珠三角森林公园典型林分冠层色彩季相变化

韩文静[1,2] 张 昶[1,3] 周海琪[3,4] 刘 婷[3,4] 沈德才[3,4] 刘颂颂[3,4] 莫罗坚[3,4] 王 成[1,3]

1 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业和草原局城市森林研究中心 北京 100091
2 中交公路规划设计院有限公司 北京 100010
3 广东珠江口城市群森林生态系统国家定位观测研究站 东莞 523106
4 东莞市林业科学研究所 东莞 523106

摘要：不同林分因其物种组成、植物特性及季相变化的差异呈现出独特的色彩风貌，但目前针对不同林分色彩特征及其差异性的深入研究较少。文章以珠三角地区 9 种典型林分为研究对象，依托森林公园设置 74 个样区，利用无人机进行全年定期拍摄，筛选获得 1378 张森林图像；基于色彩分类区间，解析图像色彩斑块，并从色彩种类构成、色彩属性及斑块景观格局 3 个方面选取 10 个指标，量化珠三角典型林分冠层色彩特征及其季相变化规律，以期为珠三角森林色彩景观设计与优化提供科学依据。结果表明：1）色彩种类构成方面，珠三角林冠色彩共涉及 44 种，荔枝林、桉树林和润楠林的色彩种类丰富且季节性变化强。2）色彩属性方面，桉树林、相思林和木荷林的橙色和黄色占比较大，荔枝林和棟叶吴萸林的黄绿色和浅绿色占比较大；黧蒴锥林饱和度较高，荔枝林明度较高。3）色彩景观格局方面，荔枝林和桉树林斑块多样性高，棟叶吴萸林和鹅掌柴林斑块破碎化程度高，而桉树林、相思林和樟树林斑块形状复杂。因此，尽管各林分色彩特征有所不同，但在季相变化上存在一定程度的共性。冬、春季色彩种类丰富且非绿色面积占比大；夏季饱和度和明度较高；秋季色彩斑块破碎化程度和多样性指数低但形状复杂。

关键词：不同林分；色彩构成；色彩属性；色彩景观格局；珠三角地区
DOI：10.12169/zgcsly.2024.07.05.0003

Seasonal Canopy Color Variation of Typical Forest Stands in Forest Parks of Pearl River Delta

Han Wenjing[1,2] Zhang Chang[1,3] Zhou Haiqi[3,4] Liu Ting[3,4] Shen Decai[3,4]
Liu Songsong[3,4] Mo Luojian[3,4] Wang Cheng[1,3]

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/Urban Forest Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100010, China; 3. Guangdong Pearl River Estuary City Cluster Ecosystem National Observation and Research Station, Dongguan 523106, Guangdong, China; 4. Dongguan Institute of Forestry Science, Dongguan 523106, Guangdong, China)

Abstract: Due to variations in species composition, plant characteristics, and seasonal changes, different forest stands exhibit unique color landscapes. However, the comparative studies on the color characteristics of forest stands and their variations remain limited. Focusing on 9 typical forest stands in the Pearl River Delta region, we set up 74 sample plots within forest parks, and obtain 1 378 forest images using drones for

收稿日期：2024-07-05
* 基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金（CAFYBB2020ZB008）；国家重点研发计划项目（2021YFE0193200）；东莞市社会发展科技项目（20231800936142）
第一作者：韩文静（1997- ），女，博士，助理咨询设计师，研究方向为城市森林结构与功能。E-mail：2281960614@qq.com
通信作者：莫罗坚（1979- ），男，硕士，高级工程师，研究方向为植物资源保护与利用。E-mail：52116124@qq.com

periodic year-round photography. Then, through color classification intervals, the color patches of the images are analyzed, and selects 10 indicators from three aspects of color composition, color attributes, and color spatial distribution patterns, to quantify the canopy color characteristics of these typical forest stands and their seasonal variations. The findings aim to provide scientific supports for the design and optimization of forest color landscapes in the Pearl River Delta region. The results show that: 1) In terms of the color composition, there are 44 types of color in the canopy of forest stands in the Pearl River Delta, and the colors in *Litchi chinensis*, *Eucalyptus robusta*, and *Machilus nanmu* forests are the most diverse and exhibit significant seasonal changes; 2) In terms of color attributes, *E. robusta*, *Acacia confusa*, and *Schima superba* forests have a higher proportion of orange and yellow colors, while *L. chinensis* and *Tetradium glabrifolium* forests have a higher proportion of yellow green and light green; *Castanopsis fissa* forests exhibit higher color saturation, and *L. chinensis* forests show higher brightness; and 3) Regarding the color landscape patterns, *L. chinensis* and *E. robusta* forests display high patch diversity, *T. glabrifolium* and *Heptapleurum heptaphyllum* forests have a high degree of patch fragmentation, while *E. robusta*, *A. confusa*, *Camphora officinarum* forests have complex patch shapes. Although the color characteristics of each forest stand are different, there is a certain degree of commonality in seasonal change. Winter and spring feature a rich variety of colors and a high proportion of non-green areas, summer exhibits high saturation and brightness, and autumn shows lower patch fragmentation and diversity indices but with complex shapes.

Keywords: different forest stand; color composition; color attribute; color landscape pattern; Pearl River Delta region

珠三角作为我国高度城市化地区，其森林与城镇紧密相连，城市居民对森林景观的审美需求较为突出[1]。森林色彩作为视觉的核心要素，具有重要的美学价值[2]。然而，由于该地区全年温暖湿润的气候特点，以及长期的用材林、经济林培育导向，导致山上桉树（*Eucalyptus robusta*）、马占相思（*Acacia mangium*）等为主的人工林比重大，山脚荔枝（*Litchi chinensis*）、龙眼（*Dimocarpus longan*）等为主的经济林比重大，森林色彩变化的对比度不显著[3]。这在一定程度上限制了学者们对其森林色彩变化研究的关注度，使相关的量化研究成果较为稀缺。

林冠层作为森林生态系统中最直接暴露于外界环境的部分[4]，其色彩变化不仅是对环境变化的敏感指示器，也是构成森林色彩景观的主体。植物种类、物候变化及其空间分布等因素共同作用于林冠层色彩的形成与演变，使不同林分展现出独特的色彩景观特征[5]。已有研究中，张喆[6]、马冰倩等[7]选用 HSV 色彩空间，从色彩属性和色彩斑块景观格局两方面分析了林冠层色彩变化剧烈期（秋季）的特征及规律；贾娜[8]则基于实地测色和文献收集，构建了 NCS 林木色彩空间，实现了不同研究成果的相互转换。然而，针对不同类型森林色彩变化特征的全面比较与分析仍显不足，尤其是缺乏基于长时间序列监测和量化分析的研究，难以准确揭示不同林分色彩景观的时空动态及其背后的生态过程。

