质美学价值. 地理与地理信息科学, 2006, 22(4): 80-83.
- [12] 周辉. 武陵源世界自然遗产地植物多样性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [13] 《湖南植物志》编辑委员会. 湖南植物志(第一卷). 长沙: 湖南科学技术出版社, 2004.
- [14] 祁承经, 林亲众. 湖南树木志. 长沙: 科学技术出版社, 2000.
- [15] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. Science, 2001, 294(5543): 804-808.
- [16] Bai Y F, Li L H, Huang J H, Chen Z Z. The influence of plant diversity and functional composition on ecosystem stability of four stipa communities in the inner mongolia plateau. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(3): 280-287.
- [17] Wardle D A. No observational evidence for diversity-enhancing productivity in Mediterranean shrublands? A reply to Wardle. Oecologia, 2001, 129(4): 622-623.
- [18] Wardle D A. No observational evidence for diversity enhancing productivity in Mediterranean shrublands. Oecologia, 2001, 129(4): 620-621.
- [19] 徐翔, 张化永, 谢婷, 孙青青, 田永兰. 西双版纳种子植物物种多样性的垂直格局及机制. 生物多样性, 2018, 26(7): 678-689.
- [20] 苏闯, 张芯毓, 马文红, 赵利清, 梁存柱. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释. 山地学报, 2018, 36(5): 699-708.
- [21] 刘徐师. 山西省崖壁植物资源及其在难造林地的应用前景分析. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1785-1790.
- [22] Camp R J, Knight R L. Effects of rock climbing on cliff plant communities at joshua tree national park, California. Conservation Biology, 1998, 12(6): 1302-1306.
- [23] McCaffrey N B, Blick R A J, Glenn V C, Fletcher A T, Erskine P D, Van Osta J. Novel 'stratified-meander' technique improves survey effort of the rare Pagoda Rock Daisy growing remotely on rocky cliff edges. Ecological Management & Restoration, 2014, 15(1): 94-97.
- [24] March-Salas M, Moreno-Moya M, Palomar G, Tejero-Ibarra P, Haeuser E, Perterra L R. An innovative vegetation survey design in Mediterranean

- cliffs shows evidence of higher tolerance of specialized rock plants to rock climbing activity. *Applied Vegetation Science*, 2018, 21(2): 289-297.
- [25] Swanepoel W, Van Jaarsveld E, Voigt W, Van Wyk F, Versfeld F. The otjhipa mountains expedition: botanical exploration in namibia: kaokoveld centre of endemism. *Veld & Flora*, 2009, 95(1): 12-18.
- [26] Dragovic M J O. Utilization of *Helichrysum devium* Johns. and *Helichrysum obconicum* DC. as ornamental plants. *Acta Horticulturae*, 2005, 683: 181-187.
- [27] Warshauer F R, Jacobi J D, Price J. Native Coastal Flora and Plant Communities in Hawai'i: their Composition, Distribution, and Status. Hawai'i Cooperative Studies Unit Technical Report HCSU-014. Hilo: University of Hawai'i at Hilo, 2009.
- [28] Alfaro-Saiz E, Granda V, Rodríguez A, Alonso-Redondo R, García-González M E. Inaccessible rocky cliffs: an optimized method for plant data collection in extreme environments. *MethodsX*, 2019, 6: 1199-1206.
- [29] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 79-97.
- [30] Ambrosia V G, Wegener S, Zajkowski T, Sullivan D V, Buechel S, Enomoto F Y, Lobitz B, Johan S, Brass J, Hinkley E. The Ikhana unmanned airborne system (UAS) western states fire imaging missions: from concept to reality (2006-2010). *Geocarto International*, 2011, 26(2): 85-101.
- [31] 王峰, 吴云东. 无人机遥感平台技术研究与应用. *遥感信息*, 2010, (2): 114-118.
- [32] Marris E. Drones in science: fly, and bring me data. *Nature*, 2013, 498(7453): 156-158.
- [33] Dong D, Herring T A, King R W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *Journal of Geodesy*, 1998, 72(4): 200-221.
