

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

丁圣彦, 卢训令, 李昊民

(河南大学环境与规划学院, 开封 475001)

摘要: 常绿阔叶林是我国中亚热带东部典型植被类型, 根据野外踏查和固定样地调查发现, 天童国家森林公园内发育着常绿阔叶林一个完整的演替系列, 包含着 6 个不同演替阶段。应用 W inScanopy For Canopy Analysis 软件对研究区内不同演替阶段群落冠层进行分析, 得到不同群落冠层和林下的光环境特征指标: PPFD (光合光量子通量密度) 和相关的冠层结构形态学指标 Gapfraction (空隙度)、 $LA I$ (叶面积指数)、 MLA (平均叶倾角), 通过对这些指标的分析比较, 得到的基本规律大致是林冠层的光合有效光量子通量密度随演替逐渐降低, 林冠下面的光合有效光量子通量密度随着群落演替的进展变化更为明显。马尾松林的林冠空隙度明显高于其他阶段的群落, 总的趋势是随群落演替的进展而降低。叶面积指数随演替的进展而呈增加趋势。平均叶倾角随演替的进展先增大而后减小。这些结果反映了常绿阔叶林不同演替阶段群落由于不同树种树冠形态学结构的差异和微环境的不同, 形成了特定群落内的特定光环境。

关键词: 常绿阔叶林; 不同演替阶段群落; 光环境特征; W inscanopy; 天童国家森林公园

文章编号: 1000-0933(2005)11-2862-06 **中图分类号:** Q 148, Q 948 **文献标识码:** A

A comparison of light environmental characteristics for evergreen broad-leaved forest communities from different successional stages in Tiantong National Forest Park

D NG Sheng-Yan, LU Xun-Ling, LI Hao-Min (College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2862~ 2867.

Abstract Evergreen broad-leaved forest (EBLF) is a typical of vegetation in the middle subtropical zone of China. In Tiantong National Forest Park, EBLF communities can be classified into six different successional stages after reconnaissance and field samplings. Dominant species, morphological characteristics, and light environment are different from other successional stages. The objective of this study was to determine effects of photosynthetic photon flux density (PPFD) on the dominant species for different successional stages in Tiantong National Forest Park by using "W inScanopy For Canopy Analysis" software. Light environmental indices of both canopy and understory of EBLF, such as PPFD, and morphological indices, such as gap fraction, leaf area index, and mean leaf angle (MLA) were interpreted by the software. Results showed the PPFD of canopy gradually decreased with successional stages, however, the PPFD decreased substantially in understory, and the PPFD difference in canopy between different stages was less than that in the understory. Standard deviations of PPFD in canopy and understory were 0.64 and 2.21, respectively. Gap fraction in canopy changed significantly, with the *Pinus massoniana* forest having the highest value across the successional stages. This was related to the *Pinus massoniana*'s unique canopy characteristics in gap fraction (10.98% for *Pinus massoniana* forest, 10.62% for *Pinus massoniana*+*Schima superba* forest).

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (30130060)

收稿日期: 2005-03-06; **修订日期:** 2005-09-10

作者简介: 丁圣彦 (1963~), 男, 博士, 教授, 主要从事植物生理生态学、植被生态学研究。E-mail: syding@henu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30130060)

Received date: 2005-03-06; **Accepted date:** 2005-09-10

Biography: D NG Sheng-Yan, Ph.D., Professor, mainly engaged in plant physiology, vegetation ecology and landscape ecology. E-mail: syding@henu.edu.cn

The general trend was that gap fraction reduced gradually with successional stages, however, the MLA increased at early stages, decreased subsequently. LAI measured by two different methods matched well, with both standard deviations less than 1.0. Also, the LAI and leaf density increased according with successional stages. These results showed that the light environment specifically evolved due to the canopy structures and microenvironments from different successional stages in EBLF. There are many factors affecting photosynthesis of plants interactionally rather than singly. Therefore, barely studying the effects of PPFD and canopy morphology on photosynthesis is not enough, further research on interactions among those factors should be done in the future.

