

黔中地区马尾松-甜槠针阔混交林群落结构特征与林木空间分布格局及其关联性

金 鹏,徐 明,文春玉,聂 坤,杨 雪,唐雪娅,魏 珊,张 健*

(贵州大学 生命科学学院,贵州 贵阳 550025)

摘 要:为探究黔中地区天然次生马尾松针阔混交林群落结构及其空间分布格局特征,选取典型的马尾松-甜槠针阔混交林和马尾松纯林为调查对象,采用成对相关函数分析环境异质性对主要树种空间分布的影响、主要树种及径级空间格局和空间关联性研究。调查共记录 91 种植物,其中马尾松-甜槠针阔混交林和马尾松纯林分别为 42 种和 68 种。2 个森林群落中乔木总径级整体均呈倒“J”形结构,结构稳定,自然更新良好。结果表明,生境异质性对 2 种群落类型在小距离上空间分布格局的影响作用明显。2 块样地幼树、中树及总体分布格局相似,均为点距离在 0~10 m 内呈聚集分布、在 10~25 m 内呈随机分布,而大树在整个观察尺度内均为随机分布。马尾松纯林中马尾松-甜槠、甜槠-榿栎的空间关联性均以不相关为主,马尾松-榿栎以负相关为主;而马尾松-甜槠针阔混交林中马尾松与甜槠在 10~20 m 以负相关为主。2 种群落类型不同径级的空间关联性总体为不相关。黔中山地天然次生马尾松-甜槠针阔混交林、马尾松纯林群落结构存在差异,环境异质性、径级结构和空间尺度对两者空间分布格局及其关联性影响明显。

关键词:马尾松;针阔混交林;群落结构;林木空间分布

中图分类号:S757.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0132-08

Community Structure Characteristics and Forest Spatial Distribution Pattern and Their Correlation of *Pinus massoniana*-*Castanopsis eyrei* Mixed Forest in Central Guizhou

JIN Peng, XU Ming, WEN Chun-yu, NIE Kun, YANG Xue, TANG Xue-ya, WEI Shan, ZHANG Jian*

(College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: In order to explore the community structure and spatial distribution pattern characteristics of natural secondary conifer-broadleaved mixed forest of *Pinus massoniana* in central Guizhou, typical mixed *P. massoniana*-*Castanopsis eyrei* forest and pure *P. massoniana* forest were selected as the survey objects. Paired correlation function was adopted to analyze the influence of environmental heterogeneity on the spatial distribution of main tree species, the spatial pattern and spatial correlation of main tree species and diameter class. A total of 91 species of plants were recorded, including 42 and 68 species in the mixed forest and pure forest, respectively. The total diameter class of the trees in the two forest communities showed an inverted 'J-shape' with stable structure and good natural regeneration. Habitat heterogeneity had a significant influence on the spatial distribution pattern of the two community types at small distances. The distribution pattern of saplings, middle trees and the overall distribution pattern were similar in the two sampling plots; in the range of 0—10 m, the point distance was in aggregated distribution, random distribution in the range of 10—25 m, and for the big trees, it was in random distribution in whole observation scale. In pure *P. massoniana* forest, *P. massoniana* & *C. eyrei* and *C. eyrei* & *Quercus aliena* were mostly uncorre-

收稿日期:2022-12-31 修回日期:2023-03-24

基金项目:国家自然科学基金(31960234,31660150);贵州大学“SRT 计划”项目(2021SRT-273)。

第一作者:金 鹏。研究方向:植物生态学。E-mail:1934171891@qq.com。

* 通信作者:张 健,博士,副教授。研究方向:微生物生态学。E-mail:zhangjian12102@163.com

lated in special correlationship and *P. massoniana* & *Q. aliena* was mainly negatively correlated. In the mixed forest of *P. massoniana* & *C. eyrei*, the two species were mainly negatively correlated in the range of 10–20 m. The spatial correlation of different diameter classes of the two community types was generally uncorrelated. It is concluded that the community structure and spatial distribution pattern of natural secondary broad-leaved mixed forest *P. massoniana*-*C. eyrei* coniferous and in central Guizhou mountainous area are significantly different from those of pure *P. massoniana* forest. The two forests studied are different in community structure. Environmental heterogeneity, diameter structure and spatial scale have obvious effects on the spatial distribution pattern and correlation of the two.

Key words: *Pinus massoniana*; coniferous and broad-leaved mixed forest; community structure; forest tree spatial distribution

空间格局作为森林群落结构的一个重要属性^[1],能反映森林群落中植物的扩散模式、物种间的相互作用、微环境以及其他随机事件^[2]对生态系统结构和功能的影响^[3]。空间格局可描述生态过程与空间模式的关系,揭示森林群落结构和动态变化的重要性^[4]。森林不同生态过程如种子萌发、物种竞争和死亡可能会在个体空间结构上留下特定的痕迹,通过空间格局分析可以揭示这些规律^[5-6]。对森林群落空间格局的研究^[7],涉及热带^[8-9]、温带^[10]、地中海^[11]等地区森林群落并被广泛用于森林群落的管理和优化^[12-13]。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方地区分布广泛的乡土先锋树种,具有耐贫瘠、适应性强、生长快和易成林等特点^[14],常作为荒山造林、喀斯特恢复的主要树种,在我国生态环境建设中有着重要地位。因马尾松林纯林面积大^[15],经长期多代连栽,其低质低效林面积大,林分质量普遍较差、生产力较低、抵御干扰能力弱和土壤退化等问题突出^[16],通过实施近自然经营或人工引种的方式诱导其转化为结构复杂、生产力高、树种多样的异龄混交林,是低效马尾松纯林提质增效的重要途径^[17]。目前,关于马尾松林的研究较多,主要集中在马尾松林群落结构^[18]、土壤理化^[19]和碳储量^[20]等方面,对马尾松天然次生针阔混交林的研究不足^[21],其中对马尾松林空间格局及其种内相互作用的研究相对较少^[22]。因此,本研究以马尾松纯林和马尾松-甜槠(*Castanopsis eyrei*)混交林为对象,分析两者的空间分布格局和种间关联性,探讨2种林分结构差异、生境异质性对两者空间分布格局的影响,以及不同径级间树种的空间分布格局和种间关联性,以期马尾松纯林阔叶化改造过程中合理树种空间配置培育异龄混交林提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黔中腹地开阳县(106°45′–107°17′