基于此，本研究以珠三角典型林分的冠层色彩景观为研究对象，利用无人机进行全年监测，并采用自拟程序进行色彩自动提取与量化，旨在明确不同林分色彩构成、色彩属性及斑块景观格局特征，并进一步分析这些色彩特征在不同林分、不同月份间的差异，以期为珠三角地区乃至全国范围内的森林色彩景观规划与管理提供科学依据和技术支撑，推动构建多层次、多树种、多色彩的森林景观体系。

1　研究方法

1.1　典型林分选取与样区设置

珠三角（21.71°—24.39° N，111.36°—15.42°E）地处广东省中南部，属南亚热带季风气候，雨量充沛、热量充足，年均降水量 1 929.8 mm，年均气温为 21.9 ℃[9]。地势以丘陵和平原为主，植被类型多样，典型林分包括荔枝林、相思林和桉树林等，这些林分色彩构成多样且季相变化显著。

参照《东莞植物区系与植被》《2003—2015 年 CERN 植物物候观测数据集》及相关文献[10]，基于珠三角主要森林类型及其内部树种的色彩构成和季相变化，选取出现频率最高、分布最广且色彩组成丰富的 9 种典型林分作为研究对象（表 1）。依托公众最主要的森林休闲游憩场所——森林公园，以能够拍摄到连续森林景观、避免包含过多非林分要素为原则，每种林分类型选择 5～10 个样区，最终确定 74 个样区，样区大小为200 m × 200 m。

表 1 典型林分选取与样区设置

林分类型	主要树种	样区数量
相思林	马占相思、大叶相思(*Acacia auriculiformis*)、尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)、柠檬桉(*Corymbia citriodora*)、荔枝、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)	10
荔枝林	荔枝、马占相思、小叶榄仁(*Terminalia neotaliala*)、嘉宝果(*Plinia cauliflora*)、南洋楹(*Falcataria falcata*)、黄花风铃木(*Handroanthus chrysanthus*)	10
桉树林	尾叶桉、柠檬桉、细叶桉(*Eucalyptus tereticornis*)、荔枝、南洋楹、红锥(*Castanopsis hystrix*)	10
润楠林	浙江润楠(*Machilus chekiangensis*)、华润楠(*Machilus chinensis*)、润楠(*Machilus nanmu*)、尾叶桉、豺皮樟(*Litsea rotundifolia*)、鹅掌柴(*Heptapleurum heptaphyllum*)	9
木荷林	木荷(*Schima superba*)、浙江润楠、荔枝、马尾松(*Pinus massoniana*)、黄牛奶树(*Symplocos theophrastifolia*)、红锥	9
樟树林	樟(*Camphora officinarum*)、马占相思、青皮竹(*Bambusa textilis*)、岭南酸枣(*Allospondias lakonensis*)、火焰树(*Spathodea campanulata*)、桂木(*Artocarpus parvus*)	9
黧蒴锥林	黧蒴锥(*Castanopsis fissa*)、樟、黄牛木(*Cratoxylum cochinchinense*)、黄桐(*Endospermum chinense*)、土沉香(*Aquilaria sinensis*)、水翁蒲桃(*Syzygium nervosum*)	6
鹅掌柴林	鹅掌柴(*Heptapleurum heptaphyllum*)、豺皮樟、朴树(*Celtis sinensis*)、尾叶桉、水翁蒲桃、木油桐(*Vernicia montana*)	5
楝叶吴萸林	楝叶吴萸(*Tetradium glabrifolium*)、樟、木油桐、岭南酸枣、柯(*Lithocarpus glaber*)、破布叶(*Microcos paniculata*)	6

1.2 森林图像采集与处理

1.2.1 森林图像采集

2022 年 9 月至 2023 年 8 月，利用大疆悟 2 无人机搭载禅思 X4S 相机，于晴朗天气的 9：00—16：00 对各样区进行图像拍摄[11]。为避免拍摄高度、水平距离、方向及角度等因素的干扰，确保图像间的可比性，拍摄过程进行标准化操作。拍摄模式设置为自动白平衡及自动曝光，拍摄频率为每月 1～2 次，共计拍摄图像 25 119 张。

1.2.2 森林图像筛选与处理

以能够完整显示目标林分、色彩情况与实地观赏效果一致、光照等非森林因素对图像质量影响小为原则，于同一拍摄日期、同一样区，选取代表性图像 1 张，共获得森林图像 1 378 张。此外，为消除非森林元素对色彩量化结果的影响，利用 PS 软件删除建筑、天空、水体等部分，得到仅包含森林部分的色彩图像用于后续分析。

1.3 森林色彩分类与分析

1.3.1 色彩分类

采用 HSV 色彩空间，定义色相（H）、饱和度（S）和明度（V）的取值范围，划分珠三角森林色彩种类。1）色相划分：采用 K-Means 聚类法提取森林图像中的色相阈值[12]，并基于人眼色彩感知情况进行调整[13]，将其非等间隔划分为橙色、黄色、黄绿色、浅绿色、绿色等 10 种；2）饱和度和明度划分：使用归一化取值，将其等间隔划分为低、中、高 3 个等级[1]。最终，得到 10 色相×3 饱和度×3 明度共 90 种颜色（表 2）。

表 2 森林色彩种类划分

色相	阈值	饱和度	阈值	明度	阈值
橙色 H1	[0，25] 或 (345，360]	低饱和度 S1	[0.00，0.33]	低明度 V1	[0.00，0.33]
黄色 H2	(25，45]	中等饱和度 S2	(0.33，0.67]	中等明度 V2	(0.33，0.67]
黄绿色 H3	(45，80]	高饱和度 S3	(0.67，1.00]	高明度 V3	(0.67，1.00]
浅绿色 H4	(80，108]				
绿色 H5	(108，140]				
深绿色 H6	(140，165]				
蓝绿色 H7	(165，190]				
蓝色 H8	(190，220]				
紫色 H9	(220，290]				
红色 H10	(290，345]				

1.3.2　色彩斑块解译

基于上述 90 种颜色，使用 Visual Studio 2017 软件编译，开发色彩分析程序，对森林图像的色彩信息进行解译，自动生成包含所有色彩斑块的 shp 文件。为分析森林色彩景观构成及空间格局特征，从色彩种类构成、属性、斑块空间分布 3 个方面进行指标选取与计算[14-15]（表 3）。

