

DOI: 10.5846/stxb201912202746

符强, 王楠, 肖曼, 习靓靓, 邵毅贞, 贾宏汝, 陈云, 袁志良, 叶永忠. 白云山国家森林公园不同人为干扰强度的群落冠层结构和光照特征. 生态学报, 2021, 41(19): 7830-7837.

Fu Q, Wang N, Xiao M, Xi J J, Shao Y Z, Jia H R, Chen Y, Yuan Z L, Ye Y Z. Canopy structure and illumination characteristics of different man-made interference communities in Baiyun Mountain National Forest Park. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7830-7837.

白云山国家森林公园不同人为干扰强度的群落冠层结构和光照特征

符强¹, 王楠¹, 肖曼¹, 习靓靓¹, 邵毅贞¹, 贾宏汝², 陈云^{1, 3, *}, 袁志良^{1, 3}, 叶永忠¹

1 河南农业大学, 郑州 450002

2 河南财政金融学院, 郑州 450046

3 河南省伏牛山南北过渡带森林生态系统野外科学观测研究站, 郑州 450002

摘要:为探究森林冠层结构与林下光照的变化规律及其相关性,在河南省白云山国家森林公园选取人工林、择伐林、皆伐林和老龄林建立四块面积为 1 hm²(100 m×100 m)的固定监测样地,利用半球面影像技术获取冠层结构及林下光照数据。研究发现:1)随着人为干扰强度降低,冠层覆盖度与叶面积指数呈增加趋势,林下散射辐射与直接辐射呈减少趋势;2)择伐林冠层覆盖度与叶面积指数最大,平均叶倾角与透光比最小,林下光照(直接辐射、散射辐射)与冠层覆盖度和叶面积指数都呈显著负相关,林下散射辐射与冠层覆盖度和叶面积指数的负相关关系最强;3)处于不同干扰强度的群落由于冠层结构的差异,形成了不同群落内特定的光照环境。研究结果丰富了暖温带-亚热带生态过渡区森林冠层结构与林下光照动态变化研究资料,同时也为该区域森林的恢复与重建等提供科学的依据。

关键词:人为干扰;冠层结构;林下光照;干扰梯度;光照特征

Canopy structure and illumination characteristics of different man-made interference communities in Baiyun Mountain National Forest Park

FU Qiang¹, WANG Nan¹, XIAO Man¹, XI Jingjing¹, SHAO Yizhen¹, JIA Hongru², CHEN Yun^{1, 3, *}, YUAN Zhiliang^{1, 3}, YE Yongzhong¹

1 Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Hean Finance University, Zhengzhou 450046, China

3 Field Scientific Observation and Research Station of Transitional Zone of South and North in the Funiu Mountains in Henan, Zhengzhou 450002, China

Abstract: In order to explore the variation rule and correlation between forest canopy structure and understory light, four fixed monitoring sample plots with area of 1 hm²(100 m×100 m) were selected in Baiyun Mountain National Forest Park, Henan province, including Artificial forest, Twice-cut forest, Once-cut forest and Undisturbed forest in this study. The data of canopy structure and understory illumination were obtained by hemispherical imaging. Results show that 1) with the intensity of man-made interference decrease, the canopy coverage and leaf area index increased, while the scattered radiation and direct radiation decreased. 2) The canopy coverage and leaf area index of Twice-cut forest were the largest, but mean leaf angle and light transmittance were the smallest. The understory light (direct radiation and scattered radiation) were significantly negatively correlated with canopy coverage and leaf area index, while the understory scattered radiation had the strongest negative correlation with canopy coverage and leaf area index. 3) Because of the difference of canopy structure, the communities in different man-made interference stages formed specific illumination environment in different

基金项目:河南农业大学青年英才项目(111/30500744);河南省自然科学基金青年基金(212300410153);河南省青年人才托举工程项目(2020HYTP037);河南省基本科研业务费资助(2021JB02014)

收稿日期:2019-12-20; 网络出版日期:2021-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyecology@163.com

communities. The results of this study enrich the research data of forest canopy structure and understory illumination dynamics in the transition zone of warm temperate-subtropical transition region, and provide scientific basis for forest restoration and reconstruction in this region.

Key Words: man-made interference; canopy structure; understory lighting; disturbance gradient; illumination characteristic

冠层结构与林下光照空间分布的关系一直是森林生态学家研究的热点^[1-4]。太阳辐射深刻影响着林下环境的异质性^[5],由于森林群落在物种组成及冠层结构等方面的差异会导致林下光照环境的不同^[6-9],从而影响林下植物的生长和植物种类的更新^[10-15]。因此,量化林下光照数据有助于深入了解森林动态变化规律,为森林保护策略的制定提供科学依据。

有研究表明,冠层结构对林下光环境异质性起着至关重要的作用^[16-19]。冠层结构的特征决定了森林生态系统能量循环的过程和强度,冠层结构形成的光环境也强烈影响着林下植物群落的分布格局。林下光环境异质性可以直接影响植物的更新和演替,影响先锋和后续植物的生活史策略^[20-22]。因此,研究植物群落冠层结构和林下光环境特征,将有助于对物种共存机制的理解,对林下植被恢复具有重要意义。分析不同人为干扰程度群落林下光照环境的差异,在一定程度上能够说明不同冠层结构对林下物种光环境特征的影响,为森林生态系统的恢复、合理经营提供一定的科学依据^[23]。