E, 26°48′–27°22′N),海拔1 000~1 400 m,属典型的山原地貌,北亚热带季风湿润气候,年平均气温10.6~15.30℃,年无霜期为315 d左右。森林覆盖率达52.92%,主要针叶树种为马尾松和杉木(*Cunninghamia lanceolata*),主要阔叶树多为壳斗科(Fagaceae)、山茶科(Theaceae)、冬青科(Aquifoliaceae)、樟科(Lauraceae),森林土壤主要以石灰土与黄壤为主。

1.2 样地设置与群落调查

在开阳县禾丰乡分别选取天然次生林马尾松-甜槠针阔混交林(p-cF)和近自然经营马尾松纯林(pF),每种植被类型分别设置1个50 m×50 m(2 500 m²)的植物群落调查样方,采用RTK测量仪(北斗海达TS5 Pro)将样方划分为100个5 m×5 m的单元网格,对样方内所有胸径(D_{BH})≥1 cm的树木进行每木检尺和GPS定位等信息,对草本和灌木进行群落调查,记录其高度、基径、盖度等指标;同时记录样地海拔、坡向、坡位和土壤类型等立地条件(表1)。

1.3 林分结构

径级是评价林分质量的主要依据,与林分的材积、盖度、胸高断面积等密切相关。本研究采用径级结构代替年龄结构的方法,根据样地内木本植物的调查情况,按照胸径结构将所测量 D_{BH} ≥1 cm的林木划分为3级: D_{BH} ≤5 cm为幼树、5 cm< D_{BH} ≤20 cm为中树、 D_{BH} >20 cm为大树。

重要值是衡量及计算物种多样性的重要参数,是描述物种在群落中的地位和作用的综合数量指标^[23],本研究筛选重要值前4位的树种进行研究。计算各物种的重要值,计算公式为:乔木重要值=(相对密度+相对频度+相对优势度)/3×100%,灌木重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3×100%。相对密度=(某种植物的个体数/全部植物的个体数);相对频度=(样方中某一树种的频度/所有树种的总频度);相对优势度=(样方中某一树种的个体胸高断面积和/所有树种个体胸高断面积总

和);相对盖度=(样方中该种个体的分盖度/样方中全部个体所有分盖度之和)。

1.4 点格局分析

采用 Ripley's K 函数演变而来的成对相关 $g(r)$ 函数进行群落空间分布格局分析。 $g(r)$ 函数是一个概率密度函数,是利用 2 点间的距离,计算任一点为圆心、半径为 r 、指定宽度的圆环内的点数量来进行空间点格局分析,以圆环代替圆,消除了大尺度

上的累积效应,能更真实、直观地反映种群的空间格局^[24]。对于单变量 $g11(r)$ 函数,当实测值在包迹线内时,表示随机分布,当实测值在包迹线之上表示聚集分布,在包迹线之下表示均匀分布。对于双变量 $g12(r)$ 函数,当实测值在包迹线内时,表示 2 个物种没有关联,实测值在包迹线之上代表 2 个物种为正关联,实测值在包迹线之下代表 2 个物种之间为负关联。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample plots

样地类型	经纬度	海拔/ m	坡位	坡向	株数	林分密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均 冠幅/m	断面积/ (m ² ·hm ⁻²)	主要树种占比 (%)
pF	26°57'56"N, 106°54'18"E	1 219	坡上	西南 224°	430	1 848	14.6	10.2	5.9	18.3	马尾松(65),甜槠(16), 榿栎(11),枫香(4)
p-cF	26°58'3"N, 106°54'10"E	1 178	坡上	西南 241°	448	1 792	11.1	8.7	7.8	14.2	甜槠(62),马尾松(17), 枫香(8),麻栎(5)

选择合适的零假设模型(null model),是进行空间点格局统计分析的关键^[27]。本研究采用模型有:①完全空间随机模型(complete spatial randomness, CSR),也称同质泊松模型(homogeneous poisson process),其表示物种的空间点是完全互相独立的,不受任何生物或非生物过程影响,在研究区域内各点出现的概率相同,常作为零假设来检验当存在生境异质性时物种的空间分布^[25];②异质性泊松模型(heterogeneous poisson process, HP),该模型是排除空间异质性效应的零假设模型,可检验排除大尺度环境异质性的影响,反映种群真实的空间分布特征^[26]。本研究中,对于 $g11(r)$ 函数选取了完全随机模型(CSR)来检验当存在生境异质性时物种的空间分布格局;采用异质性泊松模型(HP)来检验排除生境异质性时物种的分布情况;对于 $g12(r)$ 函数用完全随机模型来分析 2 个物种之间的关联性。

根据最大距离不超过研究样地较短边长 1/2 的原则^[27],将空间分析尺度设为 0~25 m,并将其分别定义为小距离(0~10 m)、中距离(10~20 m)、大距离(20~25 m),栅格大小为 1 m×1 m,圆环宽度为 1 m,同时利用蒙特卡洛模拟检验 199 次,选取模拟值的第 5 最高值和第 5 最低值构建 95% 的置信区间,得到上下 2 条置信区间为 95% 的包迹线。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 整理数据,利用 Programita 2018 对主要树种进行空间点格局分析,采用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 群落物种组成与结构特征

