

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.22185

肖集泓, 张琳婷, 王春晓, 赖敏英, 熊宽洪, 温清燕, 邓传远. 琅岐岛 3 类森林群落的最小取样面积研究[J]. 植物科学学报, 2023, 41(3): 279-290

Xiao JH, Zhang LT, Wang CX, Lai MY, Xiong KH, Wen QY, Deng CY. Minimum sample area of three forest communities in Langqi Island[J]. *Plant Science Journal*, 2023, 41(3): 279-290

琅岐岛 3 类森林群落的最小取样面积研究

肖集泓¹, 张琳婷², 王春晓¹, 赖敏英¹, 熊宽洪¹, 温清燕¹, 邓传远^{1*}

(1. 福建农林大学园林学院, 福州 350002; 2. 自然资源部海岛研究中心, 福建平潭 350400)

摘要: 为科学设定琅岐岛森林群落物种多样性调查的最小面积, 提高研究结果的准确性和节约调查成本, 本研究在福州市琅岐岛采用巢式样方法开展海岛森林群落的种-面积曲线调查, 设置 20 m × 20 m 的样方, 选择对数函数、幂函数和逻辑斯蒂 3 种模型分别拟合 3 种类型森林群落, 即台湾相思 (*Acacia confusa* Merr.)、柠檬桉 (*Eucalyptus citriodora* Hook. f.) 和朴树 (*Celtis sinensis* Pers.) 林, 及其灌木层、草本层共 3 个对象的种-面积关系, 利用赤池信息准则 (AIC) 选择出最优拟合模型计算 3 类群落 3 个对象最小取样面积。结果显示: (1) 3 类森林群落 3 个对象的种-面积关系的最优拟合模型都是幂函数拟合模型。(2) 在满足精度为 50% ~ 90% 时, 台湾相思林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为 113.5、68.9 和 24.4 m²; 柠檬桉林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为 153.1、69.6 和 41.4 m²; 朴树林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为 65.5、38 和 15.2 m²。(3) 可将琅岐岛森林群落的最小取样面积设置为 10 m × 15 m, 灌木层最小取样面积设置为 10 m × 10 m, 草本层最小取样面积设置为 6 m × 6 m。(4) 最小样方面积与群落物种数量存在一定的正相关性, 还会受群落差异、取样面积、人为干扰、偶见种等因素的影响。

关键词: 琅岐岛; 台湾相思林; 柠檬桉林; 朴树林; 最小取样面积

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2023)03-0279-12

Minimum sample area of three forest communities in Langqi Island

Xiao Ji-Hong¹, Zhang Lin-Ting², Wang Chun-Xiao¹, Lai Min-Ying¹, Xiong Kuan-Hong¹, Wen Qing-Yan¹, Deng Chuan-Yuan^{1*}

(1. College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Island Research Center of Ministry of Natural Resources, Pingtan, Fujian 350400, China)

Abstract: This study aimed to establish the minimum area required for surveys of species diversity in forest communities in Langqi Island, Fuzhou, to improve research accuracy and reduce survey costs. Nest sampling of 20 m × 20 m quadrats was employed to investigate species-area curves of forest communities on the island. Three models (logarithmic function, power function, and logistic function) were selected to fit three types of forest communities, namely *Acacia confusa* Merr., *Eucalyptus citriodora* Hook. f., and *Celtis sinensis* Pers., as well as the species-area relationships of the shrub and herb layers. The optimal fitting model was selected using the Akaike Information Criterion (AIC) to calculate the minimum sampling area for the three species in the three communities. Results showed that: (1) Power function fit models were the best fitting models for the

收稿日期: 2022-09-30, 修回日期: 2022-10-30。

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (201505009); 福建省区域发展科技项目 (2018Y3006); 福建农林大学科技创新专项基金 (CXZX2019086)。

This work was supported by grants from the Special Fund Project for Scientific Research of Marine Public Welfare Industry (201505009), Science and Technology Project Plan for Regional Development of Fujian (2018Y3006), and Special Fund Project for Science and Technology Innovation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2019086).

作者简介: 肖集泓 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海岛植物资源与海岛生态优化 (Email: 1462148878@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: dengchuan yuan@fafu.edu.cn)。

species-area relationships of the three target species in the three forest communities. (2) The minimum sampling areas for the *A. confusa* community, shrub layer, and herb layer were 113.5, 68.9, and 24.4 m², respectively, when sampling precision was set to 50%–90%. The minimum sampling areas for the *E. citriodora* community, shrub layer, and herb layer were 153.1, 69.6, and 41.4 m², respectively. The minimum sampling areas for the *C. sinensis* community, shrub layer, and herb layer were 65.5, 38.0, and 15.2 m², respectively. (3) The minimum sampling areas for the forest community, shrub layer, and herb layer in Langqi Island were 10 m × 15 m, 10 m × 10 m, and 6 m × 6 m, respectively. (4) A positive correlation was found between the minimum sampling area and number of species in the community, which was also influenced by community differences, sampling area, human disturbance, occasional species, and other factors.

Key words: Langqi Island; *Acacia confusa* forest; *Eucalyptus citriodora* forest; *Celtis sinensis* forest; Minimum sample area

植物群落中物种数目随样地面积的增加而增加,这已经成为“植物群落生态学中的定律之一”^[1]。随着取样面积的扩大,样方内的种类也随之增加,最初增长很快,以后逐渐缓慢,形成一条曲线,叫做种-面积曲线 (Species-area curve)^[2]。对野外调查获得的种-面积数据进行曲线模型拟合,还可以进一步确定植物群落物种多样性调查的最小取样面积^[3]。最小面积是反映群落种类组成和结构特征的最小地段^[4]。最小取样面积的确认有助于制定合理的最小取样面积,同时可以降低昂贵的调查成本,对生态学研究具有重要的意义。最常用的 3 类种-面积关系拟合模型为对数函数模型 (Logarithmic function)、幂函数模型 (Power function) 和逻辑斯蒂模型 (Logistic function)^[5-9]。Scheiner^[10]发现种-面积关系的构建方式包括组合样方法、巢式样方法和隔离生境。众多研究表明,不同群落所需的最小取样面积明显不同^[11-13]。不同群落的灌、草层会受到不同乔木层特征差异的影响,因此在研究中,不同学者也习惯将一个群落分为乔、灌、草 3 层 (或者更多) 分别进行拟合^[14-17]。