大型森林固定监测样地平台是一个规范科学的多尺度综合监测体系^[24],目前基于森林动态监测样地的研究多关注于土壤、地形等环境因素,森林群落冠层结构和光照特征的研究有限,基于大型森林固定监测样地对植物冠层结构与光环境特征探究,能够在多空间尺度和时间尺度上全面揭示不同干扰强度下群落冠层结构与光照环境特征的变化规律及其相关性。

白云山国家森林公园处于南暖温带向北亚热带过渡区域,拥有极其丰富的野生动植物资源。不少学者针对森林公园内大型真菌物种多样性与环境的关系^[25]、植物群落特征及主要乔木空间分布格局^[26]、温带落叶阔叶林群落特征、次生落叶阔叶林群落种类组成及其径级结构与空间分布格局^[27]、落叶阔叶林群落系统发育结构及其构建机制^[28]等方面进行了探究,而对白云山国家森林公园的森林冠层结构与林下光环境的特征还不了解。本研究以白云山国家森林公园森林群落为研究对象,分别选取了人工林,择伐林,皆伐林,老龄林四种森林群落作为实验样地,采用半球图像技术^[29-35]来测量叶面积指数、冠层覆盖度以及林下直接辐射和散射辐射。探索冠层结构与林下光照随着干扰强度的变化规律及其相关性,研究成果有助于丰富森林冠层结构与林下光照动态变化研究资料,为该区域森林的恢复与重建等提供科学的依据。

1 研究区域概况

白云山国家森林公园位于河南省洛阳市嵩县,地理坐标为北纬 33°38'—33°34',东经 111°48'—111°52'。公园总面积达 168 km²,处于南暖温带向北亚热带过渡区域,横跨长江、黄河及淮河三大流域。该区域森林覆盖率高达 98.5%,区域内平均海拔为 1500 m,年总降雨量达到 1200 mm。优越的地理位置和特殊的气候条件,形成了白云山国家森林公园独特的生态环境,从而孕育了极其丰富的野生动植物资源。据调查,该区域有植物 1991 种,其中保护植物 21 科 26 种,属国家一级重点保护的有红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *Chinensis*)、南方红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *chinensis*),二级保护植物有秦岭冷杉(*Abies chensiensis*)、大果青杆(*Picea neoveitchii*)、香果树(*Emmenopterys henryi*)、连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)、水青树(*Tetracentron sinense*)等,另有省级重点保护的有 45 种^[27]。

2 材料与方法

2.1 样地设置

以 CTFS 样地的建设标准^[36-37]为参考,于 2016 年,在河南省白云山国家森林公园按照人为干扰强度,选

择不同阶段木本植物群落设置 4 块 1 hm^2 ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$) 森林动态监测样地:

(I) 人工林(简称样地 I): 50a 皆伐过后, 人工种植的日本落叶松林。样地内共有木本植物 43 种, 总计 1165 株。落叶松(*Larix gmelinii*) 是样地内的优势物种。

(II) 择伐林(简称样地 II): 50a 前皆伐, 后面 30a 进行择伐抚育, 林龄为 30a。样地内共有木本植物 47 种, 总计 3065 株。华山松(*Pinus armandii* Franch)、锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*) 和三桠乌药(*Lindera obtusiloba* Blume) 是样地群落内的主要物种。

(III) 皆伐林(简称样地 III): 50a 前皆伐后任由自然更新恢复, 林龄为 50a。样地内木本类植物共有 57 种, 总计 4301 株。锐齿槲栎、华山松、连翘(*Forsythia suspense*) 和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr) 为样地主要物种。

(IV) 老龄林(简称样地 IV): 超过 100a 没有人为干扰的林地, 林龄为 100a 以上。样地内共有木本植物 52 种, 总计 2490 株。秦岭木姜子(*Litsea tsinlingensis*)、锐齿槲栎、湖北花楸(*Sorbus hupehensis*) 和华山松是样地的主要物种。

2.2 数据采集

于 2019 年 7 月中旬, 采用 SLM9-UM-1.2 冠层分析仪(Delta-T Devices Co, Ltd) 采集林冠层和光照数据。使用三脚架将数码单反相机固定在距离地面 1.3 m 的高度, 用 180 度鱼镜头垂直向上拍照取像, 尽可能在清晨、黄昏或阴天的时候去拍照采集光照数据, 从而避免阳光直射造成数据的不准确性。在每个 1 hm^2 样地中的 100 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 子样方的中心点设点拍照, 每次均拍摄 3 张照片, 最后选取天空和树叶之间对比度最高的照片作为有效照片。

采用 HemiView 林地冠层数字分析系统软件, 对选取的有效照片进行处理, 可以得到叶面积指数、冠层覆盖度等多种冠层参数以及林下之神辐射、散射辐射等数据。冠层结构由冠层覆盖度、叶面积指数、透光比以及平均叶倾角来反映, 林下光照参数包括冠层下的直接辐射, 冠层下的散射辐射。

