

DOI: 10.5846/stxb201908141696

许洛山, 郑丽婷, 叶属峰, 刘翔宇, 阎恩荣. 中国东部 10 个海岛植被近自然度评价. 生态学报, 2021, 41(9): 3713-3723.

Xu M S, Zheng L T, Ye S F, Liu X Y, Yan E R. Evaluation of vegetation naturalness across 10 islands in eastern China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3713-3723.

中国东部 10 个海岛植被近自然度评价

许洛山¹, 郑丽婷¹, 叶属峰², 刘翔宇¹, 阎恩荣^{1,*}

¹ 华东师范大学, 生态与环境科学学院, 浙江普陀山森林生态系统定位观测研究站, 上海 200241

² 国家海洋局东海分局, 上海 200137

摘要: 植被近自然度评价是森林近自然恢复的重要理论基础。海岛因特殊的生物地理环境, 其植被结构和功能有别于陆地植被, 当前还未有从植物生理生态角度, 联合植物功能性状的海岛植被近自然度评价指标体系。基于中国东部 10 个典型海岛的 74 个植物群落, 以植被信息、土壤属性和多样性特征(物种和功能多样性)构建海岛植被近自然度评价指标体系。利用敏感性分析筛选出 13 个反映海岛植被近自然度的中、高敏感性指标, 基于筛选指标用层次分析法初次构建了中国东部海岛植被近自然度评价指标体系, 并计算典型海岛的植被近自然度综合指数和划定植被近自然度等级。结果显示: 海岛植被近自然度综合评价指标的权重: 植被信息 > 多样性特征 > 土壤属性, 其中植物自然构成系数、土壤含水量、Shannon-Wiener 指数、Rao 二次熵指数的权重较大; 典型海岛的植被近自然度综合指数在 0.345—0.611 间, 其中大金山岛的植被近自然度最高, 属半天然林, 北长山岛最低, 为近人工林, 其他海岛为远天然林; 中亚热带海岛植被近自然度较高, 暖温带和南亚热带海岛植被近自然度较低。本研究基于陆地植被近自然度评价指标, 联合植物功能多样性对我国东部海岛植被近自然度进行综合评价, 为海岛植被的生态状况提供定量依据, 以及为海岛植被保护与管理及近自然恢复提供理论支撑。

关键词: 层次分析法; 功能多样性; 海岛植被; 近自然度评价; 土壤属性; 物种多样性; 综合指数

Evaluation of vegetation naturalness across 10 islands in eastern China

XU Mingshan¹, ZHENG Liting¹, YE Shufeng², LIU Xiangyu¹, YAN Enrong^{1,*}

¹ Putuo Forest Ecosystem Research and Observation Station, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

² East China Sea Branch of State Oceanic Administration, Shanghai 200137, China

Abstract: Vegetation naturalness evaluation is an important theoretical basis of forest natural restoration. Due to the special geographical environment, islands vegetation is different from the mainland in structure and function. However, there is few studies on the island vegetation naturalness evaluation that combined plant functional trait. Based on the vegetation information, soil properties, and diversity characteristics (species and functional diversity) across 74 plant communities of 10 typical islands in eastern China. Thirteen indices with middle and high sensitivity of vegetation naturalness were selected, then the evaluation index system of island vegetation naturalness was constructed by using the analytic hierarchy process. The comprehensive index of vegetation naturalness was calculated and the levels of vegetation naturalness were divided for each island. Our results showed that the weights of vegetation naturalness indexes in the comprehensive evaluation system were vegetation information > diversity characteristics > soil properties, among which the best indexes are plant natural compose index, soil water content, plant Shannon-Weiner index, and Rao's index. Across 10 islands, the degree of vegetation naturalness was the highest on Da jinshan Island (0.611), representing the semi-natural forest, and the

基金项目: 国家自然科学基金(31770467, 31670438); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201505009); 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室 2020 年度开放基金(202002)

收稿日期: 2019-08-14; 网络出版日期: 2021-03-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

lowest in North Changshan Island (0.345), reflecting the semi-plantation. Among the climatic zones, the degree of vegetation naturalness was relatively lower in the islands of the warm temperate and southern subtropical regions than in those in the middle-subtropical region. The results not only used common indexes of mainland vegetation evaluation, but also combined plant functional diversity, which will help to provide quantitative evidence for the ecological status of island vegetation in eastern China, and also provides support for the island vegetation conservation management and natural restoration.

Key Words: analytic hierarchy process; functional diversity; island vegetation; naturalness evaluation; soil properties; species diversity; comprehensive index

植被近自然度指现实植被与潜在植被间的距离或相似程度^[1],是对特定条件下森林状态的评价,主要涉及土壤属性、植被组成、森林演替、群落结构、生物多样性、植物顶级适应性、森林生态功能等^[2-5]。当前陆地植被近自然度评价研究多集中于中小尺度的不同区域和植被类型间^[6-7]。海岛因面积小、隔离度高和特有种丰富,在维持全球植物群落类型和物种多样性方面扮演重要角色^[8]。此外,海岛兼备大陆和海洋双重特性,其植被既与邻近大陆有相似性,又具有特殊的植被类型、结构与功能^[9]。因此,现有的陆地植被近自然度评价指标体系不能完全运用于海岛植被,但目前还未有专门针对海岛植被的近自然度评价指标体系。随着城市化进程和海岛开发利用加剧,海岛植被遭到严重破坏,亟需构建海岛植被近自然度评价指标体系,为海岛植被保护与近自然恢复提供理论依据。