Key words: evergreen broad-leaved forest; successional stages; light environmental characteristics; WinScanopy; Tiantong National Forest Park

光合作用是世界上最重要的化学反应,它是太阳能这种最重要的能量被植物吸收的唯一途径^[1]。植被的光合生产力是推动和支撑整个生态系统的原初动力^[2]。太阳辐射强度的大小和时间空分布对植物体光合作用的进行具有重要作用。国内和国外曾就太阳辐射强度因子对光合作用的影响做了大量的研究,一些学者研究了不同光照条件下植物的光合作用强度^[3~4],还有许多论著介绍了影响光合作用的机理、原因和条件^[5~17]。由于光照条件和光合作用之间的相互作用十分紧密,因此研究不同群落中光照条件的差异从一定程度上能反映光合作用的差异,从而反映不同群落中植物的生长状态的差异。由于处于不同演替阶段群落的优势种不同,其形成的群落冠层结构也不同,自然导致群落内的光照条件也有差异。通过比较研究不同演替阶段群落不同光照环境的特征,一定程度上能够说明不同树种形成的不同冠层结构对林下物种造成的光环境特征的影响,从而对其后的群落更新起到决定性作用,进而揭示群落演替过程中优势种更替的光照原因。应用冠层分析仪对群落冠层的结构和太阳辐射强度进行分析是该方面研究的一个途径。

冠层分析仪是一种新型的非接触型实验仪器,目前国内外研究者都在使用。国外一些研究者使用各种冠层分析仪对群落冠层的落叶强度和叶面积指数进行了分析^[18~19]。国内学者,如张仁华使用美国CD公司生产的冠层分析仪CF-100在中国科学院禹城综合试验站遥感试验场对刺柏叶面积指数进行了估算^[20]。沈守云等使用CF-110冠层分析仪对南宁清秀山绿地植被进行了绿量测定^[21]。而借用冠层分析仪的广角鱼镜头和数码相机对群落冠层采集照片,并使用相关计算机软件对数字照片进行处理,以分析群落的光环境特征的研究还比较少。

1 研究区概况

研究区天童国家森林公园位于北纬29°48',东经121°47',距宁波市27km。公园面积353.3hm²。一般山高海拔300m左右,最高峰太白山海拔653.3m。由南向北三面被沙发地形包围,对北来的寒流和南来的季风起着天然屏障作用。该地气候全年温暖潮湿,属典型的亚热带季风气候。冬夏季风显著,温暖适中,四季分明,光照充足,热量较优,雨量丰沛,空气湿润。常绿阔叶林不同演替阶段群落下的土壤主要为山地红黄壤,pH值为4.01~4.79,土层较厚,有机质含量丰富^[22~24]。据该县距天童最近(6km)的东吴气象站(1961~1980年)近20a的观测资料记载,全年平均气温为16℃;最热月为7月份,平均气温为27.9℃,极端最高气温为38.7℃;最冷月为1月份,平均气温4.1℃,极端最低气温为-8.5℃。年平均降雨量为155mm,年相对湿度高达85%。

通过野外踏查和固定样地调查,森林公园范围内发育着常绿阔叶林一个完整的演替系列:(1)次生灌丛:该阶段是在原常绿阔叶林的砍伐迹地上发育起来的,植物种类复杂,优势种不明显,以马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schinus superba*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、榿木(*Loropetalum chinense*)为主。(2)马尾松林:马尾松中成年树占绝对优势,群落下层常绿阔叶树种较多,其中木荷的种群结构为增长型,栲树(*Castanopsis fargesii*)幼苗偶见。(3)马尾松+木荷林:马尾松的发育受抑制,木荷、栲树等常绿阔叶树种逐渐增加。(4)木荷+马尾松林:马尾松呈明显消退趋势,木荷等常绿阔叶树种占优势。(5)木荷+栲树林:马尾松基本消失,木荷、栲树成为共同优势种。(6)栲树林:栲树占绝对优势,木荷次优,其它常绿阔叶树种与之相伴生。

2 数据采集与处理方法

实验所用仪器WinScanopy2002 For Canopy Analysis为加拿大Regent Instruments公司产品(<http://www.regentinstruments.com>)。在不同演替阶段群落样地中对冠层状况进行拍照,事先在各样地中选择一个拍摄点,并做下标记,以备后期实验是在同一地点进行,为了排除地面灌草层的干扰,拍摄高度为2m,为了消除太阳直射产生的巨大光斑,拍摄时间选在天气晴朗的8:00~9:00或者13:00~16:00,既能保证光线充足又能排除掉光斑的影响,每一点每次拍3张照片。