2.3 数据分析

对 4 个样地的冠层覆盖度, 叶面积指数, 透光比, 平均叶倾角, 林下散射辐射, 林下直接辐射分别进行方差分析, 并进行多重比较; 为描述光照环境在样地中的分布情况, 采用 R 语言 ggplot2 程序包绘制热力图展现; PCA 分析通过 R 语言 vegan 程序包中 RDA 函数实现。

3 结果

3.1 不同干扰强度下群落间光照因子间关系的差异

从图 1 可以看出不同干扰强度的林下光照环境在样地中的空间分布格局, 其中冠层覆盖度、透光比、叶面积指数以及平均叶倾角的空间分布格局较相似。从图 2 可以看出冠层下的散射辐射和直接辐射在空间上分布比较相似。

3.2 林冠结构与林下光环境分析

分析结果显示, 择伐林与人工林、皆伐林、老龄林之间冠层覆盖度差异极显著, 择伐林的冠层覆盖度最大且空间变异最小, 人工林的冠层覆盖度空间变异性最大。择伐林与老龄林之间叶面积指数差异显著, 择伐林的叶面积指数最大且空间变异最大, 皆伐林空间变异最小。择伐林与人工林、皆伐林、老龄林之间透光比差异极显著, 且择伐林透光比空间变异最大。人工林和择伐林以及老龄林平均叶倾角均差异极显著, 择伐林平均叶倾角最小, 皆伐林平均叶倾角空间变异最小。人工林、老龄林和择伐林之间散射辐射差异显著, 人工林、老龄林和择伐林、皆伐林之间直接辐射差异极显著(图 3)。

不同人为干扰强度的森林群落光环境主成分分析如图 4 所示。PCA 分析结果显示 4 个不同干扰强度的群落光照特征和冠层结构差异显著; PC1, PC2 的解释量分别为 0.7226, 0.2258, 累计解释量为 0.9485, 这两个主成分承载了样地内光照环境的主要空间变异。