- [34] 杨利民, 韩梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化. *植物生态学报*. 2001, 25(1): 110.
- [35] 李凯辉, 胡玉昆, 阿德力·麦地, 于建梅, 高国刚. 天山南坡高寒草地物种多样性及地上生物量研究. *干旱区资源与环境*. 2007, 21(1): 155-159.
- [36] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. *生态学报*, 1997, 17(1): 91-99.
- [37] 胡玉昆, 李凯辉, 阿德力·麦地, 柳妍妍, 范永刚, 王鑫, 高国刚. 天山南坡高寒草地海拔梯度上的植物多样性变化格局. *生态学杂志*. 2007, 26(2): 182-186.
- [38] Mishra N B, Mainali K P, Shrestha B B, Radenz J, Karki D. Species-level vegetation mapping in a Himalayan treeline ecotone using unmanned aerial system (UAS) imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(11): 445.
- [39] Strumia S, Buonanno M, Aronne G, Santo A, Santangelo A. Monitoring of plant species and communities on coastal cliffs: is the use of unmanned aerial vehicles suitable? *Diversity*, 2020, 12(4): 149.
- [40] Xu Z, Shen X, Cao L, Coops N C, Goodbody T R H, Zhong T, Zhao W D, Sun Q L, Ba S, Zhang Z N, Wu X Q. Tree species classification using UAS-based digital aerial photogrammetry point clouds and multispectral imageries in subtropical natural forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102173.
- [41] Weaver W N, Ng J, Laport R G. LeafMachine: using machine learning to automate leaf trait extraction from digitized herbarium specimens. *Applications in Plant Sciences*, 2020, 8(6): e11367.
- [42] Barron S J, Delaney A, Perrin P M, Martin J R, O'Neill F H. National Survey and Assessment of the Conservation Status of Irish Sea Cliffs. *Irish Wildlife Manuals*, No. 53. Dublin, Ireland: Irish Wildlife Manuals, National Parks and Wildlife Service, Department of the Environment, Heritage and Local Government, 2011.
- [43] 温璐, 董世魁, 朱磊, 施建军, 刘德梅, 王彦龙, 马玉寿. 环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响. *生态学报*, 2011, 31(7): 1844-1854.
- [44] Goñi D, García M B, Guzmán D. Métodos para el censo y seguimiento de plantas rupícolas amenazadas. *Pirineos*, 2006, 161: 33-58.
- [45] Gigante D, Attorre F, Venanzoni R, Acosta A T R, Agrillo E, Aleffi M, Alessi N, Allegrezza M, Angelini P, Angiolini C, Assini S, Azzella M M, Bagella S, Biondi E, Bolpagni R, Bonari G, Bracco F, Brullo S, Buffa G, Carli E, Caruso G, Casavecchia S, Casella L, Cerabolini B E L, Ciaschetti G, Copiz R, Cutini M, Del Vecchio S, Del Vico E, Di Martino L, Facioni L, Fanelli G, Foggi B, Frattaroli A R, Galdenzi D, Gangale C, Gasparri R, Genovesi P, Gianguzzi L, Gironi F, Del Galdo G G, Gualmini M, Guarino R, Lasen C, Lastrucci L, Maneli F, Pasta S, Paura B, Perrino E V, Petraglia A, Pirone G, Poponessi S, Prisco I, Puglisi M, Ravera S, Sburlino G, Sciandrello S, Selvaggi A, Spada F, Spampinato G, Strumia S, Tomaselli M, Tomaselli V, Uzunov D, Viciani D, Villani M, Wagensommer R P, Zitti S. A methodological protocol for Annex I Habitats monitoring: the contribution of Vegetation science. *Plant Sociology*, 2016, 53(2): 77-87.
- [46] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 李生宇, 范敬龙, 彭慧清. 流沙区不同立地条件下防护林土壤微生物多样性分析. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1430-1436.
- [47] 吕瑞恒, 李国雷, 刘勇, 贾黎明, 江萍, 林娜. 不同立地条件下华北落叶松凋落物的分解特性. *林业科学*, 2012, 48(2): 31-37.