使用随机软件对所获得的数码照片进行分析,由于软件中含有各不同经纬度和海拔高度在不同时间太阳高度、辐射强度的状况,输入照片获取地点的地理参数及获取时间,天气状况即可得到一致的结果,而不同地点群落中分析结果的差异就是由群落结构的不同造成的。分析结果主要包括:光合光子通量密度PPFD(Photosynthetic Photon Flux Density)、空隙度(Gap

fraction)、叶面积指数(Leaf area index, LAI)、平均叶倾角(Mean leaf angle, MLA)、叶倾角分布(Leaf angle distribution, LAD)等,然后对这些群落光环境特征指标和群落结构形态学指标进行对比分析。

3 结果与分析

3.1 群落辐射强度的变化

在森林群落中,太阳辐射可以穿透整个群落,供各层植物进行光合作用,但是由于植物体叶片的阻挡、遮光效应,而使不同高度、不同层次的太阳辐射发生改变,另外由于不同演替阶段的群落树种组成不同,不同树种对太阳辐射的吸收、反射作用也不相同,就使得不同演替阶段群落中的辐射分布不同。将太阳辐射分为林冠层辐射(Photosynthetic Photon Flux Density)和林下辐射(Photosynthetic Photon Flux Density),不同演替阶段群落中的直接辐射、散射辐射和总辐射量的比较如图 1。