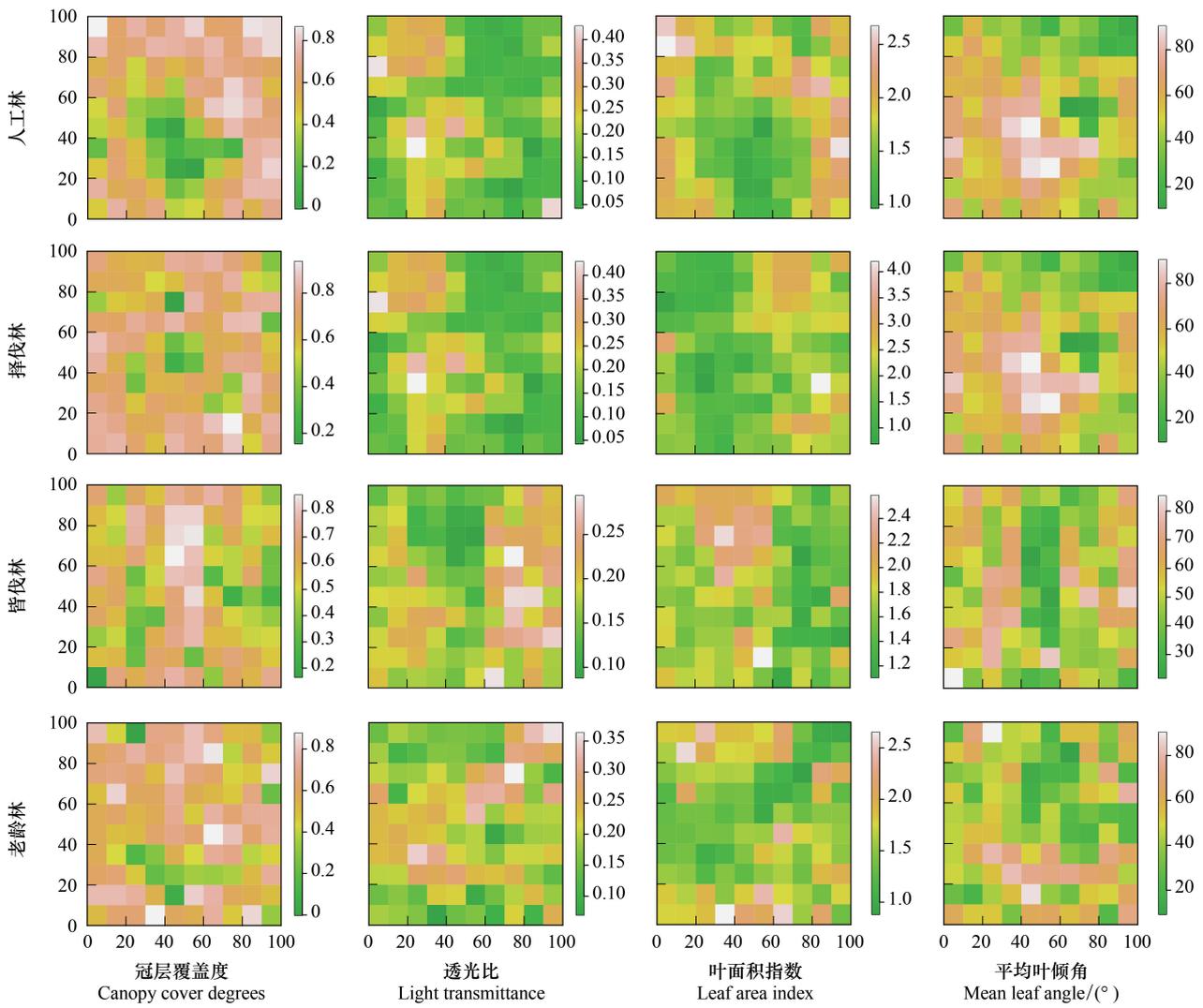


图 1 不同人为干扰强度下冠层结构分布格局

Fig.1 Canopy structure at different man-made interference stages

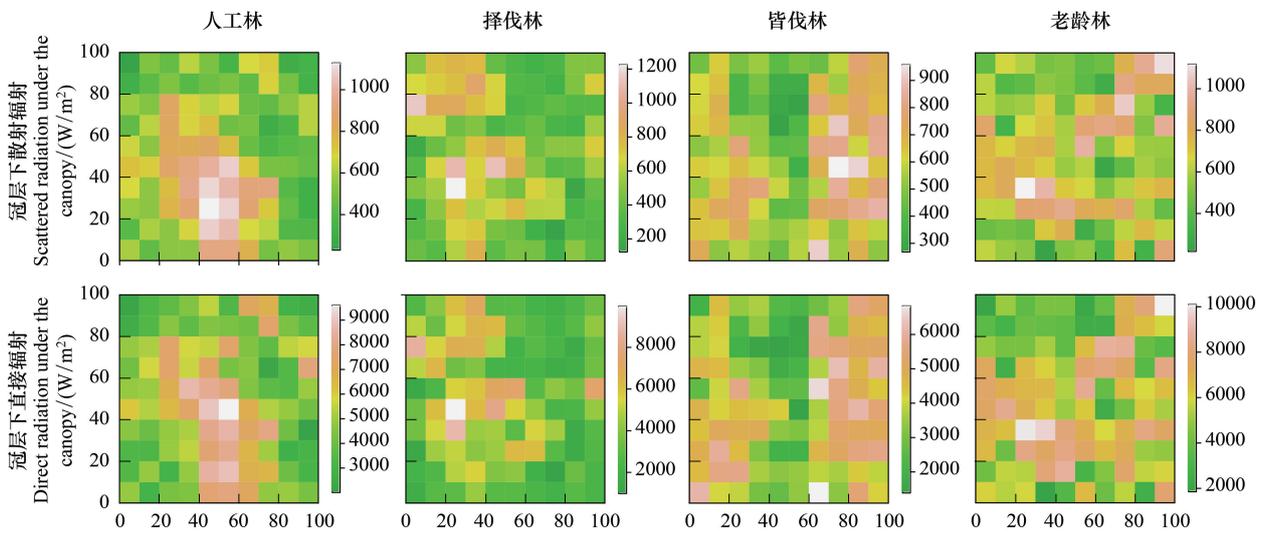


图 2 不同人为干扰强度林下光照分布格局

Fig.2 Undergrowth illumination at different man-made interference stages

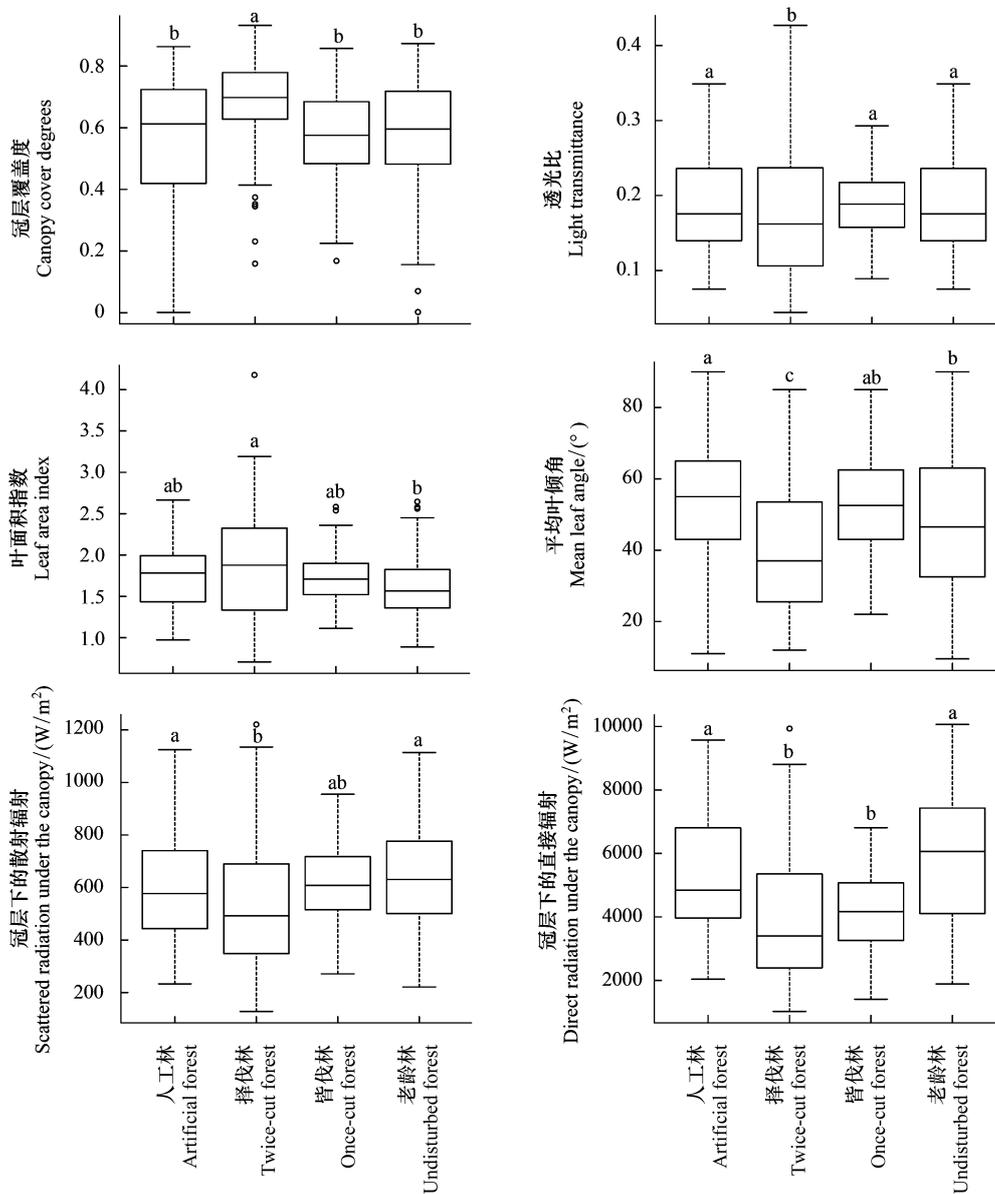


图3 林冠结构与林下光照的差异

Fig.3 The difference between canopy structure and understory illumination

有相同字母表示不显著,不相同字母表示显著,显著水平 $P=0.05$

3.3 不同人为干扰强度群落间光照因子间关系的差异

森林冠层覆盖度、叶面积指数与林下光照均呈现显著相关关系,林下光照(直接辐射、散射辐射)与冠层覆盖度之间均呈负相关且极显著($P<0.001$) (图5)。其中,人工林群落下散射辐射与冠层覆盖度相关关系最强($P<0.001, R^2=0.845$),择伐林群落下散射辐射与冠层覆盖度相关关系最弱($P<0.001, R^2=0.585$);皆伐林群落林下直接辐射与冠层覆盖度相关关系最强($P<0.001, R^2=0.602$),择伐林群落林下直接辐射与冠层覆盖度相关关系最弱($P<0.001, R^2=0.462$)。

林下光照(直接辐射、散射辐射)与透光比之间均呈正相关且极显著($P<0.001$) (图5)。择伐林群落下散射与透光比相关性最强($P<0.001, R^2=0.967$),老龄林群落下散射与透光比相关性相对较弱($P<0.001, R^2=0.949$);人工林群落下直接辐射与透光比相关性最强($P<0.001, R^2=0.602$),老龄林群落下直接辐射与透光比相关性最弱($P<0.001, R^2=0.735$)。