表 3　森林色彩指标选取

指标类型	指标	缩写	描述
种类构成	色彩数量	N	色彩种类数
属性特征	色相指数	Hi	色相 Hi 的面积占比,1≤i≤10
	饱和度指数	Si	饱和度 Si 的面积占比,1≤i≤3
	明度指数	Vi	明度 Vi 的面积占比,1≤i≤3
空间格局	色彩斑块密度	c_PD	单位面积内的斑块数量
	色彩最大斑块面积指数	c_LPI	最大斑块面积占整体景观面积的比例
	色彩斑块边缘密度	c_ED	值越大,边缘效应越强
	色彩斑块分离度指数	c_SPL	值越大,破碎化程度越高
	色彩斑块平均分维度指数	c_FRAC	值越大,形状越复杂
	色彩斑块多样性指数	c_SHDI	值越大,类型越多样

1.4　数据分析

经 Kolmogorov-Smirnov 检验，本研究数据均不符合正态分布，故采用多独立样本 Kruskal-Wallis 检验，分析各森林色彩指标在不同林分类型、不同月份间的差异，取 $P<0.05$ 具有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　不同林分色彩构成特征及其月变化

2.1.1　色彩种类构成特征

不同林分的色彩种类构成（表 4）存在差异，且表现在橙色、黄色、黄绿色和浅绿色 4 种色相的高饱和度-中等或高明度。其中，相思林和荔枝林的色彩种类最为丰富，分别为 44 种和 43 种；而鹅掌柴林色彩最单调，仅包含 39 种颜色。从各季节（表 5）看：春季，相思林、荔枝林、木荷林和樟树林色彩丰富；夏季，相思林、荔枝林、桉树林、樟树林色彩丰富；秋季，荔枝林、桉树林、樟树林色彩丰富；冬季，荔枝林、木荷林和樟树林色彩丰富。

表 4　不同林分的色彩种类构成

森林色彩		相思林	荔枝林	桉树林	润楠林	木荷林	樟树林	黧蒴锥林	鹅掌柴林	楝叶吴萸林
橙色 H1	低饱和度低明度 C0	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度中等明度 C1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度高明度 C2	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度低明度 C3	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度中等明度 C4	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度高明度 C5	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度低明度 C6	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度中等明度 C7	+	+	+	N	N	N	N	N	N
黄色 H2	低饱和度低明度 C9	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度中等明度 C10	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度高明度 C11	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度低明度 C12	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度中等明度 C13	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度高明度 C14	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度低明度 C15	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度中等明度 C16	+	+	+	+	+	N	N	+	+
	高饱和度高明度 C17	+	+	+	N	N	N	N	N	N
黄绿色 H3	低饱和度低明度 C18	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度中等明度 C19	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度高明度 C20	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度低明度 C21	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度中等明度 C22	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度高明度 C23	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度低明度 C24	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度中等明度 C25	+	N	+	+	+	+	+	N	+
	高饱和度高明度 C26	+	+	N	N	+	+	N	N	N

表 4(续)

森林色彩		相思林	荔枝林	桉树林	润楠林	木荷林	樟树林	黧蒴锥林	鹅掌柴林	楝叶吴萸林
浅绿色 H4	低饱和度低明度 C27	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度中等明度 C28	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度高明度 C29	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度低明度 C30	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度中等明度 C31	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度高明度 C32	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度低明度 C33	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度中等明度 C34	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度高明度 C35	+	+	N	N	+	+	+	N	N
绿色 H5	低饱和度低明度 C36	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度中等明度 C37	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	低饱和度高明度 C38	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度低明度 C39	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度中等明度 C40	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	中等饱和度高明度 C41	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度低明度 C42	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度中等明度 C43	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	高饱和度高明度 C44	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	色彩种类	44	43	42	40	42	41	40	39	40

注:表中“+”为某林分包含该颜色,“N”且填充为灰色部分为某林分不含该颜色。

表 5 不同林分–不同月份的色彩种类构成

季节	月份	相思林	荔枝林	桉树林	润楠林	木荷林	樟树林	黧蒴锥林	鹅掌柴林	楝叶吴萸林
春	3 月	38	38	36	36	37	36	34	33	33
	4 月	35	37	34	29	31	35	35	34	34
	5 月	37	38	34	32	39	39	36	32	30
夏	6 月	34	29	34	31	35	38	33	30	30
	7 月	39	36	39	31	36	33	37	36	31
	8 月	37	39	39	35	37	36	36	35	35
秋	9 月	31	38	38	35	33	33	37	32	32
	10 月	37	40	39	35	36	36	37	35	30
	11 月	33	32	32	33	29	34	32	31	31
冬	12 月	33	37	35	36	37	33	34	33	30
	1 月	36	39	38	36	36	39	36	32	36
	2 月	33	39	37	33	33	35	30	32	33

注：表中数字为色彩数量，各月份最大值用灰色标记；若某林分类型被标记为灰色，则认为其在相应季节的色彩种类丰富；季节划分参照庄立跃等[16]对珠三角地区的研究；下同。

2.1.2 色彩数量特征及其月变化

由图 1 可知：黧蒴锥林和鹅掌柴林的色彩数量在不同月份间无显著差异（$P>0.05$），表明这 2 种林分的色彩种类构成相对稳定；其余 7 种林分的色彩数量在不同月份间存在显著差异（$P<0.05$），且均呈现“先下降，后上升”的变化趋势，最小值均出现在 6 月，最大值则集中在冬、春季，其中荔枝林、桉树林、润楠林的变化幅度较大。

2.2 不同林分色彩属性特征及其月变化

2.2.1 色相指数特征及其月变化

桉树林、相思林和木荷林的点缀色（黄色和橙色）指数较大，分别为 20.30%、13.54% 和 13.33%；荔枝林和楝叶吴萸林的辅助色（黄绿色和浅绿色）指数较大，分别为 27.06% 和 26.71%。

由图 2、表 6 可知，色相指数在不同林分和不同月份间均存在显著差异。鹅掌柴林的色相变化最为简单，仅橙色和绿色指数呈显著月变化（$P<0.05$），其中橙色指数 1 月最大，而绿色指数 12、1 月较小；相思林、荔枝林、桉树林、木荷林、樟树林和黧蒴锥林的所有色相指数均呈显著月变化，其中橙色和黄色指数 5 月和 12 月数值较大，黄绿色和浅绿色指数 12、1、2 月数值较大，绿色指数 6 月数值最大。