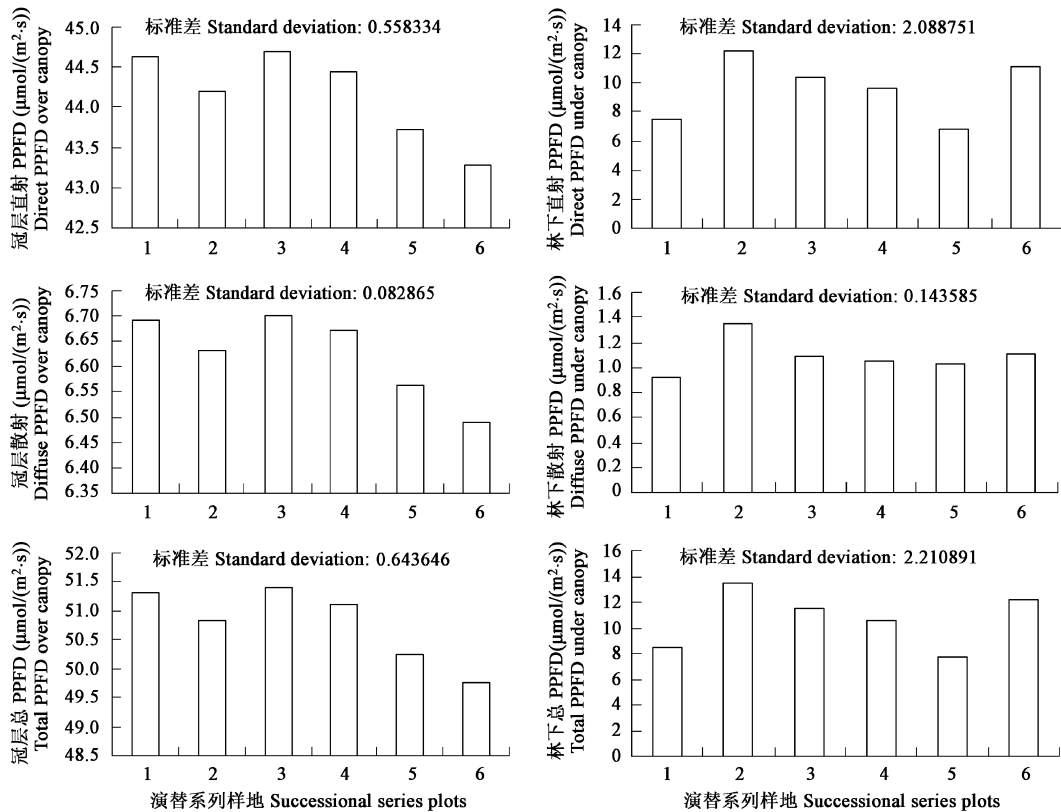


图 1 不同演替阶段群落 PPFD 比较

Fig. 1 Comparison of PPFD in different successional stage communities

X-轴为演替系列样地编号,从 1~6 依次为次生灌丛、马尾松林、马尾松+木荷林、木荷+马尾松林、木荷+栲树林和栲树林 X-axis is the numbers of successional series plots, they are secondary shrub, *P. massoniana* forest, *P. massoniana*+*S. superba* forest, *S. superba*+*P. massoniana* forest, *S. superba*+*C. fargesii* forest and *C. fargesii* forest from 1~6 in turn

太阳入射辐射可以通过各种途径进入群落内部,首先以直接辐射的形式从群落的间隙和边缘进入,然后通过叶片和土壤表面反射后的散射光,最后通过透射叶片的光进入群落。图 1 是对演替系列 6 个群落林冠层和林下层的直接辐射、散射辐射和总辐射 PPFD 比较。林冠层上面 PPFD 是指森林群落上层的太阳辐射强度,它主要受研究地点的经纬度、坡度、坡向和海拔高度的影响,从图 1 中也能看出,由于研究区内不同演替阶段群落样地距离相差不是太远,自然环境相似性很大,而分析研究的照片获取时间相差很短,天气状况变化很小,所以其林冠层上面的直接 PPFD 和散射 PPFD 的差异都很小,基本表现为一,其标准差分别只有 0.558334 和 0.082865。所以重点分析比较林冠层下面的 PPFD 的变化。林冠下面的 PPFD 表现出了较大的差异,林下直接辐射和总辐射的标准差都大于 2.0,林下光照强度的变化是由群落组成物种不同导致冠层结构差异造成的,当然群落结构与群落演替的不同阶段是密切相关的。计算发现林冠层散射辐射平均占总辐射量的 13.04%,林下平均为 10.25%,说明林下辐射中,散射辐射比例较林冠有所下降,但林下微弱的太阳辐射对于更新幼苗幼树的生长意义重大,这也同时证明了冠层空隙形成的光斑这类直接辐射对林下优势种幼苗更新具有更积极的意义。

从各演替阶段来看,次生灌丛阶段,林冠下 PPFD 值为最低,这也是和早期森林处于灌丛杂木林的状态相吻合的。该阶段群

落高度一般在 10m 左右, 优势种马尾松、木荷幼树等和其他灌木树种(榿木, 毛花莲蕊茶等)的生长发育均极其繁茂, 冠层郁闭, 导致林下光照很弱, 致使林下阴暗的环境中实生幼苗很少见, 只有一些耐阴的萌生小枝条存在。

随着演替的进行, 群落上层阳生树种马尾松将快速高生长而占据第一层, 成为优势树种, 形成乔木层, 其他灌木树种将经历增长、停滞阶段, 盖度降低, 然后演替将进入下一阶段——马尾松林阶段。与次生灌丛阶段截然不同的是这个阶段群落的林冠下直接 PPFD 和散射 PPFD 都具有最高值。这是以马尾松为主构成的林冠层的主要特点。马尾松的针叶形成林冠层相当稀疏透光, 为乔木亚层和灌木层的繁茂生长提供了较为充足的辐射条件, 所以针阔叶混交林末期阶段发生着最剧烈的种类聚集和更替过程。随着演替的进行, 常绿阔叶树种木荷因其适应性强, 物质积累速度快而逐步进入马尾松林冠层, 并迅速占据空间, 使得马尾松终将退出群落的演替, 而将发育成典型的常绿阔叶林^[22]。