国内外陆地植被近自然度评价多是通过生态干扰度或演替阶段划分来确定近自然度等级^[10-12],指标有演替系列上林区面积、土壤特征、森林利用程度、乡土树种或外来树种所占比例、林内自然枯死木数量、树龄、物种多样性、天然更新以及森林功能等,评价方法有层次分析法、综合指数法、灰色关联度分析法、模糊评价模型^[13-15]。海岛植被近自然度评价指标体系应参照现有陆地植被近自然度评价体系,并结合海岛植被的特殊性来构建。因此,植被自然构成系数、群落结构、物种多样性以及土壤属性也是海岛植被近自然度评价的基本指标。此外,近年来,植物性状对植物群落结构和功能有直接或间接的影响或响应,而被广泛用于表征森林的结构与功能^[16-17]。de Bello 等发现功能多样性可用来评价和预测生态系统服务功能^[18],但当前还未有将植物功能多样性应用到植被近自然度评价的研究。

为了构建海岛植被近自然度评价指标体系和评价典型海岛的植被近自然度等级,本文测定中国东部 10 个海岛的植被信息、土壤属性和多样性特征,同时考虑植物功能多样性。旨在探究以下三个问题:(1) 海岛植被和大陆植被的近自然度评价指标体系有何差异?(2) 植物功能多样性能否反映海岛植被近自然度?(3) 中国东部海岛的植被近自然度格局如何? 针对植被近自然度等级,如何修复海岛植被? 该研究可为海岛植被保护与管理,以及近自然恢复提供理论基础。

1 研究区域概况

选取中国东部暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带区域的典型海岛:山东长岛三岛和江苏秦山岛;上海大金山岛和舟山群岛北缘的外马廊岛;浙江普陀山岛和洛迦山岛;福建大屿岛和烽火岛为研究对象(图 1)。典型海岛植被选择能代表该区域内广泛分布的植被类



图 1 研究海岛的地理位置

Fig.1 Geographical location of the selected islands

型,且林分发育完整,人为干扰小,海岛面积相差不大。研究区域地貌属低山丘陵,降雨量在 500—1500 mm 间,土壤类型为棕壤、黄壤、红壤。长岛列岛以针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林为主;大金山岛分布有常绿落叶阔叶混交林;舟山群岛是亚热带常绿阔叶林和落叶阔叶灌丛;福建海岛有针叶林和针阔混交林。优势种从北至南为黑松(*Pinus thunbergii*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、扁担杆(*Grewia biloba*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、红楠(*Machilus thunbergii*)、台湾相思(*Acacia confuse*)等(表 1)。文中所有植物物种名称均核对《中国植物志》^[19]。

2 材料与方法

2.1 植被调查

采用固定样地法调查选取海岛的植被,该方法能较全面地覆盖和定位植物群落,获得详细的群落组成和结构特征。具体在 2015 年 7 月—2017 年 11 月间,在对典型海岛植被全面踏查后,依据每个岛上每种植被类型或群落类型至少设置一个样地的原则,建立有代表性的植物群落样地。普陀山岛面积较大,群落类型较多,因而样地较多(表 1)。依据最小面积法则,森林样地面积为 20 m × 20 m,灌丛面积为 10 m × 10 m。详细记录样地内所有胸径 ≥ 1 cm 木本植物的物种名称、高度、基径、胸径、枝下高、叶下高、冠幅,以及样地的地形、地貌等,还测定了植物群落的结构和林分特征。每木调查到 74 个样地中的 11100 株木本植物。

2.2 土壤取样和指标测定

土壤属性是反映植被近自然度的重要指标^[5]。本研究选取土壤总碳(Total carbon, TC)、总氮(Total nitrogen, TN)、总磷(Total phosphorus, TP)和土壤含水率(Soil water content, SWC)。具体在森林样地中随机选取 5 个采样点,灌丛选取 3 个,用土铲将枯枝落叶层和腐殖质层去掉,挖 30 cm 深的土壤剖面,在 20 cm 深处,用环刀取出土样,装入带有编号的自封袋中。土样在 105 °C 下烘干 48 h,测定土壤含水率;同时在采样点用另一个带有编号的自封袋装 500 g 左右的土样,自然风干后研磨过 100 目筛,用德国 Elementar 化学元素分析仪测定土壤总碳;再取适量过筛土样,参照标准凯氏法在温控硝解炉(DK 42, VELP Scientifica, Milano, Italy)上硝解后,采用 Smartchem 200 全自动化学分析仪测定土壤总氮和总磷。

2.3 植物功能性状测定

植物功能性状的采集与测量参照《植物性状测量手册》^[21]。具体对样地内所有出现的木本植物随机选取 3 株健康个体(不足 3 株的在样地周围选取),分别在没有明显遮阴的林冠处,选择 3—5 个不同方位的枝条,摘取 20 片成熟叶,装进密封袋中带回实验室。称量鲜重后,用叶面积仪(Li-COR, USA, 3100C)测量叶面积,再装入信封放至 75 °C 烘箱至 48 h 后称量干重。计算单叶面积(Mean leaf area, MLA)、比叶面积(Specific leaf area, SLA, 叶片面积/叶片质量)、叶片干物质含量(Leaf dry matter content, LDMC, 叶片干重/叶片鲜重)。总计测定了 2012 株木本植物的叶片功能性状,隶属 130 个物种,46 科,69 属。