海岛由于受风害的干扰,以及自身土壤的贫瘠性,生态环境十分的敏感和脆弱。国内学者对海岛森林的群落特征、多样性、碳储量等方面做了许多的研究^[18-20],部分学者研究了物种数和岛屿面积的关系,如王金旺等^[21]对温州沿海 20 个小型无居民海岛进行了种-面积关系拟合,结果表明种-面积关系不存在小岛屿效应,岛屿植物物种丰富度主要受面积影响,但又不总是由岛屿面积决定。肖兰等^[22]对厦门无居民海岛植物物种数和海岛面积关系进行了研究,结果表明物种丰富度受海岛

面积的影响较大,与海岛面积存在显著的对数和幂函数关系。上述研究是针对海岛总物种数和海岛总面积的关系,其并未研究物种数随着面积扩大而在该岛屿上发生的变化情况,目前也未见针对不同群落在海岛上的种-面积关系和最小取样面积的相关报道。福州市计划将琅岐岛建设成为生态旅游岛,但琅岐岛土壤十分贫瘠,渗漏性强,保蓄力弱,养分含量甚低,同时风沙灾害频发,植物的生存环境恶劣^[23]。且随着海岛的不断开发与建设,特别是海岛人工林的建设,亟待研究不同群落的物种组成和多样性特征等相关数据,为生态建设提供参考。海岛与内陆环境存在较大差异,目前内陆森林相关报道对海岛森林相关研究的借鉴意义不大,而通过对琅岐岛主要森林群落种-面积关系进行分析,能给琅岐岛未来的开发建设提供一定的参考。

种-面积曲线只考虑物种种类的增加,受各种因素的影响,在实际工作中能代表整个群落组成结构特征的最小面积几乎不存在,只能尽量增加取样面积以减小误差,但是这又会导致工作成本的增加。此前植物多样性的调查大多是根据经验值确定调查样方的面积,比如常用的亚热带森林为 20 m × 20 m^[24]。这种根据经验来设定样方面积,并不完全适用于所有群落调查。因为在研究一个群落时,对该群落进行全部调查会浪费大量的调查成本且难以实现。因此,从植物的保护、修复和海岛开发和利用等角度综合考虑,对琅岐岛不同森林群落物种多样性调查的最小取样面积研究不仅对保护该地区的物种和生物多样性具有重要作用,同时也有利于以后学者在进行相关研究时

能选择适合的样方面积, 提高工作效率, 减少调研成本。

位于琅岐岛云龙村旁风成沙丘上的天然朴树 (*Celtis sinensis* Pers.) 林, 距今已有 400 多年历史; 而岛上的台湾相思 (*Acacia confusa* Merr.) 林和柠檬桉林 (*Eucalyptus citriodora* Hook. f.) 为 20 世纪飞机撒播造林或人工造林形成, 人为影响和干预较小, 属于半自然群落。3 类群落在当地占地面积和分布十分广泛, 是琅岐岛主要的组成树种, 本研究在综合分析琅岐岛这 3 类主要森林群落的实际情况后, 先根据亚热带森林经验取样 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 作为样地样方面积, 采用巢式样方法^[25]进行 3 类森林群落的种-面积曲线调查。利用 3 种模型分别拟合整体群落、灌木 (包括木质藤本及胸径 $\leq 3\text{ cm}$ 且树高 $\leq 3\text{ m}$ 的乔木幼树) 和草本 (包括草质藤本和蕨类) 3 层的方程 (由于海岛群落乔木层种类较少, 因此不单独分析), 并通过拟合优度检验, 筛选最优方程, 利用不同估测精度要求和拐点法进行最小取样面积的计算, 得到相应的最小取样面积, 以期后续琅岐岛的森林多样性调查研究提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福州琅岐岛位于闽江入海口, 全岛总面积约 92 km^2 , 其中陆地面积约 55 km^2 (平原约 36.5 km^2 , 山地约 18.5 km^2), 全岛森林覆盖率达 20%。岛东西长约 15.3 km , 南北宽约 8.1 km 。岛上土壤盐渍化严重, 风沙灾害频发, 植物的生存环境恶劣, 岛上主要优势树种包括木麻黄 (*Casuarina equisetifolia* L.)、台湾相思、柠檬桉、朴树和高山榕 (*Ficus altissima* Blume)^[26]。经现场调研发现, 琅岐岛上台湾相思、柠檬桉、朴树 3 种森林群落呈片状、块状分布; 木麻黄林作为沿海地区防护林, 基本为带状分布, 且基本为幼、中林龄; 高山榕多为混交或分布于人工群落。

1.2 取样方法

本研究基于海岛地形、地图影像、森林群落分布及可达性等因素, 采用典型取样法, 在干扰小, 距离林缘大于 30 m , 林龄达成熟林的区域选

择具有代表性的群落。本研究选择了台湾相思林、柠檬桉林、朴树林共 3 类森林群落的 18 个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样地, 每个样地 4 次重复 (即从 4 个角分别扩大面积记录物种数, 并取平均值进行计算), 则共计 72 个 (每种森林群落 24 个) $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样方。其中朴树林由于集中分布在云龙村旁, 因此 6 个样地均位于此, 海拔为 $11.09 \sim 35.27\text{ m}$, 坡度为 $16^\circ \sim 37^\circ$, 该样地占整个琅岐岛朴树林面积 80% 左右, 台湾相思林和柠檬桉林则分散于琅岐岛各处 (表 1, 附表 1¹⁾)。每个样地植物丰富、生长均匀、郁闭度高于 0.75, 且面积满足 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的森林群落进行种-面积调查。野外调查方法为相邻样方格子法^[27], 在每个样方左上角开始, 以 1 m 为间隔纵横拉线, 于是 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的大样方就被分割为包含 400 个方格的网格样方, 每个网格样方面积为 1 m^2 ^[28], 方便后续记录, 再按照巢式样方法开展物种丰富度的调查, 即在样地的 4 个角的第一个 1 m^2 小样方作为第一个面积梯度, 然后逐步扩大调查样方面积, 记录每个样方内新出现的物种名称、生活类型, 直至覆盖整个样地^[25]。本研究的群落中, 首先设置 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方为 1, 作为第一个调查样方; 将 1、2 合并, 作为第二个调查样方; 1、2、3 合并……; 则整体森林群落的调查样方面积依次为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、 $2\text{ m} \times 4\text{ m}$ 、……、 $8\text{ m} \times 16\text{ m}$ 、 $16\text{ m} \times 16\text{ m}$ 、 $16\text{ m} \times 20\text{ m}$ 、 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ (即每个样方 11 个面积梯度, 扩大方式如图 1 所示)。

1.3 拟合模型及对应的最小取样面积方程

本研究统计 3 类森林共 18 个样地、72 个样方中, 整体群落、灌木层和草本层 3 个对象分别在每个样方中的 11 个面积梯度的平均物种总数、平均灌木总数、平均草本总数的数据 (每种森林类型 3 组, 共 9 组数据), 选择巢式样方法最常用的 3 个种-面积拟合模型及其对应的最小取样面积方程进行函数模型的拟合及相关计算 (表 2)。