其后的 3~6 号群落 PPFD 的变化表现出了一定的规律性, 随着常绿阔叶林群落的形成, 群落的垂直结构分化越来越明显, 群落高度、盖度都在增加, 郁闭度也在增加, 这样就使林冠下面的 PPFD 在下降。图 1 中栲树林中的异常情况是由于当时拍照样地中的一棵落叶树——枫香(*Liquidambar formosana*)造成的, 照片的拍摄时间是 2004 年 4 月 9 日, 当时该树树叶刚开始伸展, 导致分析结果出现一定的异常。但是可以预测随着群落演替的进行, 群落将逐渐成熟, 而林下环境也逐渐趋于阴生, 将更有利于耐阴性树种的更新, 幼苗幼树的生长和群落更新也将更加依赖群落中林窗的形成。

从总辐射量来看, 随着群落演替的进行, 林下 PPFD 具有一定的起伏, 但总的趋势是随着演替的进行, 辐射强度在逐渐下降。

3.2 群落冠层空隙度的变化

群落内太阳辐射强度的变化和群落冠层结构之间关系密切, 冠层结构特征的不同直接影响到进入群落内部的太阳辐射。表示冠层结构特征的一个重要指标是群落冠层空隙度。为了更好地揭示常绿阔叶林不同演替阶段群落内太阳辐射强度的变化, 比较不同演替阶段群落的群落冠层空隙度具有一定的意义。

群落冠层空隙度(Gap fraction)是指一个区域的空隙度——位于天空区域的像素占此区域总像素的比例。总空隙度指的是在整个半球照片中位于天空区域的像素数占整个照片像素的比例, 它就等于没有加入权重的总开度(Openness)^[25]。图 2 显示了不同演替阶段群落平均空隙度的变化情况。群落的空隙度与 PPFD 密切相关, 在一定程度上决定着 PPFD 的空间分布, 对林

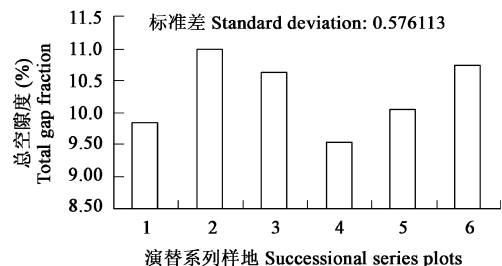


图 2 不同演替阶段群落总空隙度的比较

Fig. 2 Comparison of total gap fraction in different successional

communities

下幼苗的更新过程具有重要影响。就演替系列的 6 个阶段的群落来说, 具有最高空隙度的是马尾松林冠层, 达到 10.98%, 马尾松+木荷样地为 10.62%, 这同样是因为马尾松针叶树冠的关系。而栲树样地也具有较高空隙度, 达 10.74%, 这是因为拍摄样地照片的时间为春季, 拍摄时栲树样地中心一株巨大的枫香的树叶刚开始萌发。其他样地的空隙度均在 10% 以下。排除样地 6 的异常情况可以看出, 随着演替的进行冠层空隙度基本呈减小趋势。

3.3 叶面积指数和平均叶倾角与群落内辐射衰减情况的关系

辐射在通过林冠的途中必定要通过连续的叶层。在这个过程中, 辐射强度随着覆盖度的增加几乎呈指数降低。衰减程度主要决定于叶簇的密度、群落内叶的排列以及叶片相对于辐射的倾斜度。辐射的衰减服从 Lambert-Beer 消光定律, 如果把形成的叶层看作是均匀的, 则辐射衰减可以用以下修正的消光方程来计算^[26]。

$$I_z = I_0 \times e^{-k \times LAI} \quad (1)$$

式中, I_z 是距林冠顶部向下一定深度的辐射强度; I_0 是林冠顶部的入射辐射; k 是该特定植物群落的消光系数; LAI 是在计算 I_z 的水平上, 单位土地面积上的总叶面积(累积 LAI)。

从公式 1 可以看出群落内植物叶片的形状、叶片面积、分布角度直接影响到群落内部不同层次太阳辐射强度的分布。单位面积内群落叶面积指数(LAI)是群落结构的一个重要特征指数, 图 3 中是分别按两种计算方法计算得出的 LAI 值^[27, 28]。 LAI 随演替变化的规律性不是非常明显, 其标准差都小于 1.0, 由于马尾松的针叶, 其叶面积指数计算出现了异常, 除去此异常结果, 从其它样地来看 LAI 基本呈上升趋势, 6 号样地还是由于落叶树枫香造成的影响使其 LAI 表现为偏低。但可以预测随着演替的进行, 群落的平均叶面积指数和叶密度是逐渐增加的。