林下光照(直接辐射、散射辐射)与叶面积指数都呈负相关且极显著($P < 0.001$)(图 5)。其中,人工林群落下直接辐射与叶面积指数相关关系最强($P < 0.001$, $R^2 = 0.691$),皆伐林群落下直接辐射与叶面积指数相关关系最弱($P < 0.001$, $R^2 = 0.528$);人工林群落下散射辐射与叶面积指数相关关系最强($P < 0.001$, $R^2 = 0.765$),皆伐林群落下散射辐射与叶面积指数相关关系最强($P < 0.001$, $R^2 = 0.543$)。

平均叶倾角与林下光照呈显著正相关关系($P < 0.001$)(图 5)。人工林群落下平均叶倾角与林下散射辐射相关性最强($P < 0.001$, $R^2 = 0.519$),择伐林群落下平均叶倾角与林下散射辐射相关性最弱($P < 0.001$, $R^2 = 0.004$);皆伐林群落下平均叶倾角与林下直接辐射相关性最强($P < 0.001$, $R^2 = 0.324$),择伐林群落下平均叶倾角与林下直接辐射相关性最弱($P < 0.001$, $R^2 = 0.005$)。

4 结论与讨论

本研究借助半球成像技术对河南省白云山国家森林公园不同干扰强度的森林冠层结构与林下光照环境进行探索,得到了白云山国家森林公园冠层下光照环境的动态和空间分布规律。丁圣彦等研究表明随着森林群落演替的变化,冠层覆盖度以及叶面积指数会随之增大^[14],而在本研究中老龄林冠层覆盖度与叶面积指数并非最大,这可能是由于老龄林中部分群落步入衰败期,造成叶面积指数与冠层覆盖度减小。此外,森林群落在选择性砍伐过后,未被伐掉的乔木不断扩展其冠幅填补了在砍伐过程中被打开的林冠空隙^[10],因此,择伐林冠层覆盖度、叶面积指数最大,平均叶倾角最小。