马尾松纯林与马尾松-甜槠针阔混交林群落组

成和结构存在明显差异(图 1)。调查共记录 91 种植物:马尾松-甜槠针阔混交林样地内共记录植物 42 种,其中乔木 14 种、灌木 22 种、草本 6 种,隶属于 26 科;马尾松纯林样地共记录植物 68 种,其中乔木 17 种、灌木 21 种、草本 30 种,隶属于 35 个科。

马尾松-甜槠针阔混交林与马尾松纯林植物群落重要值排序存在明显差异(表 2)。乔木层上,马尾松-甜槠针阔混交林重要值前 4 位树种分别为:甜槠(44.58%)>马尾松(32.84%)>枫香(*Liquidambar formosana*, 7.79%)>麻栎(*Quercus acutissima*, 5.35%);马尾松纯林重要值前 4 位的树种分别为:马尾松(66.56%)>榿栎(*Q. aliena*, 12.84%)>甜槠(9.53%)>枫香(5.07%);在灌木层上,马尾松-甜槠针阔混交林和马尾松纯林中重要值排序前 4 物种分别为:两面针(*Zanthoxylum nitidum*, 27.41%)>常春藤(*Hedera sinensis*, 18.33%)>锈毛莓(*Rubus reflexus*, 18.13%)>杜鹃(*Rhododendron simsii*, 13.95%)和铁仔(*Myrsine africana*, 32.93%)>杜鹃(24.96%)>小果珍珠花(*Lyonia ovalifolia* var. *elliptica*, 11.15%)>拔葵(*Smilax china*, 7.04%);草本植物中,马尾松-甜槠针阔混交林和马尾松纯林中重要值排序前 4 物种分别为:梓木草(*Lithospermum zollingeri*, 35.03%)>狗脊(*Woodwardia japonica*, 20.09%)>黑鳞耳蕨(*Polystichum makinoi*, 16.28%)>红盖鳞毛蕨(*Dryopteris erythrosora*, 11.61%)和铁芒萁(*Dicranopteris linearis*, 36.50%)>狗脊(21.47%)>绞股蓝(*Gynostemma pentaphyllum*, 12.94%)>黑足鳞毛蕨(*Dryopteris fuscipes*, 4.89%)。

马尾松-甜槠针阔混交林与马尾松纯林的植物群落径级结构存在一定差异(图 2)。其中,马尾松-

甜槠针阔混交林与马尾松纯林总体径级结构均呈现倒“J”形分布趋势,这表明 2 个群落结构稳定,更新良好。2 种群落类型中主要优势树种的径级结构和种群数量则呈现明显差异,马尾松纯林中马尾松种群结构相对稳定,槲栎则呈现种群增长趋势。马尾松-甜槠针阔混交林中甜槠种群增长趋势,而马尾松的种群呈现“下降型”种群结构,这表明甜槠将随群落演替过程中占据更为优势地位。

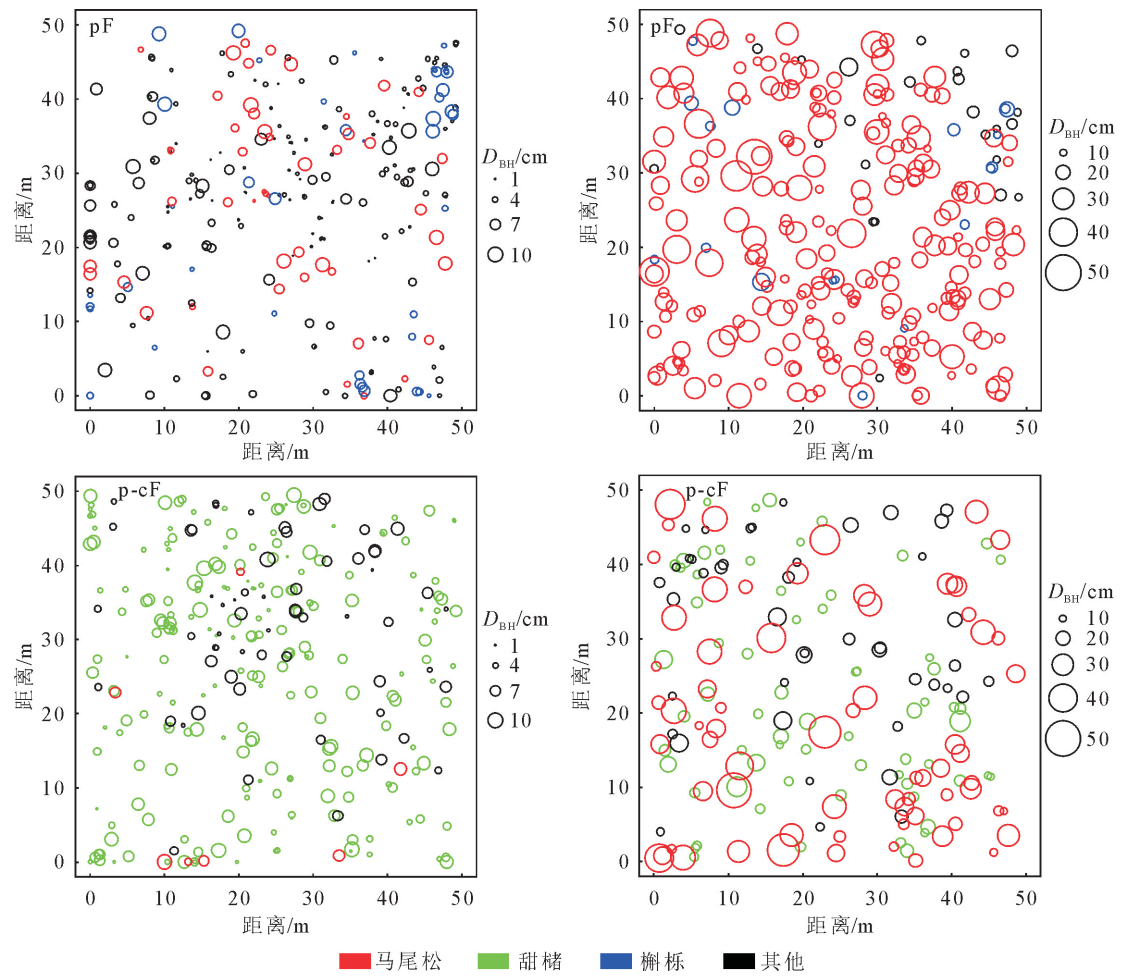


图 1 不同样地类型主要树种径级分布

Fig.1 Diameter class distribution map of main tree species in different sample plot types