平均叶倾角(Mean Leaf Angle, MLA)指叶表面垂线与铅垂线的夹角, 自然界中的多数植物能够取向其光合面, 以锐角截获阳光, 使得只有少数叶片连续暴露于直接辐射, 避免强光造成的灼伤。公式(1)中消光系数 k 指光在林冠内部被吸收和散射而降低的程度, 它与 MLA 关系密切, 例如在禾谷类农田、草甸、芦苇地、大叶藻等的群落中, 叶几乎是直立的(3/4 以上叶是直立

的,与水平面的夹角大于 45° ,其衰减系数通常在 0.3~0.5 之间;而在具有适平叶的阔叶林、阔叶草本、向日葵大田等群落中衰减系数通常大于 0.7,常绿阔叶林不同演替阶段群落的 k 值经计算分别为:0.827, 0.712, 0.7611, 0.796, 0.784 和 0.785。

随演替的进行, MLA 表现出较大的差异(标准差达到 6.6)和较强的规律性,即 MLA 先由小变大,后由大变小(如图 4)。

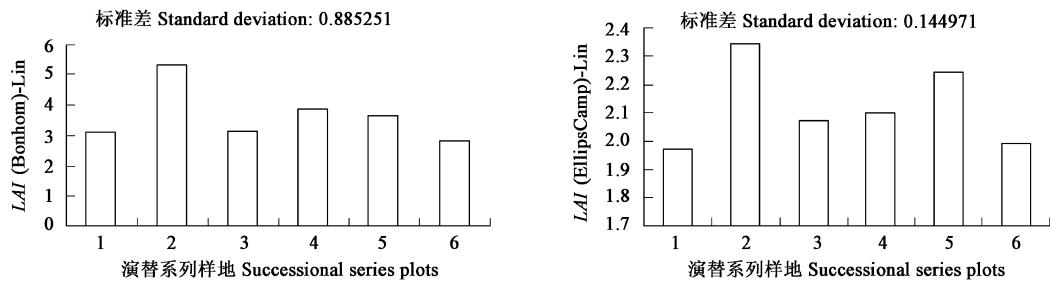


图 3 不同演替阶段群落叶面积指数的比较

Fig. 3 Comparison of LAI in different successional communities

5 结语和讨论

通过比较分析可知,在浙江天童国家森林公园的常绿阔叶林中,6 个不同演替阶段群落各有其特点,太阳辐射强度指标 PPFD 表现出明显的规律性,即随着演替的进行,群落内的光照条件发生了很大的变化,由于研究区内各样地距离较近,照片获取时间间隔很小,天气状况变化很小林冠层上面 PPFD 基本一致,但是林下 PPFD 具有一定的起伏,总的趋势是随着演替的进行林下 PPFD 逐渐降低,6 号样地栲树林的异常偏大是由林中尚未展叶的枫香造成的。林下辐射中,散射辐射比例较林冠有所下降,表明冠层空隙形成的光斑这类直接辐射对林下优势种幼苗更新具有更积极的意义。由于群落冠层的结构直接影响到群落内部接受太阳辐射的强度、时间和分布,所以对影响群落 PPFD 的群落结构特性指标冠层空隙度进行比较,发现冠层空隙度和开度随着演替的进行基本上呈下降趋势。群落叶面积指数 LAI 值变化规律不是十分明显,但是基本上呈上升趋势,尤其是在群落演替的后期。

群落中平均叶倾角的分析结果存在一定的问题,理论上在群落中,随着光强的增大, MLA 应该随之增大,但是通过各演替阶段群落 PPFD 和 MLA 的对比发现,事实并非如此,在 PPFD 和空隙度相对较低的木荷+马尾松样地中反倒有此区中相对较高的 MLA ,这个是和马尾松的针叶有关,还是由于群落内的光照强度本身就不是太强,而这种变化也属于正常范围(其 MLA 毕竟也只有 25.6 而已),具体原因尚待进一步分析研究。