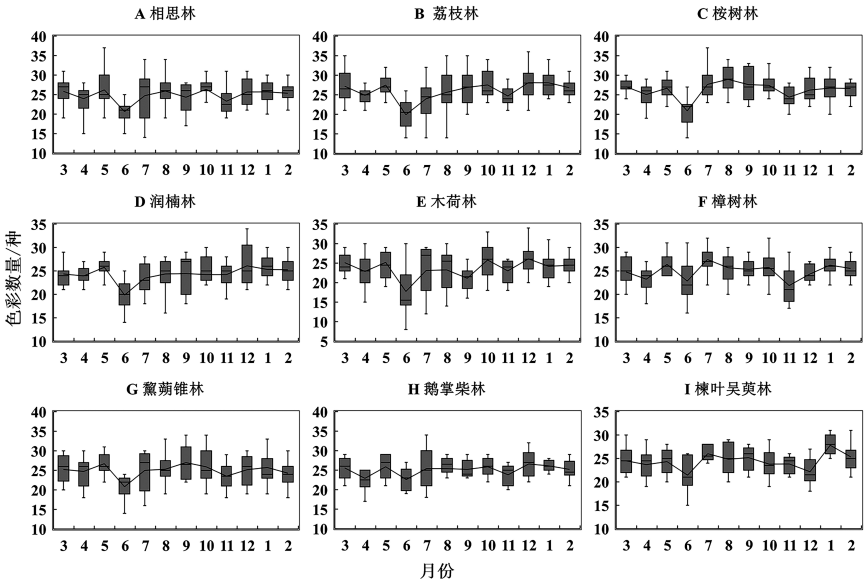
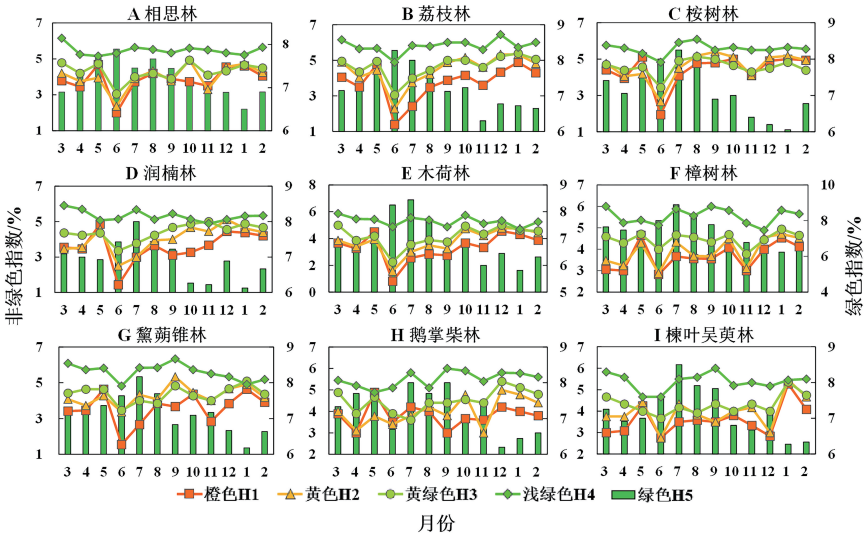


图 1　不同林分色彩数量的月变化



注：图中非绿色指数指橙色、黄色、黄绿色和浅绿色指数。

图 2　不同林分色相指数的月变化

表 6　不同月份-不同林分的色彩属性指标差异

森林色彩	相思林	荔枝林	桉树林	木荷林	樟树林	黧蒴锥林	润楠林	楝叶吴萸林	鹅掌柴林
色相									
橙色	49.02**	78.74**	100.24**	68.83**	48.56**	35.44**	59.70**	47.29**	23.25*
黄色	36.88**	54.22**	70.87**	43.54**	44.83**	33.97**	42.92**	38.62**	15.04
黄绿色	34.81**	46.90**	40.13**	40.96**	43.72**	21.95*	34.91**	30.39**	18.02
浅绿色	39.49**	52.98**	35.77**	40.25**	20.85*	20.83*	17.83	17.81	13.34
绿色	44.01**	62.07**	71.01**	45.66**	45.64**	34.53**	43.19**	31.08**	23.30*
饱和度									
低饱和度	30.16**	60.82**	73.89**	57.66**	48.17**	13.96	33.22**	32.60**	11.36
中等饱和度	30.17**	61.96**	73.85**	58.72**	49.70**	13.88	33.99**	33.42**	11.29
高饱和度	23.69*	27.41**	45.35**	42.89**	47.21**	10.12	23.07*	23.15*	14.86
明度									
低明度	18.70	10.63	8.94	13.63	8.35	4.82	14.56	17.03	11.18
中等明度	27.72**	10.31	13.97	26.96**	19.65	12.94	25.97**	38.75**	12.58
高明度	20.34*	11.57	13.24	16.91	17.82	7.82	21.51*	36.07**	4.11

注：表中数字为 Kruskal-Wallis 检验的统计量；** 代表 $P<0.01$；* 代表 $P<0.05$。

2.2.2 饱和度指数特征及其月变化

楝叶吴萸林、润楠林和木荷林的低饱和指数较高，分别为 78.26%、72.66%和 71.83%；樟树林中等饱和度指数最高，为 38.88%；黧蒴锥林的高饱和度指数较高，为 2.22%。从不同月份来看，黧蒴锥林和鹅掌柴林的饱和度指数无显著变化（$P>0.05$），其余林分的饱和度指数在不同月份间均存在显著差异（$P<0.05$），且峰值多出现在夏季，植物旺盛生长阶段（图 3、表 6）。

2.2.3 明度指数特征及其月变化

桉树林和黧蒴锥林低明度指数较大，分别为 32.46%和 29.42%；润楠林中等明度指数较大，为 58.91%；荔枝林高明度指数较大，为 25.44%。从明度指数月变化来看，相思林、润楠林和楝叶吴萸林变化强烈，木荷林仅中等明度指数月变化显著（$P<0.01$），其中 3—5 月和 11—12 月中等明度指数较大，而 7 月高明度指数较大（图 4、表 6）。