2.4 海岛植被近自然度评价指标

2.4.1 自然构成系数

自然构成系数可定量确定和描述群落的演替状态。依据 Curtis 和 McIntosh 提出的自然构成系数(Compose Index, CI)^[22],对不同海岛的植被群落进行演替状态排序。自然构成系数由群落中优势种的重要值与其顶级适应值(Climax adaptation Value, CAV)相乘得到,公式如下:

$$CI = CAV_i \times V_i \quad (1)$$

式中,CI 为林分顶级适应值, V_i 为各种组所占的重要值比例, CAV_i 为各种组的顶级适应值。顶级适应值是根据林分的演替特征将物种分为 5 个种组:先锋种、次先锋种、过渡种、次顶级种和顶级种,分别赋值 1、3、5、7、9。本文物种顶级适应值的确定源于已发表的文献^[5,23-27]、《中国植物志》^[19]、《中国海岛志》^[20]以及海岛植被相关资料和实际调查物种分布的广度等(表 2)。

表 1 研究海岛的基本信息

Table 1 Basic information of the selected islands

海岛名称 Islands	纬度 Latitude	经度 Longitude	面积/km ² Area	样地数/个 Plot number	海拔/m Highest elevation	离大陆最近距离/km Nearest distance to mainland	年均降雨量/mm Mean annual rainfall	植被覆盖率/% Vegetation coverage	林分密度/(株/m ²) Stand density	植被起源 Vegetation origin	优势植被类型 Dominant vegetation	优势物种 Dominant species
北长山岛 North chanshan Island	37°58.5'	120°28'	7.98	4	195.7	14.79	487	42	0.44	人工林	针阔混交林	刺槐、麻栎、荆条、黑松
南长山岛 South chanshan Island	37°55.0'	120°44.5'	13.21	4	156.1	6.7	498	44.8	0.54	人工林	针阔混交林	刺槐、麻栎、荆条、黑松
庙岛 Miao Island	37°56.3'	120°40.8'	1.43	4	98.3	1.43	502	46.92	0.50	人工林	针阔混交林	刺槐、麻栎、荆条、黑松
秦山岛 Qinshan Island	34°52.2'	119°16.8'	0.18	4	45	6.6	913	76.79	0.43	人工次生林	落叶阔叶林	扁担杆、刺槐、丝绵木
大金山岛 Da jinshan Island	30°41.5'	121°25.2'	0.23	5	103.4	6.2	1093	95.0	0.69	天然林	落叶阔叶混交林	青冈栎、丝绵木、天竺桂、野桐、朴树
外马廊岛 Wai malang Island	30°40'	122°28'	0.18	3	59.3	63.5	1024	75.3	0.56	次生灌丛	针阔落叶灌丛	黑松、麻栎、野桐
普陀山岛 Pu tuoshan Island	30°00.7'	122°23.2'	11.70	33	288.2	25.3	1226	79.9	0.68	天然林	常绿阔叶林	青冈栎、石栎、台湾蚊母树、樟
洛迦山岛 Luo jiashan Island	29°58.2'	122°26.7'	0.38	6	101.7	30.6	1266	82.2	0.71	天然林	常绿阔叶林	红楠、普陀樟、滨铃
烽火岛 Fenghuo Island	26°55'	120°15'	2.08	5	155.2	0.3	1419	85.3	0.32	人工次生林	针阔混交林	化香树、台湾相思
大屿岛 Dayu Island	25°27'	119°81'	0.22	6	45.1	6.3	1251	90.0	0.29	人工次生林	针阔混交林	黑松、台湾相思

年均降雨量来源于全球气候数据图层(Global Climate Data Version 2);植被覆盖率和植被起源等摘自《中国海岛志》^[20]

表 2 海岛优势植物种的顶级适应值

Table 2 Climax adaptation value of island dominant plant species

物种名称 Species name	顶级适应值 Climax adaptation value	物种名称 Species name	顶级适应值 Climax adaptation value
白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	7	赛山梅 <i>Styrax confusus</i>	1
豹皮樟 <i>Litsea coreana</i>	7	桑 <i>Morus alba</i>	1
扁担杆 <i>Grewia biloba</i>	9	珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i>	3
滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	9	石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	9
赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>	5	丝绵木 <i>Euonymus maackii</i>	7
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	3	四川山矾 <i>Symplocos lucida</i>	5
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	5	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i>	1
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	7	台湾蚊母树 <i>Distylium gracile</i>	9
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	5	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	5
海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	9	天仙果 <i>Ficus erecta</i>	5
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	5	樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	7
红楠 <i>Machilus thunbergii</i>	5	杨梅 <i>Myrica rubra</i>	3
红山茶 <i>Camellia longicaudata</i>	9	野桐 <i>Mallotus tenuifolius</i>	5
胡颓子 <i>Elaeagnus pungens</i>	7	柞木 <i>Xylosma congesta</i>	5
化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	5	柘木 <i>Cudrania tricuspidata</i>	7
黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	7	梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>	3
欒木 <i>Loropetalum chinense</i>	7	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	13
荆条 <i>Vitex negundo</i>	5	楸木 <i>Aralia chinensis</i>	5
柃木 <i>Eurya japonica</i>	5	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	3
罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i>	5	白栎 <i>Quercus fabri</i>	7
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	5	八角枫 <i>Alangium chinense</i>	3
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	3	水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	3
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	9	刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	7
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	5	赤皮青冈 <i>Cyclobalanopsis gilva</i>	9
普陀杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	3	黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	5
普陀樟 <i>Cinnamomum japonicum</i>	9	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	5
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	9	栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	3
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	1	苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	7
杨梅 <i>Myrica rubra</i>	5	山合欢 <i>Albizia kalkora</i>	3
野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	3	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	1