表 2 不同样地类型不同冠层物种重要值

Table 2 Importance values of different canopy species in different sample plot types

样地类型	乔木层		灌木层		草本层	
	物种	重要值(%)	物种	重要值(%)	物种	重要值(%)
pF	马尾松	66.56	铁仔	32.93	铁芒萁	36.50
	槲栎	12.84	杜鹃	24.96	狗脊	21.47
	甜槠	9.53	小果南珍珠花	11.15	绞股蓝	12.94
	枫香	5.07	拔莼	7.04	黑足鳞毛蕨	4.89
p-cF	甜槠	44.58	两面针	27.41	梓目草	35.03
	马尾松	32.84	常春藤	18.33	狗脊	20.09
	枫香	7.79	锈毛莓	18.13	黑鳞耳蕨	16.28
	麻栎	5.35	杜鹃	13.95	红盖鳞毛蕨	11.61

2.2 主要树种的空间分布格局

图 3 揭示了生境异质性下主要树种的分布情况。马尾松纯林中马尾松在 0~2、7.5~8.5、12.5~14 m 属于聚集分布,甜槠在 0~2、3~5、11~12 m 为聚

集分布,在 15.5~17 m 为均匀分布,槲栎在 0~4、5~10 m 属于聚集分布,在 19~20 m 属于均匀分布;马尾松-甜槠混交林中马尾松整体属于随机分布,甜槠整体为随机分布,在 0~2 m 属于聚集分

布。总的来看,马尾松纯林和马尾松-甜槠混交林相应树种在整体上分布格局相似,均以随机分布为主。

排除生境异质性后,2种林分类型的分布格局与存在生境异质性时相比,出现了较多的随机分布,其中马尾松纯林中榲桲聚集分布的尺度只在0~2 m,其余树种,无论马尾松纯林还是马尾松-甜槠混交林,其聚集尺度均有所下降。通过CSR和HP模

型对比发现:生境异质性对树种的空间分布格局有一定影响。

根据径级大小将主要树种胸径划分为3个阶段,利用 $g11(r)$ 函数分析显示(图4),马尾松纯林和马尾松-甜槠混交林中,幼树、中树阶段和总体的分布格局相似,在小尺度均表现为聚集分布,随着尺度增加转为随机分布;而大树阶段均为随机分布。

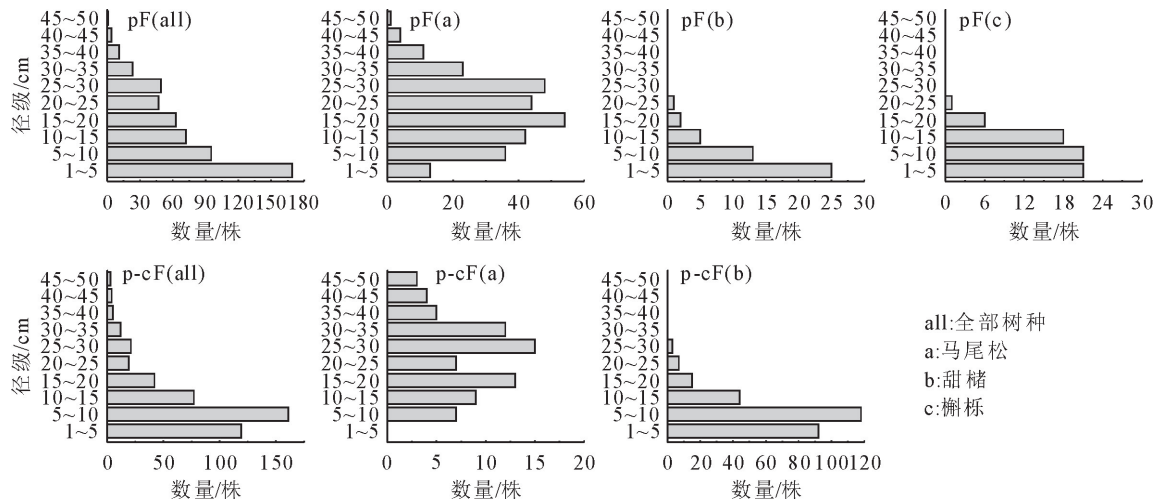


图2 不同样地类型群落径级分布

Fig. 2 Diameter class distribution of different community types in different sample plot