在不同的干扰强度下群落两个主成分承载了样地内光照环境的主要空间变异,不同干扰强度下群落的冠层结构和光环境特征存在显著的差异。宋豫秦等研究发现,冠层覆盖度及叶面积指数均随着正向群落演替的进行逐渐增加^[38-39]。李根柱等研究发现,林冠结构的形态,大小及其分布情况都会影响到树冠冠层对太阳光的捕获^[40],并且随着演替的不断发展,森林群落的上层树冠会变得更加密集且复杂,从而会影响到林下直射光与散射光的大小,影响冠层下方植物对光照的吸收。本研究中随着干扰强度的变化冠层覆盖度及叶面积指数均增加,林下散射辐射与直射辐射均减小,与宋豫秦以及李根柱等研究结果一致。

随着演替变化,森林群落冠层结构变得越来越郁闭和复杂,会直接或间接影响林下直射光与散射光的大小与变化方式^[14]。同时,太阳位置、冠层覆盖度、林冠孔隙大小、林冠高度、太阳方位角、地形等因素显著影响林下直射光照^[41]。因此,林下直射光的变化较散射光更为复杂,随着群落的变化冠层覆盖度逐渐增大,林下光照也随之减少,其中直射光减少的量比散射光多。白云山国家森林公园林下光照与冠层覆盖度及叶面积指数均呈显著的负相关,其中直射辐射对林下光照贡献最大,森林群落随着干扰强度减小林下直射辐射减少量大于散射辐射。

本研究基于不同干扰强度下的森林群落分析了河南白云山国家森林公园冠层结构与光环境特征,结果显示不同干扰强度下的群落间冠层结构和林下光照环境存在显著差异,不同阶段的直接辐射对林下光照贡献最大,干扰强度变化过程中直射辐射减少量大于散射辐射减少量。研究结果丰富了暖温带-亚热带生态过渡区森林冠层结构与林下光照动态变化研究资料,同时也为该区域森林的恢复与重建等提供科学的依据。

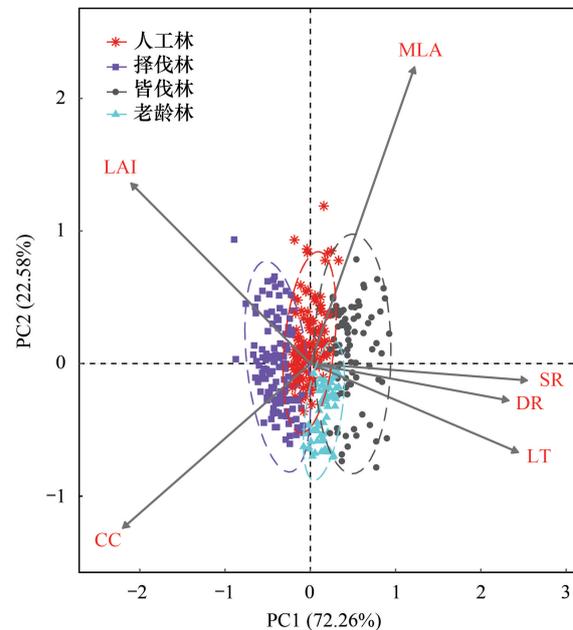


图 4 不同人为干扰强度群落光环境主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of community light environment at different man-made interference