2.4.2 胸径级指数

植物群落的径级结构对群落稳定和演替有重要影响^[2,5]。本文按胸径 1—5、5—10、10—15、15—20、20—25、25—30、35—40、40—45、>45 cm 的等级,分别赋值为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10。胸径级指数等于每一胸径级所占比例与相应赋值的乘积。

2.4.3 多样性指数

(1) 物种多样性

物种丰富度:公式为:

$$S_A = S \quad (2)$$

式中, S 为样地内物种数。

平均密度:指单位面积上的植物个体数。公式为:

$$D = N/A \quad (3)$$

式中, D 为平均密度, N 为物种多度, A 为样地面积。

Shannon-Wiener 指数: 表示样方中总物种个体数及其单个物种分布的均匀程度, 其考虑了群落内物种的分散程度。公式为:

$$H = - \sum_i | n_i / N \lg(n_i / N) | \quad (4)$$

式中, n_i 代表第 i 种的个体数目, N 代表群落中所有个体数目。

Pielou 指数: 指群落的实测多样性与最大多样性(即物种数相同的情况下完全均匀群落的多样性)之比, 可检验群落水平的相似度。公式为:

$$J_h = H / \ln S \quad (5)$$

式中, H 指 Shannon-Wiener 指数, S 为物种总数。

(2) 功能多样性

功能多样性指特定生态系统中所有物种或某一群落内物种功能性状的数值和分布范围^[28]。功能多样性从物种功能性状的差异上反映植被的近自然程度, 测度指标有功能丰富度、功能均匀度、功能离散度、Rao 二次熵指数^[29], 文中用比叶面积计算植物群落的功能多样性。

功能丰富度: 是用凸包体积计算性状空间体积, 描绘包含所有性状的最小凸包。多维凸包是一个复杂的计算, 因此不列出公式。

功能离散度: 公式为:

$$FDvar = \frac{2}{\pi} \arctan \left[5 \times \sum_{i=1}^N [(\ln C_i - \ln x)] \times A_i \right] \quad (6)$$

式中, C_i 为第 i 项功能性状的数值, A_i 为第 i 项功能性状的相对丰富度, $\ln x$ 为物种性状值自然对数的加权平均(即以物种的多度为权重), N 为群落中的物种数。

功能均匀度: 公式为:

$$FEve = \sum_{i=1}^S \min(P_i, \frac{1}{S}) \quad (7)$$

式中, P_i 为种 i 的相对性状值, S 为物种数。

Rao 二次熵指数。公式为:

$$RAO = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S d_{ij} P_i P_j \quad (8)$$

式中, 群落中第 i 个和第 j 个物种的比例(相对丰富度)分别是 P_i 和 P_j , 物种 i 和物种 j 的功能性状距离是 d_{ij} , S 为群落的总物种数, d_{ij} 变化于 0 (两物种具有完全相同的性状) 与 1 (两物种具有完全不同的性状) 之间。本文的物种多样性指数和功能多样性指数分别在 R 3.6.1 (R Core Team 2019) 的 vegan 包和 FD 包中计算。

2.5 构建海岛植被近自然度评价指标体系

2.5.1 评价指标

海岛植被主要受气候、地理环境、土壤属性等影响, 因此海岛植被近自然度评价指标应尽可能涵盖所有与海岛植被相关的指标, 其选取一般遵循综合性、代表性、实用性和尺度性原则^[30]。本文选取植被信息(乔木层郁闭度、灌木层郁闭度、植被盖度、胸径级指数、自然构成系数)、土壤属性(土壤总碳、总磷、总氮、含水率和容重)和多样性特征(物种多样性: 平均密度、植物丰富度、植物 Shannon-Wiener 和植物 Pielou 指数; 功能多样性: 功能丰富度、功能均匀度、功能离散度以及 Rao 二次熵指数)为海岛植被近自然度综合评价指标。选取指标既考虑了植被近自然度的普遍指标, 又体现了海岛植被近自然度的特殊指标(海岛植被功能组分与功能型)。

2.5.2 评价指标筛选

反映海岛植被近自然度的指标很多, 但各指标对海岛植被近自然度敏感性差异很大。利用敏感性分析得到评价指标的变异系数(CV), 敏感性确定标准为: $CV < 10\%$, 不敏感; $10\% < CV < 30\%$, 低敏感; $30\% < CV < 60\%$,