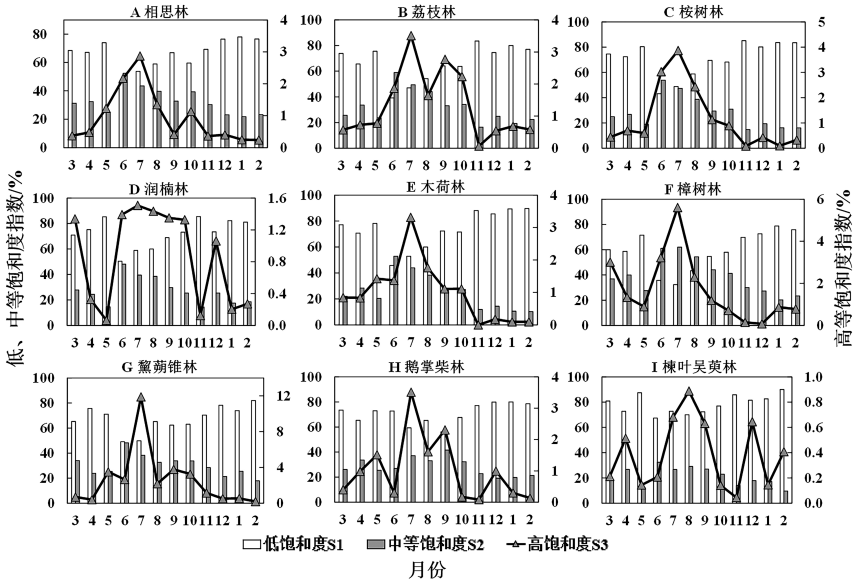


图 3 不同林分饱和度指数的月变化

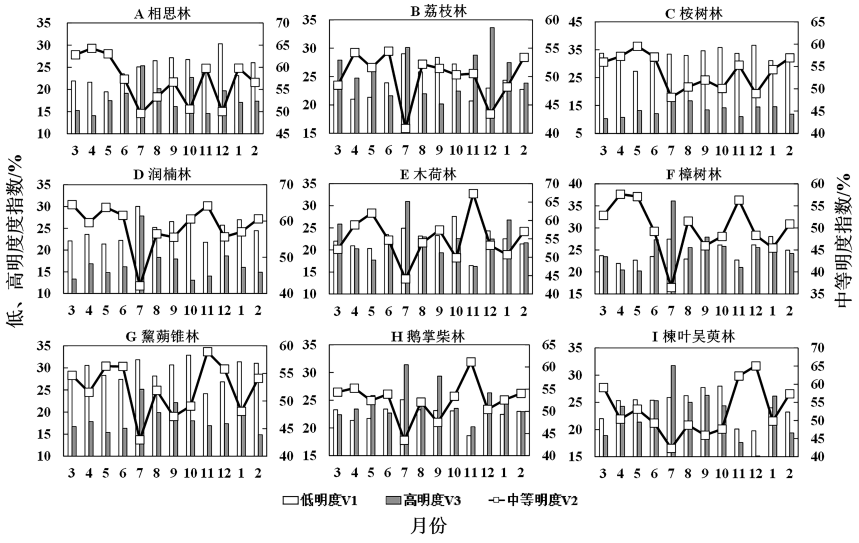


图 4 不同林分明度指数的月变化

2.3 不同林分色彩格局特征的月变化

2.3.1 不同林分间色彩斑块指数的差异

由图 5 可知，所有色彩斑块景观格局指数在不同林分间均存在显著差异（$P<0.01$）。其中，楝叶吴萸林和鹅掌柴林 c_PD、c_ED 和 c_SPL 值较大，而 c_LPI 值较小，说明这 2 种林分的色彩斑

块破碎化程度高；桉树林、相思林和樟树林 c_FRAC 值较大，说明这 3 种林分的色彩斑块形状更为复杂；桉树林和荔枝林 c_SHDI 值较大，说明这 2 种林分色彩构成更为丰富。

2.3.2　色彩斑块指数的月变化

由图 6 可知，荔枝林和楝叶吴萸林所有色彩斑块指数月变化显著（$P<0.05$）：6 月和 12 月的 c_PD、c_ED、c_SPL 和 c_SHDI 值较小，c_LPI 值较大，即该时期这 2 种林分色彩破碎化程度和多样性均较小，表明低破碎化程度所反映的同质化效应不利于荔枝林和楝叶吴萸林色彩斑块多样性的维持；6、10 和 11 月的 c_FRAC 值较大，即该时期这 2 种林分斑块形状更复杂。