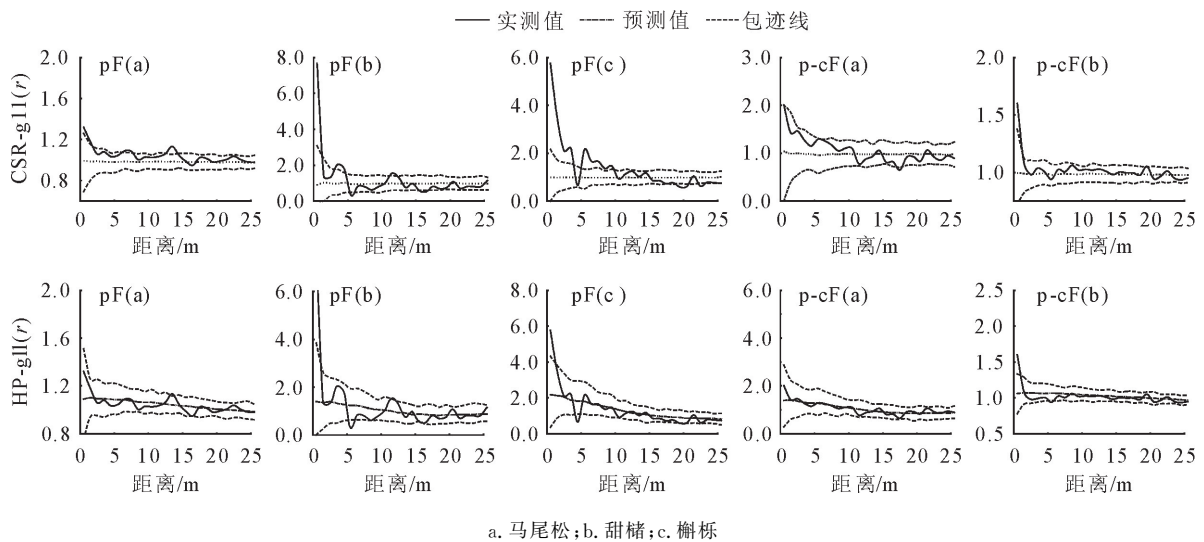


图3 不同零模型下主要树种空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of main tree species under different null models

2.3 主要树种间的空间关联性

利用 $g12(r)$ 函数,对2个样地主要树种空间关联性进行分析(图5),结果表明马尾松纯林中马尾松和甜槠整体上并未表现出关联性,马尾松和榲桲在2~23 m空间距离上表现为负相关,甜槠-榲桲关联性较为复杂,在2.5、5~6、8~9、13、15 m表现为正相关;而马尾松-甜槠混交林中马尾松-甜槠在5 m为正相关,在7.5~20、24~25 m尺度上为负相关。

2.4 主要树种径级间的空间关联性

根据 $g12(r)$ 函数对主要树种不同径级空间关联性进行了分析(图6),结果显示,马尾松纯林中幼树-中树在0~1、12~13 m处为正相关,幼树-大树、中树-大树在所有尺度上均表现为不相关;马尾松-甜槠混交林中,中树-大树在2~3 m处表现为负相关,幼树-中树、幼树-大树在所有尺度上均为不相关。

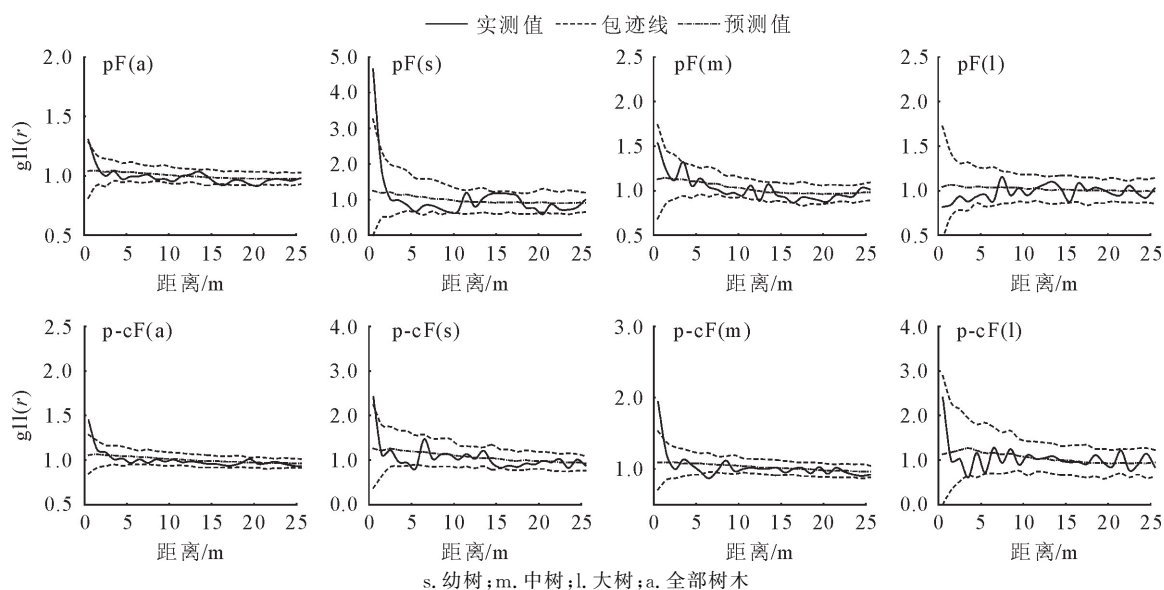


图 4 不同样地类型径级空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution patterns of different diameter classes of different sample plot types

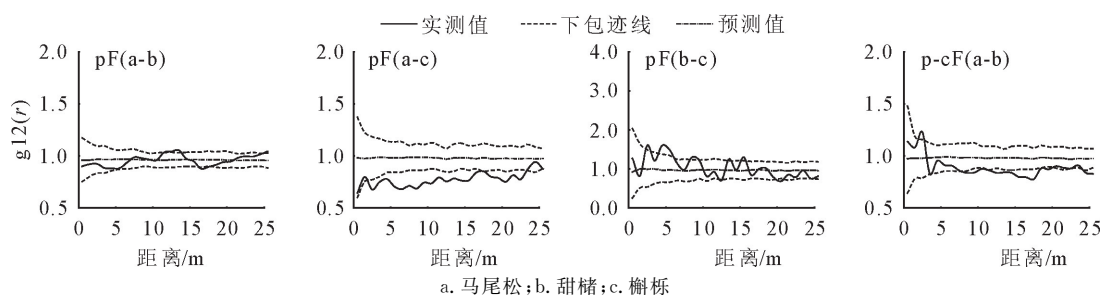


图 5 不同样地类型主要树种间空间关联性

Fig. 5 Spatial association among main tree species in different sample plot types