中敏感; $CV>60\%$,高敏感^[30]。本研究筛选出中、高敏感性的指标建立海岛植被近自然度评价体系。

2.5.3 构建海岛植被近自然度评价指标体系

利用层次分析法构建海岛植被近自然度评价指标体系。由于原始数据量纲不统一,需进行标准化处理,克服参数间的不可比性。标准化公式如下:

$$S_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{9}$$

式中, S_i 为各指标标准化值, X_i 为指标实测值, $X_{\max}$ 为实测最大值, $X_{\min}$ 为实测最小值。在标准化数据基础上,采用层次分析法构造判断矩阵,在构建各层矩阵后,分别运算各层判断矩阵,求解特征向量,各矩阵经过一致性检验后,得到各层次指标的权重值,再将各层次的因子进行对比分析,采用 1—9 比率标度法,各因素间进行两两比较构造判断矩阵,求解矩阵的最大值和特征向量,得到各因素的相对权重。计算判断矩阵的随机一致性比率(CR),当 $CR < 0.1$ 时,即认可判断矩阵有满意的一致性,说明权重分配合理。最后得到各指标在总排序中的权重值,并确定评价指标权重,最后通过矩阵一致性检验,获得权系数。所有分析均在 R 3.6.1 中实施(R Core Team 2019)。

2.5.4 海岛植被近自然度综合评价模型

运用综合指数法构建海岛植被近自然度综合评价模型^[31]:

$$D = B_1 \sum_{i=1}^n S_i W_i + B_2 \sum_{j=1}^m S_j W_j + B_3 \sum_{k=1}^l S_k W_k \tag{10}$$

式中, D 为海岛植被近自然度综合评价值; B_1 、 B_2 、 B_3 分别为准则层的权重值。 W_i 、 W_j 、 W_k 为准则层下各指标的权重值。 S_i 、 S_j 、 S_k 为准则层下各指标的标准化值; n 、 m 、 l 为准则层的指标数。

2.5.5 海岛植被近自然等级

海岛植被的近自然度综合评价指数在 0—1 间,依据德国近自然度评价体系^[32],参考我国陆地植被的近自然度评价,将海岛植被近自然度划分为 5 个等级(表 3),依次为 0—0.2、0.2—0.4、0.4—0.6、0.6—0.8、0.8—1.0,赋值为 5、4、3、2、1,植被类型分别为人工林、近人工林、远天然林、半天然林和近天然林。

表 3 海岛植被近自然度分级标准

Table 3 Grading criteria of naturalness of island vegetation

综合指数值 Composite index	分类等级 Classification grade	植被类型 Vegetation type	林分特征 Stand characteristics
0—0.2	5	人工林	林分层次和结构单一,群落稳定性和抵抗力较差,土壤受到严重破坏
0.2—0.4	4	近人工林	处于人工植被向自然植被演替的前期阶段,以落叶树种为主,林冠树种单一,结构较简单,乡土树种比例较大
0.4—0.6	3	远天然林	处于演替的前中期,以针、阔叶林为主,多为先锋植物占优的次生林,土壤受到中度干扰,多样性较低
0.6—0.8	2	半天然林	演替中后期次生林,以地带性植被为主,分布广,林分结构完整,土壤受到轻度干扰
0.8—1.0	1	近天然林	自然演替后期成熟林,以地带性顶级植被为主,群落结构完整,恢复力和抵抗力强,土壤几乎不受干扰,功能多样性高,生态系统服务功能高

3 结果与分析

3.1 海岛植被近自然度评价指标

海岛植被近自然度评价指标的敏感性分析显示(表 4):植被盖度、土壤容重、Pielou 指数、功能均匀度、功能离散度为海岛植被近自然度低敏感性指标;乔木层和灌木层郁闭度、胸径级指数、自然构成系数、土壤总碳和土壤含水率、植物丰富度、Shannon-Wiener 指数、功能均匀度为中敏感性指标;土壤总氮、总磷、林分密度、功能丰富度、Rao 二次熵指数为高敏感性指标。本文选取中、高敏感性指标建立海岛植被近自然度综合评价指标体系。

表 4 海岛植被近自然度评价指标的敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of island vegetation naturalness evaluate indexes

植被近自然度指标 Vegetation naturalness indexes	样本数 Sample size	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	敏感性 Sensitivity
乔木层郁闭度 Canopy of tree layer	74	56.595	30.750	54.33	中
灌木层郁闭度 Canopy of shrub layer	74	51.527	23.270	45.16	中
植被盖度 Vegetation coverage	74	78.351	15.288	19.51	低
胸径级指数 DBH-class index	74	1.924	0.708	36.80	中
自然构成系数 Naturalness composite coefficient	74	5.032	1.525	30.31	中
土壤总氮 Soil total nitrogen	74	1.409	1.386	98.37	高
土壤总磷 Soil total phosphorus	74	1.088	1.005	92.37	高
土壤总碳 Soil total carbon	74	35.848	17.761	49.55	中
土壤容重 Soil bulk density	74	0.952	0.253	26.58	低
土壤含水率 Soil water content	74	18.459	7.415	40.17	中
植物丰富度 Plant species richness	74	11.892	6.038	50.77	中
林分密度 Stand density	74	0.536	0.345	64.37	高
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	74	0.661	0.252	38.12	中
Pielou 指数 Pielou index	74	0.586	0.160	26.62	低
功能丰富度 Functional richness	74	1.787	3.270	182.98	高
功能均匀度 Functional evenness	74	0.374	0.106	28.34	低
功能离散度 Functional dispersion	74	0.740	0.213	28.78	低
Rao 二次熵指数 Rao' entropy index	74	1.470	1.356	92.24	高