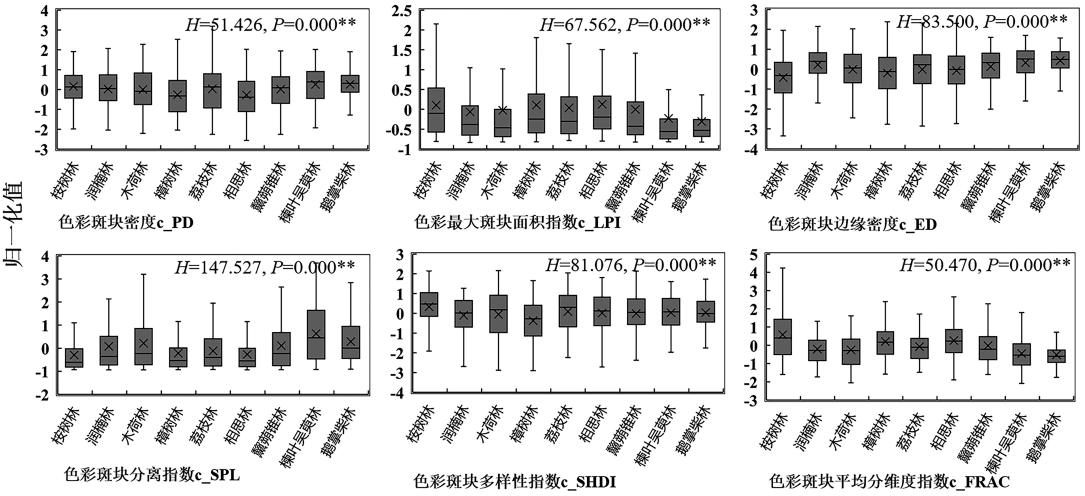


图 5　不同林分的色彩斑块指数差异

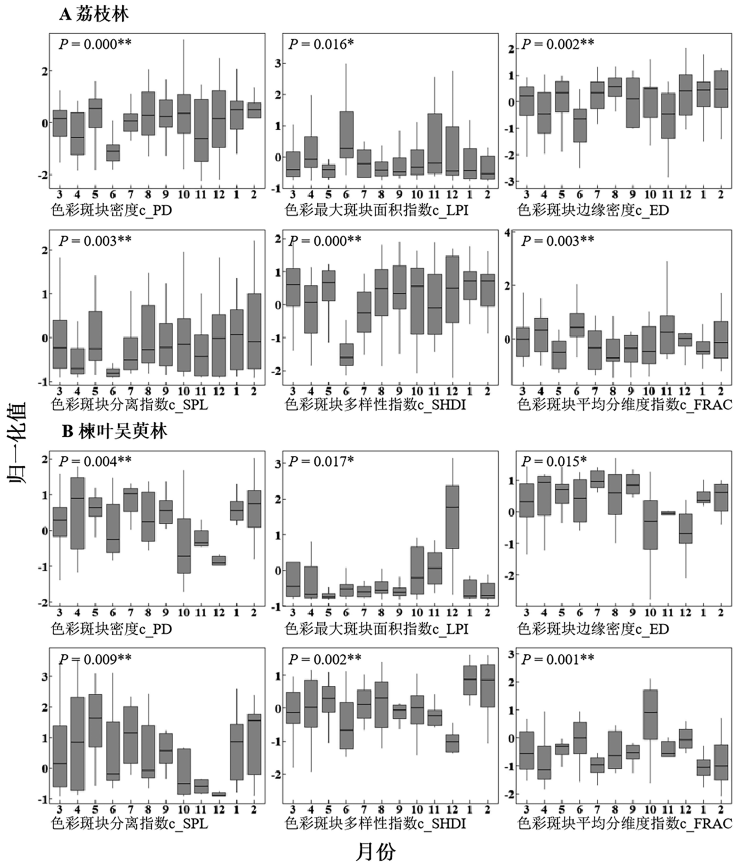


图 6　荔枝林和楝叶吴萸林色彩斑块指数的月变化

由图 7 可知，相思林、樟树林和黧蒴锥林月变化显著的色彩斑块指数均有 5 个。在植物旺盛生长期（6 月）和衰弱期（11 月），c_PD、c_SPL 和 c_SHDI 值均较小，即色彩斑块的破碎化程度和多样性水平均较低；同时相思林和樟树林的 c_FRAC值较大，即色彩斑块形状最为复杂。这表明森林色彩斑块的空间连续性较好时，植物间的相互作用多表现为色彩斑块形状的复杂性，而非种类的多样性。

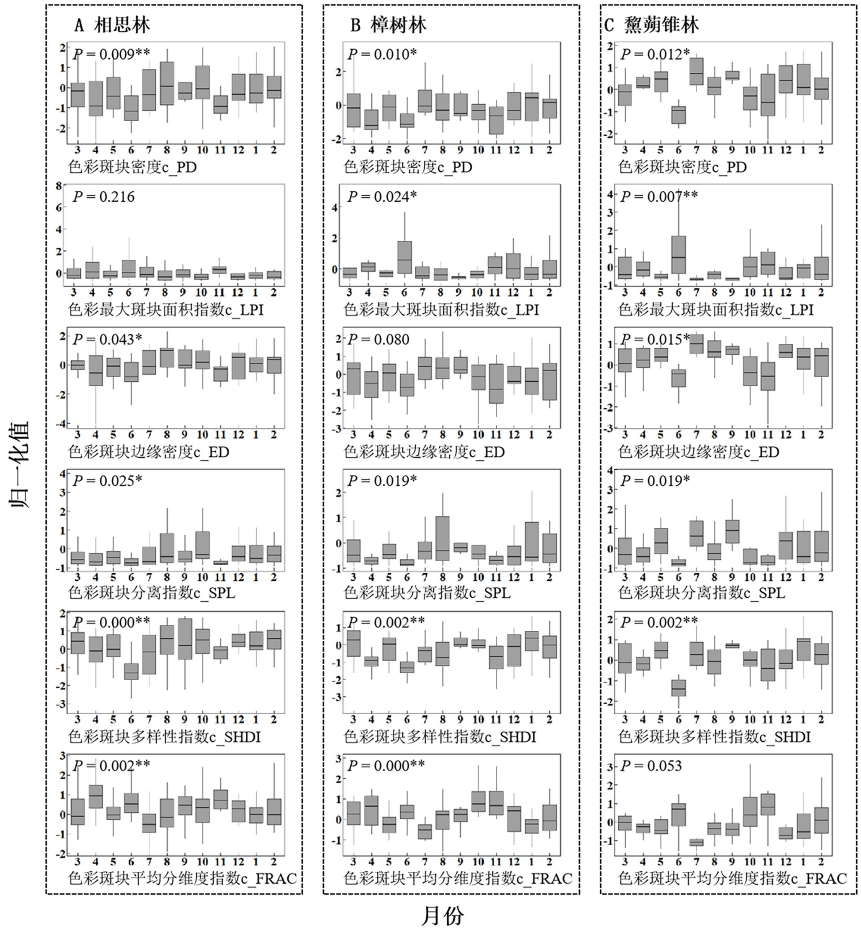


图 7 相思林、樟树林和黧蒴锥林色彩斑块指数的月变化

由图 8 可知，桉树林月变化显著的色彩斑块指数有 4 个。6 月，c_PD、c_ED 和 c_SHDI 值较小，c_FRAC 值较大，说明桉树林在植物旺盛生长期不同植物间呈现同步性色彩变化，使得森林色彩斑块破碎化程度和多样性水平降低，而形状复杂性有所提升。

由图 9 可知，润楠林、木荷林和鹅掌柴林月变化显著的色彩斑块指数有 3 个。其中，润楠林和木荷林的色彩斑块指数变动幅度较小，6 月色彩斑块的破碎化程度和多样性水平较低，而形状复杂性较高；鹅掌柴林色彩斑块指数变动幅度较大，6 月和 11 月色彩斑块的破碎化程度和多样性水平较低，而形状复杂性较高。

3 讨论

3.1 不同林分间色彩构成特征差异

荔枝林、桉树林和润楠林的色彩种类丰富且季节性变化强烈，这可能与其内部植物物种多样性较高且不同物种呈现不同色彩、同一物种呈现多种色彩有关[5]。相比之下，鹅掌柴林色彩相对单一且季节性变化弱，这主要归因于鹅掌柴叶片革质、色彩稳定且不易受到外界环境的影响，同时其花序和果实较小且色彩不够鲜明。各林分色彩数量的月变化均呈现“先下降，后上升”趋势，这与植物自身物候特征有关。夏季温度高、光照强，植物多处于旺盛生长期，叶片中叶绿素