1.4 种-面积关系拟合优度评价及最小取样面积确定

采用最小二乘法对对数模型进行检验, 用高斯牛顿算法对幂函数模型及逻辑斯蒂模型进行检

1) 如需查阅附件内容请登录《植物科学学报》网站(<http://www.plantscience.cn>)查看本期文章。

表 1 样地基础信息
Table 1 Basic information of sample plots

样地号 Sample plot number	海拔 Altitude / m	坡向 Aspect / °	坡度 Slope / °	总物种数量 Total number of species	总灌木数量 Total number of shrubs	总草本数量 Total number of herbs
台湾相思 <i>Acacia confusa</i> Merr.	1	15.11	西北 NW287	12	24	14
	2	10.37	西北 NW312	25	59	36
	3	158.57	西南 SW244	34	67	46
	4	118.76	东北 NE20	29	78	46
	5	31.57	东南 SE158	16	57	37
	6	14.39	东南 SE144	27	43	28
柠檬桉 <i>Eucalyptus citriodora</i> Hook. f.	1	18.14	西南 SW220	10	51	27
	2	5.67	西南 SW259	23	69	40
	3	78.40	西南 SW206	34	82	52
	4	61.34	西 W279	15	58	25
	5	24.10	东南 SE169	11	42	20
	6	103.89	东北 NE68	31	74	50
朴树 <i>Celtis sinensis</i> Pers.	1	35.27	南 S188	37	43	30
	2	25.43	东南 SE143	25	41	25
	3	25.43	东南 SE130	22	32	22
	4	25.43	西 W270	30	48	31
	5	25.43	西南 SW244	33	30	17
	6	11.09	东南 SE162	35	30	20

表 2 巢式样方法常用的种-面积关系拟合模型
Table 2 Common species-area relationship fitting models used in nested sampling method

函数 Function	种-面积拟合函数模型 Species-area fitting function model	最小取样面积方程 Minimum sampling area equation
对数	(1) $S=a+b\ln A$	(4) $A=\exp[(\rho S_t-a)/b]$
幂函数	(2) $S=aA^b$	(5) $A=(\rho S_t/a)^{1/b}$
逻辑斯蒂	(3) $S=c/(1+ae^{-bA})$	(6) $A=-[\ln(c/\rho S_t-1)/a]/b$

注: A 表示样地面积; S 表示对应样地的物种数目; a、b、c 为待估参数; S_t 表示调查群落物种总数; ρ 表示期望物种与总物种的比例。

Notes: A represents sample plot area; S represents number of species in the corresponding sample plot; a, b, and c are parameters to be estimated; S_t represents total number of species in the surveyed community; ρ represents the ratio of expected species to total species.

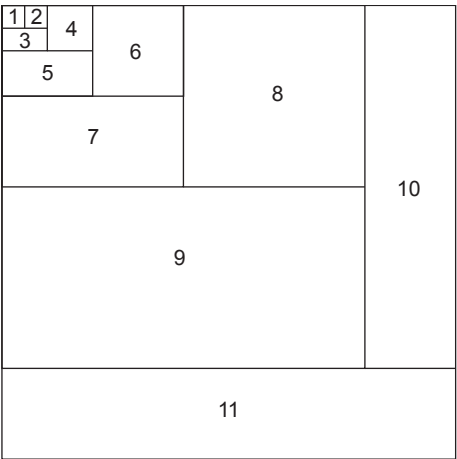


图 1 巢式样方法合并扩大示意图

Fig. 1 Schematic of nested method of merging expansion

巢氏样方面积是按照 2 倍增加扩散, 直至覆盖全部样方。1 代表巢式样方法的第 1 个取样面积, 面积为 1 m × 1 m; 1 和 2 合并后代表巢式样方法的第 2 个取样面积, 面积为 1 m × 2 m; 1、2 和 3 合并后代表巢式样方法的第 3 个取样面积, 面积为 2 m × 2 m; ……; 1~11 合并后代表巢式样方法的第 11 个取样面积, 面积为 20 m × 20 m。

1 Sampling area of the nested sample is increased by two times until it covers all samples. 1 represents the first sampling area of the nested sampling method, with an area of 1 m × 1 m. Combination of 1 and 2 represent the second sampling area of the nested sampling method, with an area of 1 m × 2 m. Combination of 1, 2, and 3 represent the third sampling area of the nested sampling method, with an area of 2 m × 2 m……; combination of 1–11 represents the 11th sampling area of the nested sampling method, with an area of 20 m × 20 m.

验^[5]。采用赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 对 3 种模型的拟合优度进行评价^[29]。AIC 数值越小, 模型拟合越好, 预测值越准确。

本研究用两种方法结合分析最小样方面积。Archibald^[30] 研究发现, 在占群落总物种数 50% 对应的面积上常见种就总是出现, 因此将这个面积定义为群落最小面积。因此本研究选择 5 种不同的估测精度 (50%、60%、70%、80% 和 90%) 分别计算 3 类海岛森林群落 3 个对象的样方面积, 并分析要得到群落总数一定比例 (不同精度) 的

物种数所需最小面积差异^[25, 31, 32]。同时基于最优模型采用拐点法计算最小调查取样面积^[3, 32-34]。本研究拐点的具体步骤为：计算最优拟合模型的一阶导数，将不同精度下的最小取样面积 A 带入一阶导数，得到面积对应曲线的斜率；参考已有研究的做法，以曲线斜率 < 0.1 作为识别拐点的标准^[32, 34]，进而确定最小取样面积。

本研究的数据分析中，逻辑斯蒂函数中的 c 值是利用 Mathematica 12.2 软件编程处理获得^[35]，AIC 值是通过 R 3.5.1 软件编程计算，其他所有数据分析、作图采用 R 3.5.1、SPSS 23、Excel 2019 软件完成。