3 讨论

本研究中马尾松纯林、马尾松-甜槠混交林物种组成丰富,两者乔、灌、草优势种多数不同,两者群落结构有所差异。其中马尾松-甜槠混交林物种数低于马尾松纯林,这可能是因为乔木层群落环境导致林下光照不足,从而使不耐阴物种不能生存,或是耐阴物种间竞争导致其物种丰富度下降。马尾松纯林和马尾松-甜槠混交林群落乔木总径级结构呈现倒“J”形,小径级的树数量充足,说明 2 个群落结构稳定,更新良好。2 块样地马尾松幼树数量低于中树和大树,说明马尾松种群在林分中介于稳定型与衰退型之间,这与已有报道相一致^[28]。可能是因为马尾松作为演替前期的先锋物种,能迅速占据优势地位并大量扩散,从而改善了环境条件,为后来物种生存和发展创造了条件。随着演替进行,其逐渐受到竞争抑制,导致径级结构向正态分布靠拢。马尾松-甜槠混交林中甜槠及马尾松纯林中榿栎小径级个体数量多,可能会取代马尾松成为优势种。

黔中山地马尾松-甜槠混交林和马尾松纯林的群落空间分布格局受空间异质性影响作用明显。其

中,当考虑生境异质性时,马尾松纯林和马尾松-甜槠混交林群落主要树种在小尺度内聚集分布,而整体呈现随机分布;而当不考虑生境异质性时,尽管 2 种群落类型样地仍以随机分布为主,但主要树种发生聚集的空间尺度明显下降,这表明样地内的树种分布受到了生境异质性的影响。2 种群落类型不同零模型下马尾松种群空间分布均表现为随机分布,这可能是马尾松作为先锋优势物种随演替过程中的“自疏效应”而趋于空间随机分布,以及马尾松的更新受到群落光照限制而趋向随机分布。马尾松纯林中榿栎种群在小尺度内呈现聚集分布,这可能是其更新方式以母株为中心扩散的结果^[29]。此外,随着径级的不断增加,马尾松纯林和马尾松-甜槠混交林在小尺度下聚集分布,在中尺度、大尺度下为随机分布,这种格局也出现在其他森林生态系统中^[30],可能是因为幼树和中树在小尺度范围聚集能有效降低外界环境的胁迫^[31],增加对资源的利用率,提高种间竞争能力,因此利于种群的增长;到了大树阶段,群落中的各物种生态位已固定,密度过高的树因竞争排斥而死亡,最终形成了随机分布的格局。

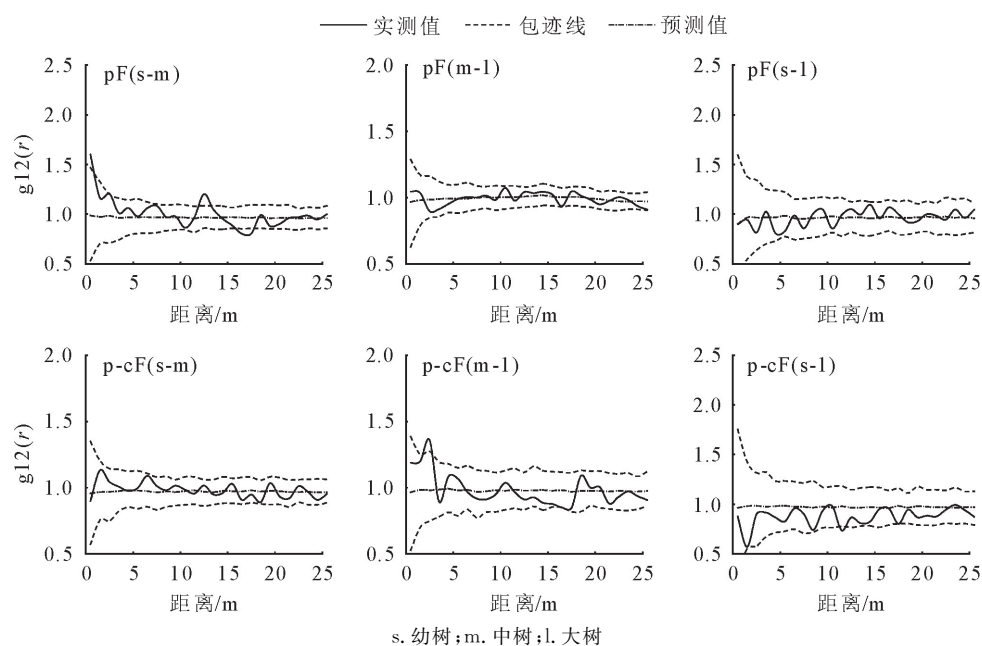


图6 不同样地类型径级空间关联性

Fig. 6 Spatial correlation of different diameter classes in different sample plot types

空间关联分析结果是种群空间关系的呈现,正负关联特征可能是物种间相互作用的结果,也可能是物种生境趋同或趋异的表现。在种群水平,马尾松纯林中马尾松-榿栎大部分尺度呈现负相关,这表明马尾松与榿栎存在竞争关系或者生长环境存在差异,有生态位分离^[32],这可能是因为马尾松与榿栎同属喜光物种,彼此对光照、水分等资源的竞争导致其关联性呈现负相关。此外马尾松纯林中马尾松-甜槠、榿栎-甜槠空间关联性为不相关^[33],说明在现有群落中这些树种总体上表现为中性关系。在马尾松-甜槠混交林中马尾松-甜槠的关联性在中尺度范围表现为负相关,这可能是因为甜槠作为演替后期物种,开始与马尾松竞争并逐渐取代马尾松成为群落的优势种。不同径级种间关联性的差异可能受植物大小的影响,个体间植株大小的差异越大,个体间的正相关性就越弱^[34]。在马尾松纯林和马尾松-甜槠混交林中,幼树-中树、中树-大树、幼树-大树在研究尺度上均趋于不相关,这可能是因为幼树、中树与大树在空间上分布为随机分布,且幼树和中树对光资源、土壤养分及水分等资源的竞争力微弱造成的^[35]。随着径级增加,树种对环境资源的获取和控制能力逐渐增加,导致小径级个体大量死亡,个体间距离增加,正相关性减弱,幼树-大树种间关联性更趋向于负相关和不相关。