3.2 海岛植被近自然度评价指标体系

依据筛选的海岛植被近自然度评价指标,运用层次分析法构建 3 层次结构的海岛植被近自然度综合评价指标体系(表 5)。目标层为海岛植被近自然度综合指数,准则层为植被信息、土壤属性、多样性特征。综合评价体系的权重值:植被信息>多样性特征>土壤属性。植被信息中自然构成系数、土壤属性中土壤总碳和含水率、物种多样性 Shannon-Wiener 指数权重较大;功能多样性中 Rao 二次熵指数占较大权重。

表 5 海岛植被近自然度综合评价指标体系及权重

Table 5 Evaluation system and weights of island vegetation naturalness

目标层 (A) Objective layer	准则层 (B) Criterion layer	权重值 Weights	指标层 (C) Index layer	权重值 Weights
海岛植被近自然度综合指数 Island vegetation naturalness comprehensive index	植被信息	0.456	乔木层郁闭度	0.161
			灌木层郁闭度	0.290
			胸径级指数	0.087
			自然构成系数	0.462
	土壤属性	0.259	土壤总氮	0.126
			土壤总磷	0.100
			土壤总碳	0.372
			土壤含水率	0.402
	多样性特征	0.284	植物丰富度	0.256
			平均密度	0.188
			Shannon-Wiener 指数	0.434
			功能丰富度	0.008
			Rao 二次熵指数	0.114

3.2 海岛植被近自然度等级

参照海岛植被近自然度综合评价指标体系和筛选指标的标准化值,代入海岛植被近自然度综合评价模型中得到典型海岛植物群落的近自然度综合指数。以海岛为单位取均值,得到海岛植被近自然度综合指数和近自然林分等级(图 2)。结果表明:典型海岛植被的近自然度综合指数在 0.345—0.611 间,属于近人工林、远天然林和半天然林。大金山岛的植被近自然程度最高,属半天然林分,北长山岛的植被近自然度最低,处于近人工林阶段,其余海岛属于远天然林分。中国东部海岛植被近自然度局显示:中亚热带的海岛植被近自然程度较高,暖温带和南亚热带的海岛植被近自然程度较低。

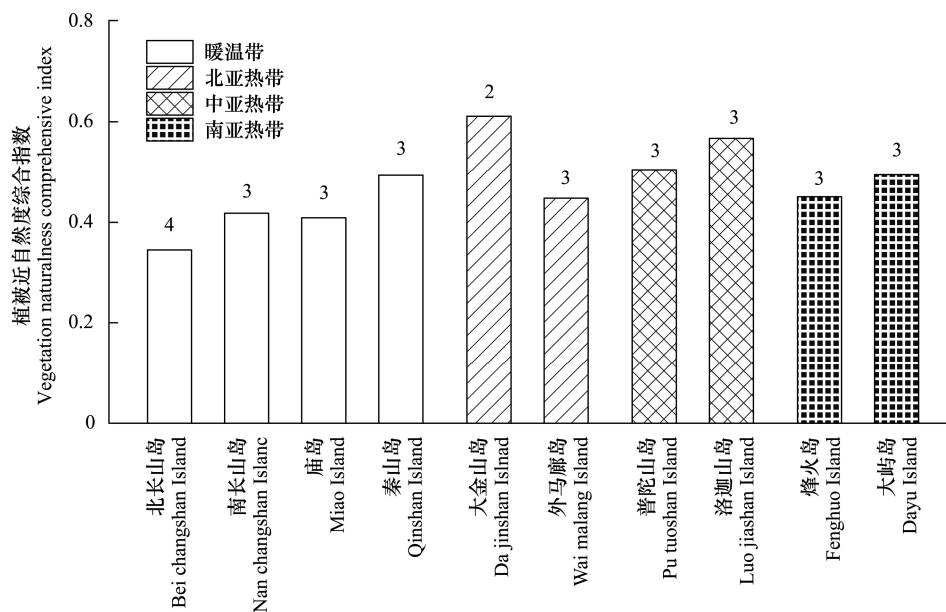


图 2 中国东部典型海岛植被近自然度等级

Fig.2 Vegetation naturalness grade across 10 typical islands in eastern China

图中数字为植被近自然度等级。其中,2:半天然林;3:远天然林;4:近人工林

4 讨论

4.1 海岛植被近自然度评价

植被近自然度是衡量植被天然程度的重要指标,在森林管理和植被近自然恢复方面有重要应用价值^[33]。陆地是人类活动的主要场地,当前对陆地植被的近自然度评价研究较多^[34-35]。海岛由于高的隔离度和较小的面积,人口稀少,社会关注度低。再者海岛植被调查非常困难,并且缺乏海岛森林生态系统长期监测数据,因而目前还未有海岛植被近自然度评价指标体系的研究。其次,海岛生态地理环境特殊,长期经受风力、水分和养分胁迫,植被在结构和功能上与大陆植被差异较大,通常植被演替更年轻、群落结构简单、多样性较低,尤其在功能上更多选择抗风、耐干旱、耐贫瘠的物种,因此不能将陆地植被的近自然度评价指标体系完全运用于海岛植被。此外,当前还未有将植物功能性状应用到植被近自然度评价的研究。本文基于详尽的海岛植被、土壤和植物功能性状数据,初次构建了海岛植被近自然度综合评价指标体系,全面评价了中国东部典型海岛的植被近自然度。该指标体系不仅借鉴陆地植被的近自然度评价指标和方法,同时结合层次分析法和综合指数法,并考虑了海岛植物的功能适应特性(功能丰富度和 Rao 二次熵指数敏感性很高,变异系数为 182.92%和 92.24%),从生态功能的角度分析海岛植被的近自然度,比以往植被近自然度评价有了新的突破和认识。