2 结果与分析

2.1 研究地样方物种组成

本研究根据 18 个样地的调查结果，共记录物种数为 219 种，隶属于 80 科 174 属。其中禾本科植物种类最多，为 16 种，占总数的 7.31%；其次为豆科 14 种，占总数的 6.39%；菊科 13 种，占总数的 5.94%（图 2）。按照《中国植物志》和《福建植物志》的描述进行生活型分类，调查的 18 个样地中，乔木植物占比极小，共 12 种（占比 5.29%），主要有台湾相思、朴树和柠檬桉；灌木 101 种（占比 44.49%），主要有马缨丹（*Lantana camara* L.）、杠香藤（*Mallotus repandus* var. *Chrysocarpus* (Pamp.) S. M. Hwang）、蓬蘽（*Rubus hirsutus* Thunb.）和福建胡颓子（*Elaeagnus oldhamii* Maximowicz）等；草本植物 96 种（占比 42.29%），主要有荩草（*Arthraxon hispidus* (Trin.) Makino）、求米草（*Oplismenus undulatifolius* (Arduino) Beauv.）、积雪草（*Centella asiatica* (L.) Urban）和火炭母（*Polygonum chinense* (L.) H. Gross）等；藤本植物 18 种（占比 7.93%），主要有细圆藤（*Pericampylus glaucus* (Lam.) Merr.）、山葛（*Pueraria montana* (Loureiro) Merrill）和匙羹藤（*Gymnema sylvestre* (Retz.) Schult.）（图 3）。台湾相思群落平均每个样方物种数为 54.7 种、灌木 34.5 种和草本 19.7 种；柠檬桉群落平均每个样方物种数有 62.7 种、灌木 35.7 种和草本 25.7 种；朴树群落平均每个样方物种数有 37.3 种、灌木 24.2 种和草本 13.2 种。

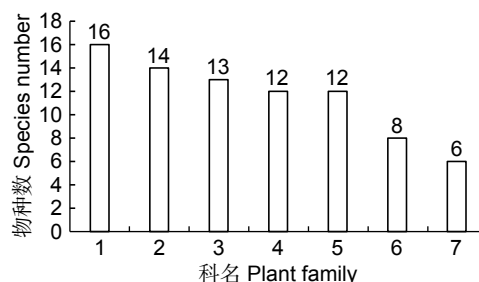


图2 主要科的物种数

Fig. 2 Number of species in major families

1: 禾本科; 2: 豆科; 3: 菊科; 4: 大戟科; 5: 蔷薇科; 6: 百合科; 7: 马鞭草科。

1: Gramineae; 2: Fabaceae; 3: Asteraceae; 4: Euphorbiaceae; 5: Rosaceae; 6: Liliaceae; 7: Verbenaceae.

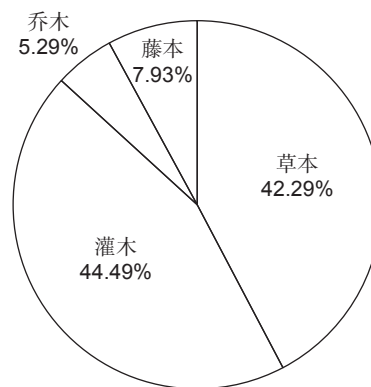


图3 不同生活型的物种数比例

Fig. 3 Proportion of species in different life types

2.2 各群落3个对象植物种-面积关系的最优拟合模型

利用3类海岛森林群落的野外调查数据对函数（1）~（3）进行拟合，求解得到相应的种-面积曲线方程的参数，从 R^2 ($R^2 > 0.9$, $P < 0.01$) 发现3类海岛森林群落3个对象植物的种-面积关系都符合3种拟合函数模型（表3、图4、图5），进一步通过赤池信息准则（AIC）对3种函数模型的拟合优度进行评价，从而可以确定相应的最优种-面积曲线（表3）。3类森林群落整体的幂函数模型拟合效果最好（AIC值分别为-24.429、-36.845、-37.642），其次是逻辑斯蒂函数模型，对数函数模型的拟合效果最差；3类森林群落最优拟合结果的种-面积曲线见图4。3类森林群落灌木层（包括木质藤本）的幂函数模型拟合效果最好（AIC值分别为-19.093、-25.709、-39.172），其次是逻辑斯蒂函数模型，对数函数模型的拟合效果最差；3类森林群落灌木层最优拟合结果的种-

表 3 种-面积关系拟合结果
Table 3 Fitting results of species-area relationship

研究对象 Object of study	森林类型 Forest type	函数 Function	参数 Parameter			R^2	P	AIC
			a	b	c			
群落整体	台湾相思林	(1)	7.415	7.715	—	0.982	<0.01	53.716
		(2)	11.813	0.269	—	0.988	<0.01	-24.429
		(3)	0.034	0.986	55.00	0.938	<0.01	21.460
	柠檬桉林	(1)	4.264	9.295	—	0.964	<0.01	65.706
		(2)	10.642	0.307	—	0.997	<0.01	-36.845
		(3)	0.420	0.984	62.92	0.973	<0.01	15.505
	朴树林	(1)	4.521	5.204	—	0.973	<0.01	49.605
		(2)	7.774	0.271	—	0.996	<0.01	-37.642
		(3)	0.056	0.986	37.51	0.964	<0.01	15.897
灌木层	台湾相思林	(1)	2.511	5.188	—	0.978	<0.01	47.294
		(2)	5.804	0.314	—	0.985	<0.01	-19.093
		(3)	0.068	0.986	34.68	0.929	<0.01	24.050
	柠檬桉林	(1)	2.614	5.316	—	0.972	<0.01	50.547
		(2)	6.069	0.309	—	0.992	<0.01	-25.709
		(3)	0.072	0.984	35.82	0.968	<0.01	17.431
	朴树林	(1)	1.467	3.573	—	0.958	<0.01	46.131
		(2)	3.992	0.309	—	0.997	<0.01	-37.172
		(3)	0.111	0.985	24.34	0.962	<0.01	17.406
草本层	台湾相思林	(1)	5.043	2.444	—	0.989	<0.01	22.917
		(2)	6.121	0.206	—	0.983	<0.01	-26.498
		(3)	0.063	0.986	19.78	0.953	<0.01	18.018
	柠檬桉林	(1)	1.764	3.789	—	0.958	<0.01	47.513
		(2)	4.427	0.302	—	0.997	<0.01	-38.749
		(3)	0.102	0.985	25.82	0.975	<0.01	13.579
	朴树林	(1)	2.873	1.713	—	0.990	<0.01	14.059
		(2)	3.712	0.223	—	0.990	<0.01	-30.644
		(3)	0.110	0.985	13.24	0.968	<0.01	15.682

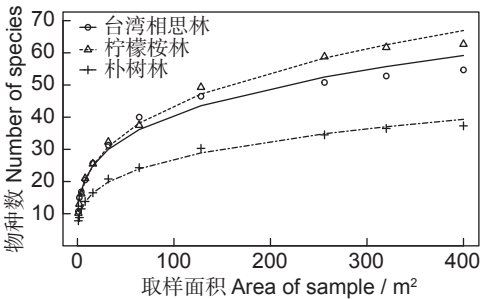


图 4 群落整体种-面积曲线最优拟合结果
Fig. 4 Best fitting results of species-area curve of the whole community

面积曲线见图 5。3 类森林群落草本层（包括草质藤本和蕨类）的幂函数模型拟合效果最好（AIC 值分别为-26.498、-38.749、-30.644），其次是逻辑斯蒂函数模型，对数函数模型的拟合效果最差