4 结论

通过对黔中马尾松-甜槠针阔混交林的研究发现,黔中山地典型的马尾松-甜槠针阔混交林和马尾

松纯林群落空间格局分布存在明显差异。生境异质性是影响该区马尾松针阔混交林树种空间分布格局的一个重要因素,在今后研究中还应考虑环境因子(温度、地形、土壤养分和光照等)和空间格局的关系。本研究建议在该区马尾松纯林阔叶化改造过程中,可采取适当的采伐措施(如:择伐死亡树木、距离相近的大径级马尾松、修剪枝叶等方法),以改善马尾松与其他阔叶树种间(如马尾松-榿栎、马尾松-甜槠)的负相关关系,进而促进阔叶树种(如榿栎、甜槠)的生长。

参考文献:

- [1] HUI G, ZHANG G, ZHAO Z, *et al.* Methods of forest structure research: a review[J]. Current Forestry Reports, 2019, 5(3): 142-154.
- [2] DIMOV L D, CHAMBERS J L, LOCKHART B R. Tree species exhibit complex patterns of distribution in bottomland hardwood forests[J]. Annals of Forest Science, 2013, 70(8): 813-823.
- [3] LAW R, ILLIAN J, BURSLEM D F R P, *et al.* Ecological information from spatial patterns of plants: insights from point process theory[J]. Journal of Ecology, 2009, 97(4): 616-628.
- [4] AKHAVAN R, SAGHEBT K, ZENNER E K. Spatial patterns in different forest development stages of an intact old-growth Oriental beech forest in the Caspian region of Iran[J]. European Journal of Forest Research, 2012, 131(5): 1355-1366.
- [5] ION C P, RAFFAELLA M, ANY M P. Overstory succession in a mixed *Quercus petraea*-*Fagus sylvatica* old growth forest revealed through the spatial pattern of competition and mortality[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 326: 9-17.
- [6] LAW R, ILLIAN J, BURSLEM D F R P. Ecological informa-

- tion from spatial patterns of plants; insights from point process theory[J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(4): 616-628.
- [7] ZHICHENG W, ÜMÜT H, TAYIERJIANG A. Spatial distribution patterns of trunk internal decay of *Euphrates poplar riparian* forest along the Tarim River, northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 522: 120434.
- [8] HONG H N, YOUSEF E, VAN BAC B. Topographic effects on the spatial species associations in diverse heterogeneous tropical evergreen forests[J]. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2468.
- [9] RIBEIRO K F O, MARTINS V F, WIEGAND T. Habitat filtering drives the local distribution of congeneric species in a Brazilian white-sand flooded tropical forest[J]. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(4): 1797-1813.
- [10] 姚慧芳, 卢杰, 王超, 等. 波密岗乡华山松林优势植物空间格局及其关联性[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(4): 110-117.
- YAO H F, LU J, WANG C, *et al.* Spatial pattern and correlation of dominant plants in *Pinus armandii* forest in Boni ganna Township[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(4): 110-117. (in Chinese)
- [11] BENS M, GHALLAB A, LAMRHARI H, *et al.* Characterizing spatial structure of *Abies marocana* forest through point pattern analysis[J]. *Forest Systems*, 2020, 29(2): 14-28.
- [12] SCHALL P, SCHULZE E, FISCHER M, *et al.* Relations between forest management, stand structure and productivity across different types of central European forests[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2018, 32: 39-52.
- [13] RAVENTÓS J, MUJICA E, WIEGAND T. Analyzing the spatial structure of *Broughtonia cubensis* (Orchidaceae) populations in the dry forests of guanahacabibes, Cuban[J]. *Biotropic*, 2011, 43(2): 173-182.
- [14] 张姣, 徐明, 文春玉, 等. 黔中地区火灾对马尾松外生菌根真菌群落的影响[J]. *菌物学报*, 2022, 41(9): 1430-1440.
- ZHANG J, XU M, WEN C Y, *et al.* Effects of fire on the community of ectomycorrhizal fungi of *Pinus massoniana* in central Guizhou, southwest China[J]. *Mycosystema*, 2022, 41(9): 1430-1440. (in Chinese)
- [15] 杨云礼, 徐明, 张姣, 等. 黔中地区不同马尾松群丛植物群落与土壤理化性质特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 119-126.
- YANG Y L, XU M, ZHANG J, *et al.* Characteristics of communities and soil physico chemical properties of different *Pinus massoniana* in central Guizhou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 119-126. (in Chinese)
- [16] 张会峰. 不同混交比例马尾松林生态功能比较研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2003.
- [17] 张健, 徐明, 王阳, 等. 黔中地区不同马尾松群丛土壤球囊霉素分布特征[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(12): 2303-2308.
- ZHANG J, XU M, WANG Y, *et al.* Distribution characteristics of the glomalin-related soil protein of different *Pinus massoniana* association in central Guizhou[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(12): 2303-2308. (in Chinese)
- [18] 姜俊, 谢阳生, 陆元昌, 等. 不同林龄阶段马尾松人工林群落结构特征及经营策略[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(6): 1-7.
- JIANG J, XIE Y S, LU Y C, *et al.* Community structure at different age stages and optimization management strategies in a masson pine plantation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(6): 1-7. (in Chinese)
- [19] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2610-2617.
- CUI N J, ZHANG D J, LIU Y, *et al.* Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2610-2617. (in Chinese)
- [20] 曹小玉, 杨文龙, 刘悦翠. 马尾松林生态系统碳贮量研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(5): 45-49, 145.
- CAO X Y, YANG W L, LIU Y C. Carbon storage quantity of *Pinus massoniana* ecosystem[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(5): 45-49, 145. (in Chinese)
- [21] 吴初平, 袁位高, 盛卫星, 等. 浙江省典型天然次生林主要树种空间分布格局及其关联性[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 537-549.
- WU C P, YUAN W G, SHENG W X, *et al.* Spatial distribution patterns and associations of tree species in typical natural secondary forest communities in Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 537-549. (in Chinese)
- [22] 池森, 王从军, 黎庆菊, 等. 喀斯特次生林幼树更新空间分布格局及种间关联性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 3989-3996.
- CHI S, WANG C J, LI Q J, *et al.* Spatial distribution and interspecific associations of regenerating saplings in karst secondary forests[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 3989-3996. (in Chinese)
- [23] 曹晓栋, 杨波, 黄梅, 等. 贵州省宽阔水国家级自然保护区草本植物区系及物种多样性研究[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(9): 1559-1569.
- CAO X D, YANG B, HUANG M, *et al.* Flora and species diversity of herbaceous plants in Kuankuoshui national nature reserve of Guizhou[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(9): 1559-1569. (in Chinese)
- [24] WIEGAND T A, MOLONEY K. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology[J]. *Oikos*, 2004, 104(2): 209-229.
- [25] 杨华, 李艳丽, 沈林, 等. 长白山云冷杉针阔混交林主要树种空间分布及其关联性[J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4698-4706.
- YANG H, LI Y L, SHEN L, *et al.* Spatial distributions and associations of main tree species in a *spruce-fir* forest in the Changbai Mountains area in northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4698-4706. (in Chinese)
- [26] 常伟, 党坤良, 武朋辉, 等. 秦岭林区锐齿栎次生林种群空间分布格局[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1021-1029.
- CHANG W, DANG K L, WU P H, *et al.* Spatial pattern of secondary *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1021-1029. (in Chinese)
- [27] BENS M. Spatial point-pattern analysis as a powerful tool in identifying pattern-process relationships in plant ecology: an updated review[J]. *Ecological Processes*, 2021, 10(1): 2-23.