海岛植被近自然度评价指标体系权重:植被信息(0.456)>多样性特征(0.284)>土壤属性(0.259),各指标的重要程度基本与陆地植被一致,但权重有所差异。张俊艳等对云南松群落的近自然度评价发现:群落结

构>演替特征>土壤特性^[4]。彭舜磊和王得祥对秦岭主要森林类型的近自然度评价也得出植被信息>土壤特征的结论^[5]。同样,陈远丽等发现物种多样性和土壤属性是影响黄山松群落的重要因子^[36]。植物功能性状是植物适应环境的重要表现策略,是植被近自然度的重要体现。本文发现植物功能多样性对海岛植被近自然度有很高的敏感性,同样占据一定的权重(功能丰富度和 Rao 二次熵指数),在植被近自然度评价研究中应该考虑。

4.2 基于植被近自然度评价的海岛植被保护与修复

植被近自然度能很好地反映植被的健康状况,自然度等级越高,植被状况越好。本文发现中国东部多数海岛近自然程度不高,为远天然林和半天然林。一方面,植被近自然度与植被类型及发育阶段有关,如顶极森林>演替过渡森林>先锋森林>乡土树种人工林>外来树种人工林^[5,27],而海岛植被尚未达到演替顶极。另一方面,日益加剧的海岛城市化和开发利用,严重破坏了海岛植被,阻碍其自然演替。如大金山岛的植被近自然度最高是因为经历了 30 多年的自然封育,发育为较成熟的常绿落叶阔叶混交林,而庙岛群岛和南亚热带的烽火岛和大屿岛,植被近自然度较低,原因是海岛城市化加速和填海工程,自然植被遭到严重破坏后,用单一类型的人工林恢复原有植被。中亚热带的热带海岛植被近自然度较高,因为该区域森林群落结构完整,植被演替相对稳定,加上较好的人工保护与管理,次生林逐渐恢复^[2,5]。

植被近自然度的评价应用于海岛植被的近自然恢复^[37]。在森林管理和恢复时,以单株采伐为主、利用植物的天然更新、采用复合异龄林达到森林群落的自然状态^[38]。从中国东部海岛的植被近自然度格局看:亚热带>南亚热带>北亚热带,自然封育的海岛>人为干扰严重的海岛。因此,对于近人工林的北长山岛,其林下更新缓慢,群落结构单一,林分密度低,防风、固土、保肥能力较差,可采取改造为混交林的方式,通过逐步补植乡土树种,提高林分结构丰富度、物种多样性和群落稳定性^[23]。对于植被近自然度较高的海岛,应继续封山育林,保护生境和地带性植被。对于远天然林的海岛,应适当人工抚育,加速植被演替,如间伐长势较差的林木,降低林分郁闭度,形成林窗,促进幼苗更新。海岛植被近自然度评价是恢复海岛退化森林生态系统的基础^[5],基于植被近自然度评价结果,合理制定海岛开发方案、利用强度以及植被恢复和保护措施。

5 结论

(1) 本文初次构建了中国东部海岛植被近自然度评价指标体系,不仅涵盖了陆地植被近自然度评价的基本指标:植被信息、土壤属性和物种多样性,指标权重基本与陆地植被近自然度评价体系:植被信息>多样性特征>土壤属性一致。而且从生理生态适应的角度,首次将植物功能性状应用于植被近自然度评价中,相比传统的植被近自然度评价有了新的突破和认识。

(2) 植物功能性状能反映海岛植物适应特殊环境的策略,是海岛植被近自然度评价的重要指标,尤其是 Rao 二次熵指数和功能丰富度在海岛植被近自然度评价指标体系中占较大权重。

(3) 中国东部海岛植被近自然度格局为:中亚热带的热带海岛(半天然林为主)高于暖温带和南亚热带的热带海岛(远天然林和近人工林占优)。此外,自然封育的海岛植被近自然度大于城市化严重和人为干扰大的海岛。

(4) 基于海岛植被近自然度评价结果,对植被近自然度低的海岛,逐步补植乡土树种,改造为混交林;近自然度较高的海岛采取自然封育;处于远天然林和半天然林的海岛,适当人工抚育,加速自然演替。

参考文献(References):

- [1] 李迈和, Krauchi N, 杨健. 生态干扰度: 一种评价植被天然性程度的方法. 地理科学进展, 2002, 21(5): 450-458.
- [2] 刘刚, 陆元昌, Sturm K, 宁金魁, 雷相东. 北京林区森林经营近自然度评价方法的研究与应用. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 114-118.
- [3] Machado A. An index of naturalness. Journal for Nature Conservation, 2004, 12(2): 95-110.
- [4] 张俊艳, 成克武, 臧润国, 郎南军, 江期川, 王茜. 不同云南松群落近自然度评价及其评价指标体系的构建. 河北农业大学学报, 2011, 34(3): 71-76.
- [5] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价. 林业科学, 2011, 47(1): 135-142.