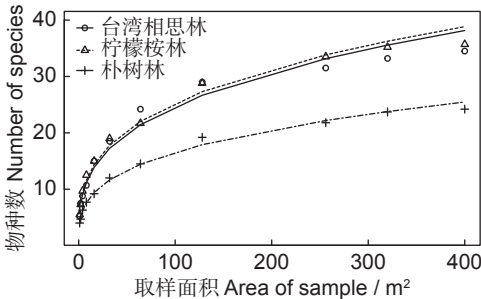


图 5 灌木层种-面积曲线最优拟合结果
Fig. 5 Best fitting results of species-area curve of the shrub layer

（朴树的草本层对数函数较逻辑斯蒂函数模型拟合效果稍好）；3 类森林群落草本层最优拟合结果的种-面积曲线见图 6。因此，台湾相思林、柠檬桉林、朴树林的种-面积关系最优拟合模型分别为：

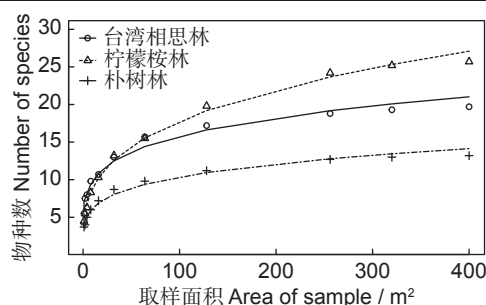


图6 草本层种-面积曲线最优拟合结果

Fig. 6 Best fitting results of species-area curve of the herb layer

$S_{\text{台}}=11.813A^{0.269}$ 、 $S_{\text{柠}}=10.642A^{0.307}$ 、 $S_{\text{朴}}=7.774A^{0.271}$;
灌木层的种-面积关系最优拟合模型分别为:
 $S_{\text{台灌}}=5.804A^{0.314}$ 、 $S_{\text{柠灌}}=6.069A^{0.309}$ 、 $S_{\text{朴灌}}=3.992A^{0.309}$;
草本层的种-面积关系最优拟合模型分别为:
 $S_{\text{台草}}=6.121A^{0.206}$ 、 $S_{\text{柠草}}=4.427A^{0.302}$ 、 $S_{\text{朴草}}=3.712A^{0.223}$ 。

从图4~图6的结果来看,随着样方的面积扩大,样方内的植物种类也随之增加,最初增长很快,以后逐渐缓慢,取样面积从300~400 m²物种数量增加量很小或几乎不再增加。图中的拟合曲线均比较靠近实践观测物种数量点,但图6中台湾相思群落灌木层种-面积拟合曲线与实际观测物种数量点拟合距离偏差较大,可能是因为琅岐岛台湾相思群落灌木层植物种类相对丰富。

2.3 基于最优模型的各群落3个对象物种多样性调查最小取样面积

选择拟合优度最好的幂函数的种-面积曲线拟合函数模型(2)所对应的最小取样面积方程(5)进行物种多样性调查的最小取样面积计算(表2)。因此,台湾相思林、柠檬桉林、朴树林的最小取样面积方程分别为: $A_{\text{台}}=(54.7\rho/11.813)^{1/0.269}$ 、 $A_{\text{柠}}=(62.7\rho/10.642)^{1/0.307}$ 、 $A_{\text{朴}}=(37.3\rho/7.774)^{1/0.271}$;灌木层的最小取样面积方程分别为: $A_{\text{台灌}}=(34.5\rho/5.804)^{1/0.314}$ 、 $A_{\text{柠灌}}=(35.7\rho/6.069)^{1/0.309}$ 、 $A_{\text{朴灌}}=(24.2\rho/3.992)^{1/0.309}$;草本层的最小取样面积方程分别为: $A_{\text{台草}}=(19.7\rho/6.121)^{1/0.206}$ 、 $A_{\text{柠草}}=(25.7\rho/4.427)^{1/0.302}$ 、 $A_{\text{朴草}}=(13.2\rho/3.712)^{1/0.223}$ 。

选择5种不同的估测精度计算3类海岛森林群落的取样面积。由表4可知,随着估测精度的增加,台湾相思林、桉树林、朴树林物种多样性调查的取样面积逐渐扩大,对应的种-面积曲线斜率逐渐减小。根据拐点法,在满足精度为60%~

90%的前提下,台湾相思林群落从精度70%~80%时,曲线斜率由0.108变为0.09,即在精度为80%时,曲线斜率 $0.09 < 0.1$,则台湾相思林调查的最小取样面积在79.2~130.1 m²;当取样精度为50%和60%时,此时的曲线斜率较大,且最小取样面积22.7和44.6 m²与实际明显不符。同理,台湾相思林灌木层、草本层的最小取样面积分别为57.4~93.7 m²(精度60%~70%)和24.4~51.6 m²(精度60%~70%);柠檬桉林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为100.6~155.6 m²(精度70%~80%)、59.2~97.5 m²(精度60%~70%)和34.1~62.3 m²(精度50%~60%);朴树林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为49.5~87.4 m²(精度60%~70%)、36.2~65.3 m²(精度50%~60%)和13.2~29.9 m²(精度50%~60%),可以将这些面积当作最小取样面积区间。

当斜率为0.1时(具体拐点),台湾相思林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为113.5、68.9和24.4 m²,此时拟合曲线对应物种数分别为42.2、21.9和11.8,实际调查平均物种数分别为40.0~46.5、24.2~29.0和10.7~13.0;斜率为0.1时的柠檬桉林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为153.1、69.6和41.4 m²,此时拟合曲线对应物种数分别为49.9、22.5和13.6,实际调查平均物种数分别为49.3~58.8、21.7~28.8和13.2~15.5;斜率为0.1时的朴树林群落及其灌木层、草本层的最小取样面积分别为65.5、38和15.2 m²,此时拟合曲线对应物种数分别为24.1、12.3和6.8,实际调查平均物种数分别为24.3~30.3、12.0~14.5和6.0~7.2。可见,估测值与实际值均差别不大,表明曲线拟合程度较好,估测值与实际值均较为接近,因此可以将这些面积定义为最小取样面积(表5)。

3 讨论

3.1 种-面积关系最优拟合模型分析

本研究设置了统一面积20 m×20 m的调查样地来比较分析不同植物群落的种-面积关系和相应的最小取样面积。结果表明,对数函数模型、幂函数模型和逻辑斯蒂模型是比较适合巢式样方法的3种拟合曲线^[5-9]。如果仅从 R^2 大小判断拟合

表 4 不同精度下琅岐岛 3 类森林群落调查的取样面积
Table 4 Sample area of three forest communities in Langqi Island under different precision