LAI 为叶面积指数,CC 为冠层覆盖度,DR 为冠层下的直接辐射,SR 为冠层下的散射辐射,MLA 为平均叶倾角,LT 为透光比

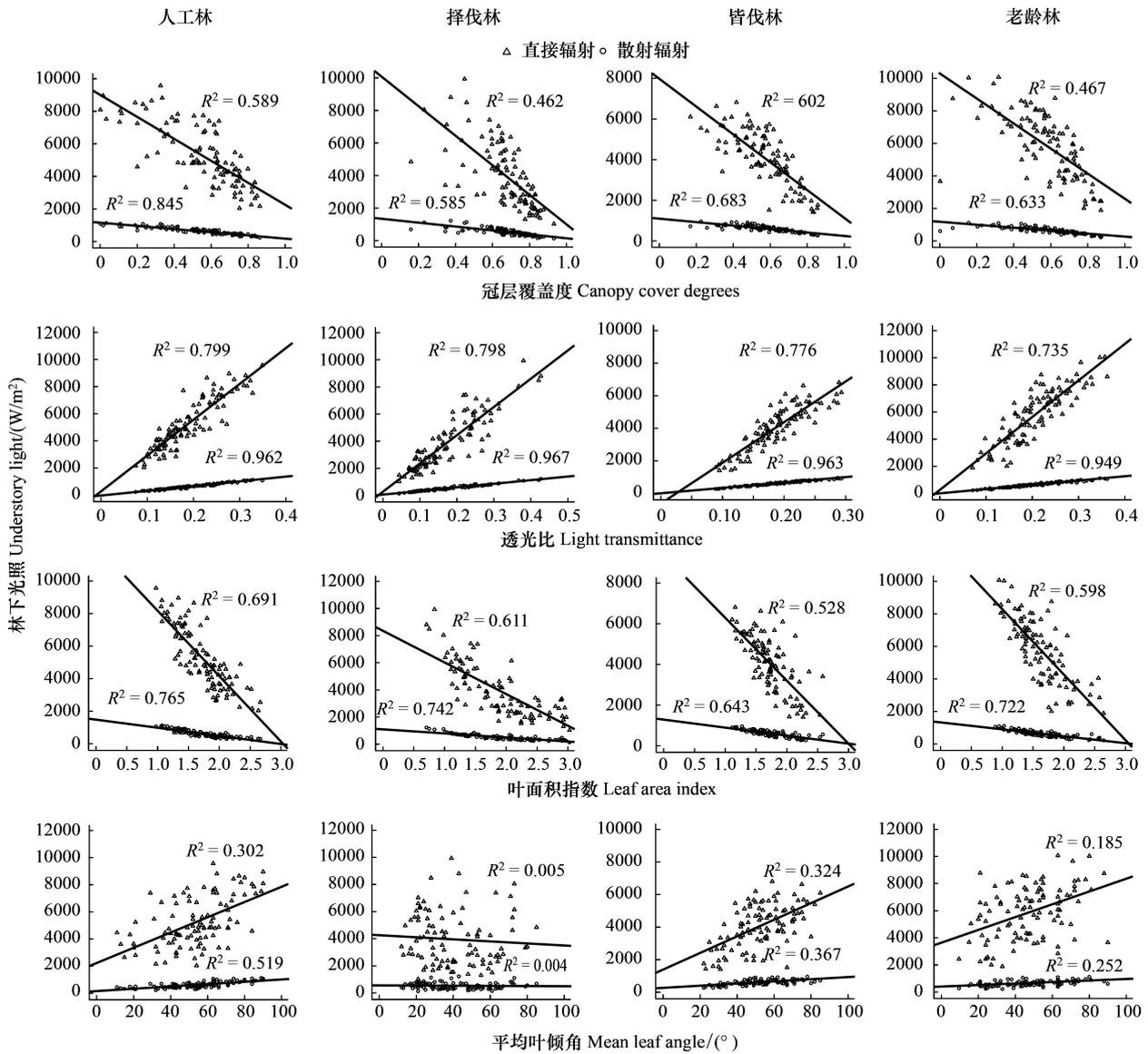


图5 林冠结构与林下光照的关系

Fig.5 Relationship between canopy structure and understory illumination

本文基于不同人为干扰强度的群落在空间水平上对冠层结构以及林下太阳辐射特性进行了分析比较。然而,温带落叶阔叶林季相变化鲜明,群落结构复杂,时间尺度上的群落冠层结构以及林下太阳辐射特性变化还未探究,后续的研究将在不同时间多次取样,系统的探究不同干扰强度下的森林群落光层结构与林下光环境特征在时间尺度上的变化规律。

参考文献 (References) :

[1] 崔佳玉, 曾焕忱, 王永强, 张毅, 胡益珩, 苏志尧. 银瓶山自然保护区阔叶林冠层结构与辐射消减效应. 西北林学院学报, 2015, 30(4) : 45-49.

[2] 占峰, 杨冬梅. 光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例. 生态学报, 2012, 32(3) : 984-992.

[3] 石君杰, 陈志震, 王广海, 金春生, 李永宁. 间伐对杨桦次生林冠层结构及林下光照的影响. 应用生态学报, 2019, 30(6) : 1956-1964.

[4] 李祥, 朱玉杰, 董希斌. 抚育采伐后兴安落叶松的冠层结构参数. 东北林业大学学报, 2015, 43(2) : 1-5.

[5] 张星元, 张璐, 马丁, 蔡琳颖. 不同冠层结构下的植物生长型与生活型特征. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(7) : 37-44.

[6] Hansen A J, Phillips L B, Dubayah R, Goetz S, Hofton M. Regional-scale application of lidar: variation in forest canopy structure across the