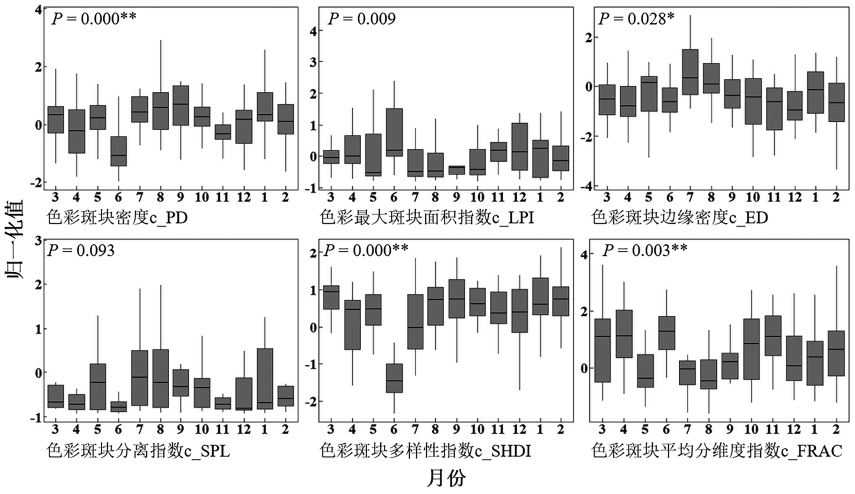


图 8　桉树林色彩斑块指数的月变化

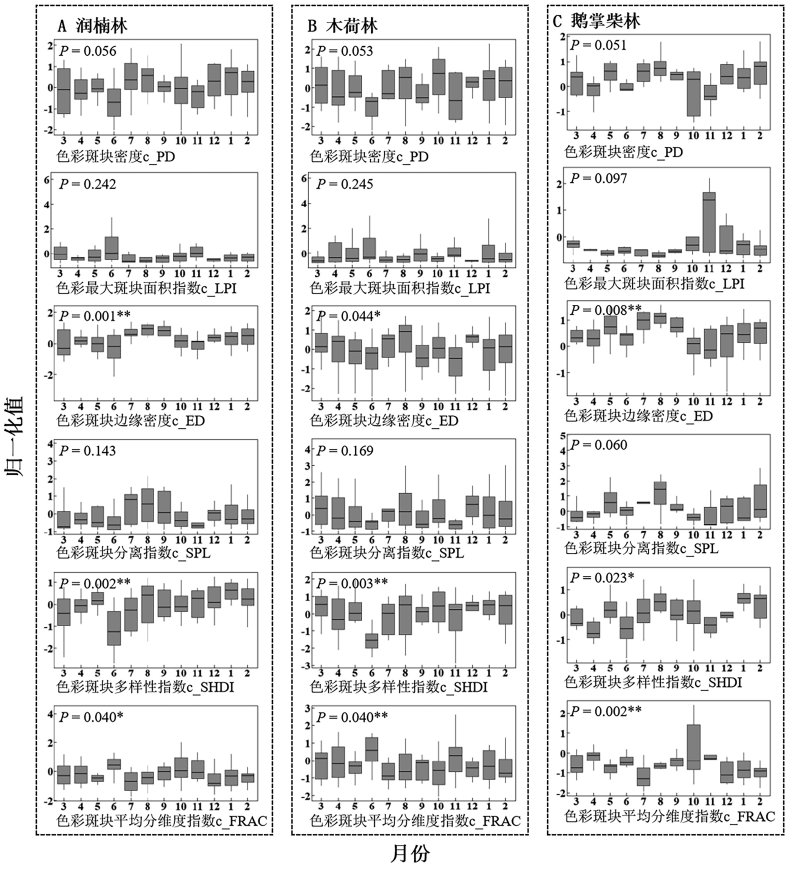


图 9　润楠林、木荷林和鹅掌柴林色彩斑块指数的月变化

含量增加，绿色占据主导地位[17]，减少了其他色彩的出现，导致夏季森林色彩数量最少；冬、春季是植物新叶萌发和开花的集中期，森林中色彩变化明显且多样，因而该时期色彩数量较多。

3.2　不同林分间色彩属性特征差异

色相作为区分森林色彩的主要依据[18]，在不同林分间的呈现主要受物种组成和植物自身物候特征的影响。桉树林、相思林和木荷林黄色和橙色占比突出，说明这 3 种林分植物体内类胡萝卜素含量相对较多；而荔枝林和楝叶吴萸林黄绿色和浅绿色占比突出，尤其是冬、春季叶片更新期，植物体内叶绿素与类胡萝卜素的比例发生了变化，但叶绿素仍处于主导地位[19]。以新叶萌发为起点、叶片衰老直至掉落为终点，珠三角地区森林

经历了由橙到黄，再过渡至黄绿和浅绿色，随后进入绿色阶段，最终又回归至黄绿色和黄色的渐变性过程。这与以往研究中“浅绿-绿-黄绿-黄-橙”的强烈性转变不同[6]，体现了该地区以常绿树种为主的特点。

植物色彩的饱和度和明度主要受其叶片生理特征和物候特征的影响[20]。饱和度主要与叶片内部结构及色素含量有关，黧蒴锥叶片结构紧密且覆有蜡质层，这不仅有助于保护叶绿素免受环境因素的破坏，也提高了其对光的吸收效率，进而维持了较高的色彩饱和度[21]；而楝叶吴萸和润楠叶片含有较高的类黄酮等次级代谢产物，虽赋予叶片独特的色彩，但对光的吸收和反射率低，从而降低了其色彩饱和度。明度则与叶片表面粗糙程度有关[22]，荔枝、润楠等树种叶片表面光滑，使得其对光的反射率高，从而提高了森林色彩明度。此外，长期暴露在高饱和度和高明度环境中，容易引起视觉疲劳，本研究结果表明春季和秋末更适宜珠三角森林景观的观赏。

3.3 不同林分间色彩斑块景观格局特征差异

植物自身颜色、大小和形状的差异直接影响了森林色彩斑块的构成，而物种多样性和物候变化决定了色彩斑块的复杂性和异质性[6]，本研究进一步验证了这一结论。楝叶吴萸林和鹅掌柴林色彩斑块破碎化程度高，表明其植物群落空间分布较为零散且多样性高，其原因可能为：1）冠层植物分层分布等空间结构的复杂性，加剧了色彩斑块的破碎化；2）物种间竞争，导致光照、水分和营养等资源分布不均，促使植物群落形成小规模的资源利用单元[23]。桉树林、相思林和樟树林色彩斑块形状更为复杂，这与树冠形态的多样性有关，树冠的层次性、枝叶的密集程度及分布模式等共同影响了光线的穿透与反射，形成更为复杂的色彩斑块边界[24]。荔枝林和桉树林色彩斑块多样性强，这与植物自身特性、空间结构复杂性以及季节性变化等因素有关。此外，植物生长旺盛期（6 月），森林色彩斑块空间连续性较好，植物间的相互作用多表现为色彩斑块形状的复杂性，而非种类的多样性，表明该时期珠三角地区不同植物呈现同步性的色彩变化。

4 结论

1）不同林分的色彩种类构成存在差异。珠三角林冠色彩共涉及 44 种，其中荔枝林、桉树林和润楠林季节性变化强烈，而黧蒴锥林和鹅掌柴林季节性变化弱。春季，相思林、荔枝林、木荷林和樟树林色彩丰富；夏季，相思林、荔枝林、桉树林和樟树林色彩丰富；秋季，荔枝林、桉树林和樟树林色彩丰富；冬季，荔枝林、木荷林和樟树林色彩丰富。