研究对象 Object of study	森林类型 Forest type	不同估测精度 Different estimation precision									
		$\rho=0.5$		$\rho=0.6$		$\rho=0.7$		$\rho=0.8$		$\rho=0.9$	
		取样面积 Sampling area / m ²	曲线斜率 Slope of curve	取样面积 Sampling area / m ²	曲线斜率 Slope of curve	取样面积 Sampling area / m ²	曲线斜率 Slope of curve	取样面积 Sampling area / m ²	曲线斜率 Slope of curve	取样面积 Sampling area / m ²	曲线斜率 Slope of curve
群落整体	台湾相思林	22.7	0.324	44.6	0.198	79.2	0.130	130.1	0.090	201.5	0.066
	柠檬桉林	33.8	0.285	61.1	0.189	101.0	0.133	156.1	0.099	229.0	0.076
	朴树林	25.3	0.200	49.5	0.123	87.4	0.081	143.1	0.057	221	0.041
灌木层	台湾相思林	32.1	0.169	57.4	0.113	93.7	0.081	143.4	0.060	208.7	0.047
	柠檬桉林	32.8	0.168	59.2	0.112	97.5	0.079	150.3	0.059	220	0.045
	朴树林	36.2	0.103	65.3	0.069	107.5	0.049	165.6	0.036	242.5	0.028
草本层	台湾相思林	10.1	0.201	24.4	0.107	51.6	0.055	98.6	0.033	174.6	0.021
	柠檬桉林	34.1	0.114	62.3	0.075	103.8	0.052	161.6	0.038	238.6	0.029
	朴树林	13.2	0.111	29.9	0.059	59.7	0.035	108.7	0.022	184.3	0.014

表 5 斜率为 0.1 时的取样面积
Table 5 Sample area with a slope of 0.1

森林类型 Forest type	斜率为 0.1 时的面积 Area with a slope of 0.1 / m ²		
	森林群落 Forest community	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer
台湾相思林	113.5	68.9	24.4
柠檬桉林	153.1	69.6	41.1
朴树林	65.5	38.0	15.2

效果, 台湾相思林草本层最优拟合模型为对数函数, 朴树林草本层最优拟合模型为对数函数和幂函数。但从拟合优度检验的结果可知, 琅岐岛 3 类海岛森林群落 3 个对象的赤池信息准则 (AIC) 最小值皆为幂函数模型, 即 3 类森林群落 3 个对象的最优拟合模型都为幂函数。表明仅从 R^2 的大小并不能准确判别拟合优度的好坏, 还需要进一步的检验。最优模型为幂函数模型的原因可能是因为本研究选择样地面积都为 20 m × 20 m (400 m²) 的统一样地, 以及在样地中特意选择了植被丰富、植物生长均匀的地方进行数据取样。同时许多学者已经关注到了种-面积曲线对样地尺度是具有依赖性的, 如 Williams^[36] 发现小尺度时的种-面积关系比较符合指数函数模型, 中等尺度上的种-面积关系更符合幂函数模型, 大尺度上时则更符合逻辑斯蒂模型^[5, 6]。这很可能是因为样地面积 (400 m²)

属于中等尺度, 才会得到幂函数为最优拟合模型的结果。姜俊等^[37] 和向悟生等^[38] 在分别对北温带针阔混交林的研究和在喀斯特和非喀斯特两种不同质地背景森林的研究也得到了相似的结论。本研究在对琅岐岛 3 类森林群落种-面积关系拟合的结果与 Williams^[36] 和姜俊等^[37] 的研究结果一致, 均表明在中等尺度时, 幂函数模型的拟合效果最好。

3.2 琅岐岛 3 类森林群落最小取样面积分析

有研究利用不同方法来确定种-面积拟合后的最小取样面积。刘志兰等^[24] 以出现频率大于 1 的物种数占比 70.4% 作为取样精度来确定最小取样面积。法瑞学派常把包含总数 80% 的面积作为群落最小取样面积^[4]。有研究认为“最小面积是能包括 90% 以上群落物种的面积”^[39]。姜俊等^[37] 将种-面积曲线上斜率趋于稳定的那一点所对应的取样面积作为最小取样面积。杨利民等^[40] 将种-面积曲

线上取样面积增加10%,而植物物种数增加不超过5%的拐点所对应的取样面积作为最小取样面积。赵鸿怡等^[32]和任雪敏等^[14]分别在研究香格里拉两种典型高寒草甸植物和太白山几种植物群落时,采用的不同研究精度计算最小取样面积及使用一定精度范围内的拐点法计算最小取样面积。本研究亦采用不同估测精度计算琅岐岛3类海岛森林群落3个对象的取样面积,能比较全面地提供不同研究需求下的最小取样面积选择。同时结合拐点法能够得到一定精度范围内较为确定的最小取样面积数值,方便人们参考。

群落最小取样面积是由乔、灌、草3个对象共同决定,但统计结果表明海岛乔木层种类较少,因此在相同取样精度下,群落灌木层、草本层很可能已经决定了群落物种数总体分布趋势。海岛3类森林群落调查的最小取样面积,随着估测精度的增加,取样面积也不断地增大,对应的种-面积曲线斜率逐渐减小。海岛3类森林群落(台湾相思林、柠檬桉林、朴树林)3个对象,在相同取样面积中的物种数量不同,在相同精度下的最小样地面积不相同,精度提高时所增加的取样面积变化幅度也不一样。从拐点法求得的最小取样面积结果也显示,3种森林群落的最小取样面积不尽相同。其他学者的研究也表明,相同样地面积不同群落类型的物种数量不同^[41],不同群落所需的最小样地面积不同^[12, 42]。因此在研究海岛森林群落生物多样性时,有必要将不同的群落类型及分成不同层次进行区分,从而准确地调查海岛森林群落植物多样性。

根据拐点法分析结果,在满足50%~90%的精度下,平均物种总数(62.7)最多的柠檬桉林群落3个对象所需最小取样面积最大,平均物种总数(54.7)第2的台湾相思群落所需3个对象所需最小取样面积为第2,平均物种总数(37.3)最少的朴树林群落所需最小取样面积最小。可能与本研究在取样时选择植被生长均匀的样地有关,最小取样面积很可能随着物种数量的增多而增大,即最小取样面积跟群落物种数量存在一定的正相关性。而扬子松等^[43]的研究发现,如果两个群落的物种丰富度相差不大,最小取样面积不一定随着物种丰富度的增大而增大,因为最小面积在受到物种丰富度影响的同时也会受到物种均匀度的