- (6):553-558. (in Chinese)
- [19] 卢宾宾,葛咏,秦昆,等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2020,45(9):1356-1366.
LU B B, GE Y, QIN K, *et al.* A review on geographically weighted regression[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1356-1366. (in Chinese)
- [20] 张斌,李璐,夏秋月,等. “三线”约束下的土地利用变化及其对碳储量影响研究—以武汉城市圈为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6):1-16.
ZHANG B, LI L, XIA Q Y, *et al.* Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: a case study of Wuhan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 1-16. (in Chinese)
- [21] 路中,雷国平,郭一洋,等. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1894-1906.
LU Z, LEI G P, GUO Y Y, *et al.* Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1894-1906. (in Chinese)
- [22] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态质量动态监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391.
CHEN W, HUANG H P, TIAN Y C, *et al.* Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan region based on Google Earth Engine[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(9): 1382-1391. (in Chinese)
- [23] LEUNG Y, MEI C L, ZHANG W X. Statistical tests for spatial nonstationarity based on the geographically weighted regression model[J]. Environment & Planning A, 2000, 32(1): 9-32.
- [24] 杭鑫,罗晓春,曹云,等. 基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响—以南京市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 219-229.
HANG X, LUO X C, CAO Y, *et al.* Ecological quality assessment and the impact of urbanization based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 219-229. (in Chinese)

(上接第 139 页)

- [28] 熊能,金则新,顾婧婧,等. 千岛湖次生林优势种群结构与分布格局[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 847-854.
XIONG N, JIN Z X, GU J J, *et al.* Population structure and distribution pattern of dominant tree species in a secondary forest on Laoshan island of Qiandao Lake region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(5): 847-854. (in Chinese)
- [29] 董灵波,田栋元,刘兆刚. 大兴安岭次生林空间分布格局及其尺度效应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1476-1486.
DONG L B, TIAN D Y, LIU Z G, *et al.* Spatial distribution pattern and scale effect of secondary forests in Daxinganling, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1476-1486. (in Chinese)
- [30] 朱文婷,刘海坤,何睿,等. 藏东南急尖长苞冷杉群落空间点格局分析及其时空动态[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 1-8.
ZHU W T, LIU H K, HE R, *et al.* Spatial point pattern analysis and spatio-temporal dynamics of *Abies georgei* var. *smithii* forests in southeast Tibet[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 1-8. (in Chinese)
- [31] 李国春,宋华东,李琦,等. 太白山巴山冷杉林主要树种与开花秦岭南竹的空间点格局分析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3487-3493.
LI G C, SONG H D, LI Q, *et al.* Spatial point pattern analysis of main trees and flowering *Fargesia qinlingensis* in *Abies fargesii* forests in Mt. Taibai of the Qinling Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3487-3493. (in Chinese)
- [32] CONDIT R, ASHTON P S, BAKER P. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J]. Science, 2000, 288(5470): 1414-1418.
- [33] 光太俊. 马宗岭林场落叶阔叶林主要树种空间分布格局及其种间联结性研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2021.
- [34] ZHIQ S, JIE L U, MIN H, *et al.* Spatial pattern analysis and associations of different growth stages of populations of *Abies georgei* var. *smithii* in southeast Tibet, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(12): 2170-2181.
- [35] 赵长兴,赵维俊,张兴林,等. 祁连山排露沟流域青海云杉种群内竞争与促进作用分析[J]. 植物生态学报, 2022, 46(9): 1027-1037.
ZHAO C X, ZHAO W J, ZHANG X L, *et al.* Analyses of intraspecific competition and facilitation of *Picea crassifolia* in pailugou watershed of Qilian Mountains, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(9): 1027-1037. (in Chinese)