- [6] 王鹏, 陈丽华. 冀北山区次生杨桦林近自然度及优势度研究. 湖南农业科学, 2014, (20): 41-44.
- [7] 张玉环, 汪俊三. 生态破坏等级的自然度研究及应用——以海南岛为例. 环境科学研究, 1991, 4(5): 45-49.
- [8] Garnier E, Cortez J, Billès G, Navas M L, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint J P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology*, 2004, 85(9): 2630-2637.
- [9] Kier G, Kreft H, Lee T M, Jetz W, Ibisch P L, Nowicki C, Mutke J, Barthlott W. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(23): 9322-9327.
- [10] Anderson J E. A conceptual framework for evaluating and quantifying naturalness. *Conservation Biology*, 1991, 5(3): 347-352.
- [11] Schirmer C. Reflections on assessing the naturalness of present forests. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 1999, 170(1): 11-18.
- [12] Tiefenbacher E. Naturnähe von Waldbeständen messen und überwachen | Measuring and Controlling Near-to-Nature Forest Stands. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 1999, 150(7): 246-248.
- [13] Uotila A, Kouki J, Kontkanen H, Pulkkinen P. Assessing the naturalness of boreal forests in eastern Fennoscandia. *Forest Ecology and Management*, 2002, 161(1/3): 257-277.
- [14] Bartha D. Chances for a stand-level evaluation of the naturalness of forests. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 2004, 175(1/2): 8-13.
- [15] Reif A, Walentowski H. The assessment of naturalness and its role for nature conservation and forestry in Europe. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 2008, 6: 63-76.
- [16] McGill B J, Enquist B J, Weiher E, Westoby M. Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(4): 178-185.
- [17] Ackerly D D, Cornwell W K. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within-and among-community components. *Ecology Letters*, 2007, 10(1): 135-145.
- [18] de Bello F, Lavorel S, Díaz S, Harrington R, Cornelissen J H C, Bardgett R D, Berg M P, Cipriotti P, Feld C K, Hering D, da Silva P M, Potts S G, Sandin L, Sousa J P, Storkey J, Wardle D A, Harrison P A. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2873-2893.
- [19] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1993.
- [20] 中国海岛志编纂委员会. 中国海岛志. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [21] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, ter Steege H, Morgan H D, van der Heijden M G A, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.
- [22] Curtis J T, McIntosh R P. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 1951, 32(3): 476-496.
- [23] 郭全邦, 刘玉成, 李旭光. 缙云山森林次生演替序列群落的物种多样性动态. 应用生态学报, 1999, 10(5): 521-524.
- [24] 郝云庆, 王金锡, 王启和, 孙鹏, 蒲春林. 崇州林场不同林分近自然度分析与经营对策研究. 四川林业科技, 2005, 26(2): 20-26.
- [25] 陈征海, 唐正良, 裴宝林. 浙江海岛植物区系的研究. 云南植物研究, 1995, 17(4): 405-412.
- [26] 高浩杰, 王国明, 郁庆君. 舟山市种子植物物种多样性及其分布特征. 植物科学学报, 2015, 33(1): 61-71.
- [27] 郑俊鸣, 方笑, 朱雪平, 朱丹丹, 邓传远. 平潭大屿岛植物资源及其多样性研究. 安徽农业大学学报, 2016, 43(4): 640-645.
- [28] 宋彦涛, 王平, 周道玮. 植物群落功能多样性计算方法. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2053-2059.
- [29] Lavorel S, Grigulis K, McIntyre S, Williams N S G, Garden D, Dorrough J, Berman S, Quéfier F, Thébault A, Bonis A. Assessing functional diversity in the field-methodology matters! *Functional Ecology*, 2008, 22(1): 134-147.
- [30] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [31] 侯琳, 雷瑞德. 完全封育方式对天然油松林的影响. 生态学报, 2007, 27(1): 288-295.
- [32] Çolak A H, Rotherham I D, Çalikoglu M. Combining 'naturalness concepts' with close-to-nature silviculture. *Forstwissenschaftliches Centralblatt Vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*, 2003, 122(6): 421-431.
- [33] Yao H, Ma J J, Fan Y J, Chen X L, Tian M R. Assessing the naturalness of a restored coal mine area on the Loess Plateau, China. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0219447.
- [34] 吕勇, 张江, 臧颖. 苦楮混交林自然构成指数分析. 林业科学, 2013, 49(7): 86-90.
- [35] 郭廷栋, 王得祥, 王涛, 胡有宁, 张新平. 延安市城郊侧柏纯林及混交林的近自然度评价. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(9): 43-50.
- [36] 陈远丽, 旷开金, 尤添革, 刘金福, 路春燕, 林芳芳, 林柳璇. 戴云山黄山松群落近自然度评价. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2019, 48(2): 188-194.
- [37] Evans N, Stewart W. The role of naturalness in ecological restoration: a case study from the cook county forest preserves. *Nature & Culture*, 2018, 13(2): 232-352.
- [38] 彭舜磊, 王良衍, 袁世杰. 盘山金钱松人工林群落改造前后近自然度比较. 东北林业大学学报, 2011, 39(8): 13-17.