影响。Keeley^[44]认为不同物种丰度分布引起的群落组织结构差异可能导致不同的种-面积曲线,进而影响最小取样面积。相同精度的情况下,平均物种总数(62.5)最多的柠檬桉林群落,所需的最小样地面积最大,但平均物种总数(37.3)最少的朴树林群落比平均物种总数(54.7)第2的台湾相思群落在相同精度下所需的最小样地面积更大,灌木层和草本层也有类似的结果。可能是由于本研究设置了统一面积的调查样地,但由于台湾相思的固氮能力能够改善土壤环境,使得琅岐岛台湾相思林实际群落丰富度大于本研究设置样方范围的丰富度,导致台湾相思群落的最小取样面积比实际值偏小。且相比于台湾相思林样方,位于云龙村的朴树林样方受人为影响稍大,群落中偶见种的数量可能较多,而种-面积曲线只考虑物种种类的增加,会夸大偶见种地位,进而导致朴树林群落最小取样面积增大。综上,最小取样面积会受各种因素的共同影响,如群落物种数量、群落差异、取样面积、人为干扰和偶见种等。

参考文献:

- [1] 张金屯. 数量生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011: 51-57.
- [2] Worthen WB. Community composition and nested-subset analyses: basic descriptors for community ecology[J]. *Oikos*, 1996, 76 (3): 417-426.
- [3] Dengler J, Matthews TJ, Steinbauer MJ, Wolfrum S, Boch S, et al. Species-area relationships in continuous vegetation: evidence from Palearctic grasslands[J]. *J Biogeogr*, 2020, 47 (1): 72-86.
- [4] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 35-39.
- [5] He FL, Legendre P. On species-area relations[J]. *Am Nat*, 1996, 148 (4): 719-737.
- [6] He FL, Legendre P. Species diversity patterns derived from species-area models[J]. *Ecology*, 2002, 83 (5): 1185-1198.
- [7] Schoereder JH, Galbiati C, Ribas CR, Sobrinho TG, Sperber CF, et al. Should we use proportional sampling for species-area studies?[J]. *J Biogeogr*, 2004, 31 (8): 1219-1226.
- [8] Tjørve E. Shapes and functions of species-area curves (II): a review of new models and parameterizations[J]. *J Biogeogr*, 2009, 36 (8): 1435-1445.

- [9] Williams MR, Lamont BB, Henstridge JD. Species-area functions revisited[J]. *J Biogeogr*, 2009, 36 (10): 1994–2004.
- [10] Scheiner SM. Six types of species-area curves[J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2003, 12 (6): 441–447.
- [11] 牛俊勇, 徐海量, 李吉玫, 杨红梅. 塔里木河下游荒漠河岸林群落最小取样面积[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1182–1187.
- Niu JY, Xu HL, Li JM, Yang HM. Minimum sampling area for desert riparian forest community in lower reaches of Tarim River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28 (6): 1182–1187.
- [12] Yu FH, Krüsi B, Schütz M, Schneller JJ, Wildi O. Plant communities affect the species–area relationship on *Carex sempervirens* tussocks[J]. *Flora*, 2008, 203 (3): 197–203.
- [13] Bonet A. Secondary succession of semi-arid Mediterranean old-fields in south-eastern Spain: insights for conservation and restoration of degraded lands[J]. *J Arid Environ*, 2004, 56 (2): 213–233.
- [14] 任学敏, 杨改河, 王得祥, 秦晓威, 刘振学, 等. 长白山几类植物群落灌木及草本层的最小取样面积研究[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(5): 1024–1031.
- Ren XM, Yang GH, Wang DX, Qin XW, Liu ZX, et al. Minimum sampling areas for shrub and herb layers of several types of plant communities in Taibai Mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31 (5): 1024–1031.
- [15] 王志高, 吴甘霖, 段仁燕, 张中信. 皖西多枝尖山区不同生活型植物种-面积关系研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(3): 91–94.
- Wang ZG, Wu GL, Duan RY, Zhang ZX. Relationships between different life form species and its possessive area in Duozhijian, Dabieshan mountain, west Anhui Province[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 44 (3): 91–94.
- [16] 苗莉云, 王孝安, 王志高. 太白红杉群落物种多样性与环境因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(10): 1888–1894.
- Miao LY, Wang XA, Wang ZG. Relationships between species diversity indices of *Larix chinensis* communities and environmental factors[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24 (10): 1888–1894.
- [17] 冯云, 马克明, 张育新, 祁建. 辽东栎林不同层植物沿海拔梯度分布的DCCA分析[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 568–573.
- Feng Y, Ma KM, Zhang YX, Qi J. DCCA analysis of plant species distributions in different strata of OAK (*Quercus liaotungensis*) forest along an altitudinal gradient in Dongling Mountain, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (3): 568–573.
- [18] 何雅琴, 曾纪毅, 陈国杰, 肖集泓, 邓传远. 福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(3): 759–769.
- He YQ, Zeng JY, Chen GJ, Xiao JH, Deng CY. Characteristics and species diversity of typical forest community in Dalian Island of Pingtan, Fujian, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28 (3): 759–769.
- [19] 郑丽婷, 苏田, 刘翔宇, 尹芳, 郭超, 等. 庙岛群岛典型植物群落物种、功能、结构多样性及其对环境因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 343–351.
- Zheng LT, Su T, Liu XY, Yin F, Guo C, et al. Species, functional, structural diversity of typical plant communities and their responses to environmental factors in Miao Archipelago, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (2): 343–351.
- [20] 石洪华, 王晓丽, 王媛, 刘振英, 麻德明. 北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6363–6372.
- Shi HH, Wang XL, Wang A, Liu ZY, Ma DM. Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (19): 6363–6372.
- [21] 王金旺, 魏馨, 陈秋夏, 李效文, 杨升. 温州沿海小型海岛植物丰富度和 β 多样性及其影响因子[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 523–540.
- Wang JW, Wei X, Chen QX, Li XW, Yang S. Factors affecting species richness and beta diversity of vascular plants on small islands in the Wenzhou region of Eastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (2): 523–540.
- [22] 肖兰, 张琳婷, 杨盛昌, 郑志翰, 姜德刚. 厦门近岸海域无居民海岛植物区系和物种组成相似性[J]. *生物多样性*, 2018, 26(11): 1212–1222.
- Xiao L, Zhang LT, Yang SC, Zheng ZH, Jiang DG. Flora and species composition similarity of the uninhabited islands in the nearshore Xiamen[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26 (11): 1212–1222.
- [23] 周国红. 福州琅岐岛的滨海沙丘植物群落[J]. *福建地理*, 2005, 20(1): 9–11.
- Zhou GH. Plant communities on coastal dune in Langqi Island, Fuzhou[J]. *Fujian Geography*, 2005, 20 (1):