2）不同林分的色彩属性特征均存在显著差异。桉树林、相思林和木荷林的橙、黄色占比大，荔枝林和楝叶吴萸林的黄绿和浅绿色占比大；黧蒴锥林饱和度较高，荔枝林明度较高。冬、春季非绿色指数增多，夏季饱和度和明度较高。

3）不同林分间的色彩斑块景观格局特征均存在显著差异。荔枝林和桉树林斑块多样性高，楝叶吴萸林和鹅掌柴林斑块破碎化程度高，而桉树林、相思林和樟树林斑块形状复杂。植物生长旺盛期 6 月和衰弱期 10—12 月，色彩斑块的破碎化程度和多样性指数较小，但斑块形状较复杂，表明珠三角典型林分色彩斑块的空间连续性较好时，植物间相互作用表现为色彩斑块形状的复杂性，而非种类的多样性。

参考文献

[1]张昶，韩文静，王成.城镇河岸带植物色彩对视觉疲劳的影响[J].中国城市林业，2021，19(6)：8-14.

[2]王子，李明阳.风景林四季景观色彩规划方法研究：以紫金山为例[J].林业资源管理，2017(增刊 1)：70-76.

[3]HAN W J，ZHANG C，WANG C，et al.Impact of forest parkification on color authenticity[J].Forests，2023，14(9)：1799.

[4]张志，张梦霞，申欢欢，等.关帝山云杉次生林冠层结构对天然更新的影响[J].生态学杂志，2023，42(5)：1043-1048.

[5]张元康，王秀荣，杨婷，等.贵阳市常见园林植物春季新叶色彩属性变化特征研究[J].西北林学院学报，2019，34(6)：208-213.

[6]张喆.基于公众响应评价的森林色彩特征及其影响研究：以四川九寨沟秋季森林为例[D].北京：中国林业科学研究院，2017.

[7]马冰倩，徐程扬，崔义.八达岭秋季景观整体色彩组成对美景度的影响[J].西北林学院学报，2018，33(6)：258-264.

[8]贾娜.林木色彩量化与观赏效应研究[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.

[9]魏胜蓉,何婷婷,付迎春,等.珠三角国家森林城市群生态安全格局变化与空间优化识别研究[J].生态学报,2024,44(18):8094-8109.
[10]翟石磊.珠三角城市区典型森林植被的群落结构及功能的对比研究[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
[11]张小晶,陈娟,李巧玉,等.基于视觉特性的川西亚高山秋季景观林色彩量化及景观美学质量评价[J].应用生态学报,2020,31(1):45-54.
[12]HAN W J,ZHANG C,WANG C,et al.Constructing a forest color palette and the effects of the color patch index on human eye recognition accuracy[J].Forests,2023,14(3):627.
[13]ZHANG Z,QIE G F,WANG C,et al.Relationship between forest color characteristics and scenic beauty: case study analyzing pictures of mountainous forests at sloped positions inJiuzhai valley,China[J].Forests,2017,8(3):63.
[14]刘畅,刘亚,刘海轩,等.游憩型城镇景观林林内景观斑块类型特征研究[J].西北林学院学报,2016,31(4):305-311.
[15]曹瑜娟,徐程扬,任雅雪,等.基于敏感度排序的风景林色彩格局指数筛选[J].林业科学,2021,57(8):1-12.
[16]庄立跃,陈瑜萍,范丽雅,等.基于 OMI 卫星数据和 MODIS 土地覆盖类型数据研究珠江三角洲臭氧敏感性[J].环境科学学报,2019,39(11):3581-3592.
[17]吴新辉,郭钰滢,夏楠,等.中国东部城市森林阔叶树种叶绿素含量空间特征及其影响因素[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(6):910-916.
[18]秦一心,方亮,张龙,等.森林色彩三要素独立变化对观赏效应的影响[J].中国城市林业,2016,14(3):26-32.
[19]宁秋燕,冯亚颀,何卫中,等.茶树种质叶片色素含量与叶色参数的关系[J].西北植物学报,2024,44(6):870-879.
[20]张喆,郄光发,王成,等.多尺度植物色彩表征及其与人体响应的关系[J].生态学报,2017,37(15):5070-5079.
[21]王艺恒,孙昆,温喆,等.基于色彩参数和高光谱特征的针叶树种色素含量预估[J].光谱学与光谱分析,2022,42(2):537-543.
[22]NAIRN J J,FORSTER W A.Methods for evaluating leaf surface free energy and polarity having accounted for surface roughness[J].Pest Management Science,2017,73(9):1854-1865.
[23]WU J N,ZENG HH,ZHAO F,et al.Plant hydrological niches become narrow but stable as the complexity of interspecific competition increases[J].Agricultural and Forest Meteorology,2022,320:108953.
[24]赵凯,李金航,徐程扬.侧柏人工林林分结构与色彩斑块间的耦合关系[J].北京林业大学学报,2019,41(1):82-91.

(上接第 137 页)

[26]杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.
[27]武小炎.流域生态系统服务价值评估及其水文响应机制研究[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
[28]欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):10-13.
[29]张文婷,任巧慧,胡泳茵.基于“敏感性-重要性-连通性”框架的神木市生态网络规划[J].中国城市林业,2024,22(1):53-61.
[30]YUAN S F,ZHU C M,YANG L X,et al.Responses of ecosystem services to urbanization-induced land use changes in ecologically sensitive suburban areas in Hangzhou,China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(7):1124.
[31]李国煜,林丽群,伍世代,等.生态源地识别与生态安全格局构建研究:以福建省福清市为例[J].地域研究与开发,2018,37(3):120-125.
[32]潘越,龚健,杨建新,等.基于生态重要性和 MSPA 核心区连通性的生态安全格局构建:以桂江流域为例[J].中国土地科学,2022,36(4):86-95.
[33]杨学龙,叶秀英,赵小敏,等.基于 MSPA 与 MCR 的生态廊道构建及优化研究:以南昌市新建区为例[J].地域研究与开发,2023,42(3):85-91.
[34]李思良.国土空间规划背景下秦岭北麓长安区段空间管控区划研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
[35]董毓伊,冯秀丽,黄俊杰,等.国土空间生态保护修复重点区域识别研究:以宁波市为例[J].中国土地科学,2023,37(6):96-105.
[36]王越,李炆颖,曾先,等.沈阳经济区土地利用要素性冲突空间多尺度作用机理[J].经济地理,2022,42(3):231-239.
[37]LIU X P,ZHANG Z,LI M X,et al.Spatial conflict simulation of land-use based on human-land-landscape elements intercoordination: a case study in Tianjin,China[J].Environmental Monitoring and Assessment,2022,194(4):317.