使用先进的冠层分析仪 WinScanopy2002 For Canopy Analysis 对常绿阔叶林不同演替阶段群落冠层进行拍照分析在国内尚未见到,所以本文对处理数据的分析可能还有一定的缺陷,只是在表面上做了比较,至于一些深入机理方面的研究还有欠缺。由于影响植物生长的因素较多,这些影响因子对植物光合生产不是单独起作用,而是相互密切联系的。本文只是从群落冠层太阳辐射方面对演替系列群落特性进行了分析比较,至于诸影响因子之间的相互关系还需深入研究。

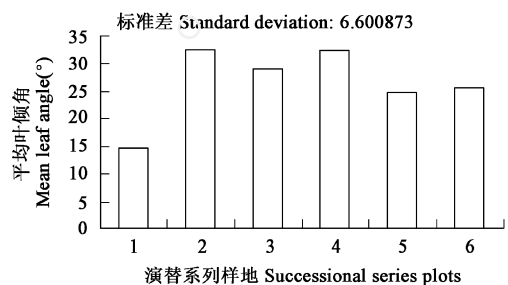


图 4 不同演替阶段群落 MLA 的比较

Fig. 4 Comparison of MLA in different successional communities

References

- [1] Wang L, Xing D, Chen Q. A novel method for measuring photosynthesis using delayed fluorescence of chloroplast *Biosensors and Bioelectronics*, 2004, **20**: 454~459.
- [2] Zhang J X, Wei Q P, Yu Q *et al*, Advances in simulation of plant photosynthesis and colony evapotranspiration. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2003, **34**(4): 613~618.
- [3] Luisa M Lorenzo, Francisco G Figueiras, Gavin H Tilstone, *et al*. Photosynthesis and light regime in the Azores Front region during summer: are light-saturated computations of primary production sufficient? *Deep-Sea Research*, 2004, **51** (9): 1229~1244.
- [4] Dubinsky Z. Light utilization efficiency in natural phytoplankton communities. In: Falkowski, P. G. Ed. *Primary Productivity of the Sea*. New York and London, Plenum Press, 1980. 83~97.
- [5] Adams P, Britz S J. Amelioration of UV-B damage under high irradiance. I. Role of photosynthesis. *Photochem. Photobiology*, 1992, **56**: 645~650.