- 9-11.
- [24] 刘志兰, 孙旭, 高君亮, 叶学华. 鄂尔多斯高原油蒿群落研究基本样方大小的确定[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 185-189.
- Liu ZL, Sun X, Gao JL, Ye XH. Determination of minimum sampling area for *Artemisia ordosica* community in Ordos Plateau, Inner Mongolia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3): 185-189.
- [25] 刘敏, 刘羽霞, 任可心, 阿尔孜古力, 魏向晨, 等. 种-面积曲线三种扩大样地面积的方法比较[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 60-63.
- Liu M, Liu YX, Ren KX, Arzigul, Wei XC, et al. Species-area curves of the three methods to expand comparative plot area[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 35(5): 60-63.
- [26] 张秀芳, 穆振北, 林美娇, 江森华, 巩嘉欣, 游巍斌. 琅岐岛4种优势植物叶功能性状及其影响因子[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 667-673.
- Zhang XF, Mu ZB, Lin MJ, Jiang MH, Gong JX, You WB. Functional traits of leaves of four dominant plants on Langqi Island, Fuzhou, and factors influencing these traits[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(3): 667-673.
- [27] 陈泓, 黎燕琼, 郑绍伟, 王玲, 何飞, 等. 岷江上游干旱河谷灌丛群落种-面积曲线的拟合及最小面积确定[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1818-1825.
- Chen H, Li YQ, Zheng SW, Wang L, He F, et al. Determination of species-area relationships and minimum sampling area for the shrub communities in arid valley in the upper reach of the Minjiang River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1818-1825.
- [28] 杨持, 宝荣. 羊草原种群分布格局的最适取样面积[J]. 生态学报, 1986, 6(4): 324-329.
- Yang C, Bao R. Optimum sampling area for the studies of distribution pattern in *Aneurolepidium chinensis* steppe community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1986, 6(4): 324-329.
- [29] Burnham KP, Anderson DR. Model Selection and Multi-model Inference: A Practical Information-Theoretic Approach[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002: 927-936.
- [30] Archibald EEA. The specific character of plant communities: II. A quantitative approach[J]. *J Ecol*, 1949, 37(2): 274-288.
- [31] 马淑琴, 康佳鹏, 薛正伟, 杨丽丽, 马盈盈, 韩路. 塔里木荒漠河岸林灰胡杨群落最小面积确定与研究方法比较[J]. 植物科学学报, 2017, 35(4): 494-502.
- Ma SQ, Kang JP, Xue ZW, Yang LL, Ma YY, Han L. Determination of the minimum sampling area for *Populus pruinosa* communities in desert riparian forest and comparison of research methods[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(4): 494-502.
- [32] 赵鸿怡, 崔媛, 郑秋竹, 杨娜, 张勇, 等. 香格里拉2种典型高寒草甸植物丰富度最小取样面积研究[J]. 西南林业大学学报, 2021, 41(1): 125-132.
- Zhao HY, Cui Y, Zheng QZ, Yang N, Zhang Y, et al. The minimum sampling size for estimating species richness of 2 types of typical alpine meadows in Shangri-La[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2021, 41(1): 125-132.
- [33] 张蕊, 陈军强, 侯尧宸, 马丽娜, 丁路明, 等. 亚高山草甸植物群落植物物种数与取样面积的关系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2268-2274.
- Zhang R, Chen JQ, Hou YC, Ma LN, Ding LM, et al. Relationships between plant species number and sampling area for sub-alpine meadow plant communities[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2268-2274.
- [34] 董世魁, 汤琳, 王学霞, 刘颖慧, 刘世梁, 等. 青藏高原高寒草地植物多样性测定的最小样地面积[J]. 生物多样性, 2013, 21(6): 651-657.
- Dong SK, Tang L, Wang XX, Liu YH, Liu SL, et al. Minimum plot size for estimating plant biodiversity of the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(6): 651-657.
- [35] 姜永, 李德新. Logistic方程的灰色建模法[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2004, 33(4): 535-537.
- Jiang Y, Li DX. The method of grey modeling for the equation of Logistic[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2004, 33(4): 535-537.
- [36] Williams CB. Area and number of species[J]. *Nature*, 1943, 152(3853): 264-267.
- [37] 姜俊, 张春雨, 赵秀海. 吉林蛟河42 hm²针阔混交林样地植物种-面积关系[J]. 植物生态学报, 2012, 36(1): 30-38.
- Jiang J, Zhang CY, Zhao XH. Plant species-area relationship in a 42-hm² research plot of coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohu, Jilin Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(1): 30-38.
- [38] 向悟生, 陆树华, 文淑均, 丁涛, 王斌, 等. 取样方式对喀斯特和非喀斯特混合分布区森林种-面积关系的影响[J]. 广西植物, 2015, 35(3): 309-316, 383.
- Xiang WS, Lu SH, Wen SJ, Ding T, Wang B, et al. Sample effects on species-area relationships of typical forests in karst and non-karst mixing distribution areas[J]. *Guihaia*,

- 2015, 35 (3): 309–316, 383.
- [39] Du Rietz GE. Zur methodologischen grundlage der modernen pflanzensociologie[D]. Uppsala: Uppsala University, 1921: 272S.
- [40] 杨利民, 韩梅, 赵淑春. 松嫩平原草地植物多样性取样强度的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 1996, 18(4): 33–36.
Yang LM, Han M, Zhao SC. Studies on sampling intensity of plant diversity of grassland communities in the Songnen Plain of China[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1996, 18(4): 33–36.
- [41] 刘灿然, 马克平, 于顺利, 王巍. 北京东灵山地区植物群落多样性研究: VII. 几种类型植物群落临界抽样面积的确定[J]. *生态学报*, 1998, 18(1): 15–23.
Liu CR, Ma KP, Yu SL, Wang W. Plant community diversity in Donglingshan Mountain, Beijing, China VII. The determination of critical sampling areas for several types of plant communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(1): 15–23.
- [42] Verburg PH, Overmars KP. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the dyna-CLUE model[J]. *Landsc Ecol*, 2009, 24(9): 1167–1181.
- [43] 杨子松, 黎云祥, 刘伟, 吴天德, 王中国. 岷江上游干旱河谷荒坡植物群落种-面积曲线拟合及最小面积确定[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(1): 227–230.
Yang ZS, Li YX, Liu W, Wu TD, Wang ZG. Fitting of species-area relationship and determination of minimum sampling area for plant communities on barren hillsides of arid valleys in the upper reaches of the Minjiang River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1): 227–230.
- [44] Keeley JE. Relating species abundance distributions to species-area curves in two Mediterranean-type shrublands[J]. *Divers Distrib*, 2003, 9(4): 253–259.

(责任编辑: 周媛)