- southeastern US. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 214-226.
- [7] 敬小丽, 张璐, 杜伟静, 苏志尧. 南岭山地森林群落冠层结构对林下野生花卉的影响. *西南农业学报*, 2015, 28(2): 833-838.
- [8] 黄慧敏, 董蓉, 何丹妮, 向运蓉, 张小晶, 陈娟, 陶建平. 冠层结构和光环境的时空变化对紫耳箭竹种群特征的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2129-2138.
- [9] 卢训令, 丁圣彦, 游莉, 张恒月. 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响. *生态学报*, 2013, 33(15): 4715-4723.
- [10] 区余端, 苏志尧, 解丹丹, 柯炳熹, 李镇魁. 雪灾后粤北山地常绿阔叶林优势树种幼苗更新动态. *生态学报*, 2011, 31(10): 2708-2715.
- [11] Yamada T, Yoshioka A, Hashim M, Liang N S, Okuda T. Spatial and temporal variations in the light environment in a primary and selectively logged forest long after logging in Peninsular Malaysia. *Trees*, 2014, 28(5): 1355-1365.
- [12] Tun T N, Guo J, Fang S Z, Tian Y. Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2018, 33(5): 464-474.
- [13] Dutta D, Wang K X, Lee E, Goodwell A, Woo D K, Wagner D, Kumar P. Characterizing vegetation canopy structure using airborne remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(2): 1160-1178.
- [14] 丁圣彦, 卢训令, 李昊民. 天童国家森林公园常绿阔叶林不同演替阶段群落光环境特征比较. *生态学报*, 2005, 25(11): 2862-2867.
- [15] 区余端, 苏志尧. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态. *生态学报*, 2012, 32(18): 5637-5645.
- [16] 崔佳玉. 林隙光照及对常绿阔叶林维管地被植物的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [17] 王永强, 蔡燕茹, 曾焕忱, 徐明锋, 苏志尧. 不同林冠开度下亚热带林下植物的组成和多样性. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(5): 64-72, 81-81.
- [18] 谭一波, 何琴飞, 郑威, 彭玉华, 侯远瑞, 何峰, 申文辉. 珠江流域中上游防护林冠层结构对林下植被的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3148-3156.
- [19] 黄团冲, 贺康宁, 王先棒, 王世雷. 北川河流域森林冠层结构对林下植被多样性的影响. *中国水土保持科学*, 2018, 16(4): 106-114.
- [20] 解丹丹, 苏志尧. 石门台亚热带森林不同演替阶段冠层结构与林下光照特征. *许昌学院学报*, 2018, 37(6): 10-14.
- [21] 文丽, 宋同清, 杜虎, 王克林, 彭晚霞, 曾馥平, 曾昭霞, 何铁光. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制. *生态学报*, 2015, 35(17): 5822-5833.
- [22] 郭屹立, 卢训令, 丁圣彦. 伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分. *生态学报*, 2012, 32(14): 4434-4442.
- [23] 游莉. 伏牛山自然保护区森林群落冠层结构及光环境特征研究[D]. 开封: 河南大学, 2009.
- [24] 马克平. 生物多样性监测依赖于地面人工观测与先进技术手段的有机结合. *生物多样性*, 2016, 24(11): 1201-1202.
- [25] 王雪颖, 曹若凡, 樊鹏振, 袁志良, 叶永忠. 白云山国家森林公园大型真菌物种多样性与环境的关系. *河南农业大学学报*, 2018, 52(4): 604-610.
- [26] 毕帅帅, 胡金涛, 樊鹏振, 王雪颖, 叶永忠. 白云山国家森林公园植物群落特征及主要乔木空间分布格局. *河南农业大学学报*, 2018, 52(2): 287-293.
- [27] 李培坤, 王雪颖, 王婷, 姚成亮, 袁志良, 叶永忠. 基于不同模型分析白云山落叶阔叶林群落系统发育结构及其构建机制. *河南农业大学学报*, 2018, 52(1): 50-58.
- [28] 郭凌, 姚成亮, 曹若凡, 李培坤, 牛帅, 叶永忠. 白云山次生落叶阔叶林群落种类组成及其径级结构与空间分布格局. *河南农业大学学报*, 2017, 51(5): 647-652.
- [29] Tang H, Dubayah R. Light-driven growth in Amazon evergreen forests explained by seasonal variations of vertical canopy structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(10): 2640-2644.
- [30] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究和应用进展. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 537-541.
- [31] 任海, 彭少麟. 鼎湖山森林群落的几种叶面积指数测定方法的比较. *生态学报*, 1997, 17(2): 220-223.
- [32] 苏志尧, 贾小容, 解丹丹, 李镇魁. 用半球面影像技术测定城市林分的冠层结构参数. *河南农业大学学报*, 2007, 28(2): 65-68, 102-102.
- [33] 彭焕华, 赵传燕, 冯兆东, 许仲林. 利用半球图像法提取植被冠层结构特征参数. *生态学报*, 2011, 31(12): 3376-3383.
- [34] Hale S E, Edwards C. Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112(1): 51-56.
- [35] 汪迎利, 卢雅莉, 陈一群, 陈红跃. 湿地松改造林分冠层结构及树种光合特征研究. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 735-740.
- [36] Condit R. Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10(1): 18-22.
- [37] Condit R. *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- [38] 黄慧敏, 董蓉, 钱凤, 向运蓉, 何丹妮, 陈森, 陶建平. 紫耳箭竹克隆形态可塑性对典型冠层结构及光环境的响应. *生态学报*, 2018, 38(19): 6835-6845.
- [39] 宋豫秦, 常磊, 杨晓靖, 蔡博峰. 群落结构和叶面积指数在具茨山植被次生演替中的变化. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 643-648.
- [40] 李根柱, 王贺新, 朱教君. 辽东山区长白落叶松叶面积指数和林冠开阔度的月动态. *东北林业大学学报*, 2009, 37(7): 20-22.
- [41] Brang P, von Felten S, Wagner S. Morning, noon, or afternoon: does timing of direct radiation influence the growth of *Picea abies* seedlings in mountain forests? *Annals of Forest Science*, 2005, 62(7): 697-705.