- [6] Bornman J F, Sundby-Emanuelsson C. *Response of plants to UV-B radiation: some biochemical and physiological effects*. B D S Scientific Publishers, Oxford, 1995. 245~ 262
- [7] Carlos M Correia, Jos  M Moutinho Pereira, et al. Ultraviolet-B radiation and nitrogen affect the photosynthesis of maize: a Mediterranean field study. *Europ. Journal of Agronomy*, 2004, **22**(3): 337~ 350
- [8] Anette K   ster, Ralf Schaible, Hendrik Schubert. Light acclimation of photosynthesis in three charophyte species. *Aquatic Botany*, 2004, **79**: 111~ 124
- [9] Bj  rkman O, Demmig-Adams S. Regulation of photosynthetic light energy capture, conversion and dissipation in leaves of higher plants. In: Schulze, E. D., Caldwell, M. M., Eds. *Ecophysiology of Photosynthesis*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1994. 17~ 47.
- [10] Franklin L A, Seaton G G R, Lovelock C E, et al. Photoinhibition of photosynthesis on a tropical reef. *Plant Cell Environment*, 1996, **19**: 825~ 836
- [11] Henley W J. Measurement and interpretation of photosynthetic light-response curves in algae in the context of photoinhibition and diel changes. *Journal of Phycology*, 1993, **29**: 729~ 739.
- [12] K   ster A, Schaible R, Schubert H. Light acclimation of the charophyte *Lampyrodium papulosum*. *Aquatic Botany*, 2000, **68**: 205~ 216
- [13] Massimo Bertamini, Namachevayam Nedunchezian. Photoinhibition and recovery of photosynthesis in leaves of *Vitis berlandieri* and *Vitis rupestris*. *Journal of Plant Physiology*, 2004, **161**: 203~ 210
- [14] Massimo Bertamini, Namachevayam Nedunchezian. Photoinhibition of photosynthesis in mature and young leaves of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Plant Science*, 2003, **164**: 635~ 644
- [15] David M Kramer, Thomas J A venson and Gerald E, Edwards. Dynamic flexibility in the light reactions of photosynthesis governed by both electron and proton transfer reactions. *Trends in Plant Science*, 2004, **9**(7): 349~ 357.
- [16] Mei-Lan Lian, Murthy H N, Kee-Yoeup Paek. Culture method and photosynthetic photon flux affect photosynthesis, growth and survival of *Limnium Mistry Blue* in vitro. *Scientia Horticulturae*, 2002, **95**: 239~ 249.
- [17] Rodney E Will, Greg A Barron, Colter Burkes E, et al. Relationship between intercepted radiation, net photosynthesis, respiration, and rate of stem volume growth of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different densities. *Forest Ecology and Management*, 2001, **154**: 155~ 163
- [18] Miller-Goodman M S, Moser L E, Waller S S, et al. Canopy analysis as a technique to characterize defoliation intensity on Sandhills range. *Journal of Range Management*, 1999, **52** (7): 357~ 362
- [19] Holst T, Hauser S, Kirchg  ssner A, et al. Measuring and modelling plant area index in beech stands. *International Journal of Biometeorology*, 2004, **48**(4): 192~ 201.
- [20] Zhang R H, Sun X M, and Zhu Z L. A speedier measuring technology for leaf area index— a calibration tool in quantitative remote sensing of vegetation. *Remote Sensing for Land and Resources*, 1998, **1**: 54~ 60
- [21] Shen S Y, Li W J, Fan Y M, et al., Evaluation of three-dimensional green biomass of green space of Qingxiushan in Nanning, *Journal of Central South Forestry University*, 2003, **23**(5): 88~ 91.
- [22] Ding S Y and Song Y C. The comparison of photosynthesis physiology of evergreen broadleaved forest of Tiantong National forest park in Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(3): 318~ 323
- [23] Ding S Y. The causes of *Castanopsis fargesii* and *Schima superba* being dominant species of series of Evergreen Broad-Leaved Forest in Zhejiang Tiantong. *Journal of He nan University (Natural Science)*, 2001, **31**(1): 79~ 83
- [24] Ding S Y. *Comparative ecology of successive seral of evergreen Broad-leaved forest*. Kaifeng: He nan University Press, 1999, 2
- [25] WinScanopy 2002A, B For Canopy Analysis. Regent instruments NC, 2002
- [26] Larcher W. (Zhai Z X, Guo Y H, Ma Y Z, et al. translated), *Physiological Plant Ecology*. Beijing: Agriculture University of China Press, 1997. 26
- [27] Bonhomme R, Chartier P. The Interpretation and Automatic Measurement of Hemispherical Photographs to Obtain Sunlit Foliage Area and Gap Frequency. *Israel Journal of Agricultural Research*, 1972, **22**: 53~ 61.
- [28] Campbell G S. Extinction Coefficients for Radiation in Plant Canopies Calculated Using Ellipsoidal Inclination Angle Distribution. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1985, **36**: 317~ 321.

参考文献:

- [2] 张继祥, 魏钦平, 于强, 等. 植物光合作用与群体蒸散模拟研究进展. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2003, **34**(4): 613~ 618
- [20] 张仁华, 孙晓敏, 朱志林. 叶面积指数的快速测定方法——植被定量遥感的地面标定技术. *国土资源遥感*, 1998, **1**: 54~ 60
- [21] 沈守云, 李伟进, 范亚民, 等. 南宁青秀山绿地绿量评价. *中南林学院学报*, 2003, **23**(5): 88~ 91.
- [22] 丁圣彦, 宋永昌. 浙江常绿阔叶林演替系列优势种光合生理生态的比较. *生态学报*, 1999, **19**(3): 319~ 323
- [23] 丁圣彦. 浙江天童常绿阔叶林演替系列栲树和木荷成为优势种的原因. *河南大学学报(自然科学版)*, 2001, **31**(1): 79~ 83
- [24] 丁圣彦. 常绿阔叶林演替系列比较生态学. 开封: 河南大学出版社, 1999, 2
- [26] Walter Larcher. 翟志席, 郭玉海, 马永泽, 等译. *生理生态学*. 北京: 中国农业大学出版社, 1997. 26