

浙江省天然阔叶林物种多样性和 结构多样性对生产力的影响

王海龙¹, 郅昌建¹, 胡昱彦¹, 徐 森¹, 陆世通¹, 徐 达^{1,2*}

(1. 浙江省林业勘测规划设计有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310020)

摘要:为探讨浙江省天然常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿和落叶阔叶混交林等3种植被覆盖类型物种多样性和结构多样性与环境因子对生产力的影响,以2021年浙江省森林资源连续清查数据为基础,用R语言分析3种植被覆盖类型物种多样性、群落多样性和生产力之间的关系,选择表示物种多样性和结构多样性的最优指标并进行相关性检验,对环境因子与生产力的关系进行冗余分析。结果显示,常绿阔叶林物种多样性与生产力呈显著负相关($R=-0.26, P<0.05$),而结构多样性与生产力呈显著正相关($R=0.51, P<0.05$);落叶阔叶林、常绿和落叶阔叶混交林的物种多样性($R=0.33, P<0.05$; $R=0.32, P<0.05$)、结构多样性($R=0.51, P<0.05$; $R=0.47, P<0.05$)与生产力均呈显著正相关,且结构多样性与生产力的相关性明显优于物种多样性与生产力的相关性。此外,研究发现不同类型的天然阔叶林受到环境因子影响差异较大。在常绿阔叶林中,坡度是影响生产力最显著的因素;而在落叶阔叶林、常绿和落叶阔叶混交林中,坡位是影响生产力最显著因素。研究认为,群落结构多样性和物种多样性的提高,对促进天然阔叶林生产力具有显著影响,不同天然阔叶林生产力水平受环境因子影响差异显著。

关键词:天然阔叶林;物种多样性;结构多样性;环境因子;生产力;浙江省

中图分类号:S718.45;S718.54⁺2;S718.55⁺6 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2024.04.006

Diversity characteristics of natural broad-leaved mixed forests in Zhejiang Province and their impact on productivity

Wang Hailong¹, Gao Changjian¹, Hu Yuyan¹, Xu Sen¹, Lu Shitong¹, Xu Da^{1,2*}

(1. Zhejiang Forestry Survey Planning and Design Co., Ltd, Hangzhou 310020, China;

2. Zhejiang Forest Resource Monitoring Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The impact of species diversity, structural diversity, and environmental factors on the productivity of three types of vegetation cover was studied in Zhejiang Province, i.e.: natural evergreen broad-leaved forest, deciduous broad-leaved forest, and evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest. Based on the 2021 continuous forest resource inventory data of Zhejiang Province, R language was used to analyze the relationship between species diversity, community diversity, and productivity of the three types of vegetation covers. Optimal indicators representing species diversity and structural diversity were selected and tested for correlation. Redundancy analysis was used to examine the relationship between environmental factors and productivity. The results showed that species diversity was significantly negatively correlated with productivity in evergreen broad-leaved forest ($R=-0.26, P<0.05$), while structural diversity was significantly positively correlated with productivity ($R=0.51, P<0.05$). In deciduous broad-leaved forest and evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest, both species diversity ($R=0.33, P<0.05$; $R=0.32, P<0.05$) and structural diversity ($R=0.51, P<0.05$; $R=0.47, P<0.05$) were significantly positively correlated with productivity, especially structural diversity showing a stronger

收稿日期:2024-04-25;修回日期:2024-05-25

作者简介:王海龙(1992-),男,安徽亳州人,工程师,硕士。研究方向为森林资源调查监测与林业遥感。E-mail:1224060531@qq.com

*通信作者:徐 达(1979-),男,浙江宁波人,高级工程师,硕士。研究方向为森林资源监测和林业信息化等研究。E-mail:42468122

@qq.com

correlation with productivity than species diversity. Additionally, it was found that different types of natural broad-leaved forest were affected by environmental factors to varying degrees. Slope was the most significant factor affecting productivity in evergreen broad-leaved forest, while slope position was the most significant factor in deciduous broad-leaved forest and evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest. The study suggests that improving the community structure and species diversity play a crucial role in increasing the productivity of natural broad-leaved forests, and the productivity levels of different natural broad-leaved forest could be significantly influenced by environmental factors.

Key words: Natural broad-leaved forest; Species diversity; Structural diversity; Environmental factor; Productivity; Zhejiang Province

天然阔叶林是森林生态系统中功能最为完备、结构最为复杂的组成部分,是地球上生物物种的基因库和储存库,其丰富的物种多样性和复杂稳定的结构多样性在森林生态功能中起着关键作用^[1-2]。物种多样性是森林生态系统中各种生物群落间相互关系的综合反映,是群落结构功能的主要体现和其复杂性的度量指标^[3],也是植被恢复效果的特征之一^[4],不仅对在森林群落的稳定和演替具有重要影响,对森林生态功能可持续具有更重要的意义^[5-6]。结构多样性是树木在水平与垂直空间中的配置状况,也是认识群落变化和发展趋势的基础^[7-8]。分析植物群落的结构和物种多样性可以揭示群落的更新、稳定性与演替规律,对在森林经营中提高群落生产力具有重要参考意义^[9-10]。

植物群落的物种多样性和结构多样性与生产力之间的关系及其维持机制是全球科学家所关注的核心问题之一^[11],从局域尺度上来说,物种多样性与生产力呈现的关系尚无统一结论,目前生态位互补效应是解释物种多样性与生产力正向关系的主要假说之一^[12],该假说认为群落中物种数增加会促进物种间相互作用,进而导致生态位分化和物种专化,形成功能互补,提高环境资源利用率,从而提升生产力^[13-14]。然而,部分研究也指出物种多样性与生产力也存在负相关^[15]、驼峰关系^[11]和中性关系^[16]的情况。结构多样性在物种多样性与生产力之间起着纽带作用,它不仅可以直接反映物种多样性,又因其能够代表个体在群落中所处的垂直位置,反映出个体在光资源利用上的差异,因此可以成为检验生态位互补的依据^[17-18],同样结构多样性与生产力的负相关和不相关关系也有发生^[19-20]。

天然阔叶林是浙江省常见的一种森林类型,与传统人工林相比,天然阔叶林在保护生物多样性、促进林分生长、提高林木质量等方面具有一定

优势^[21]。研究天然阔叶林物种多样性和结构多样性与生产力之间的关系,对于提升天然林的物种多样性和促进林分的自然更新具有重要意义。本文基于 2021 年浙江省森林资源连续清查数据,以天然阔叶林林分因子和环境状况为研究内容,通过全面系统地分析物种多样性和结构多样性对生产力的影响,为浙江省天然阔叶林可持续经营提供参考。

1 研究地区概况

浙江省(27°06′—31°11′ N, 118°01′—123°10′ E)地处中国东南沿海,位于北回归线以南,属于亚热带季风气候区,气温适中,四季分明,光照充足,雨量丰沛。年平均气温在 15—18℃ 之间,年日照时数 1 100—2 200,年均降水量在 1 100—2 000 mm 之间。浙江省地形复杂,地貌多样。北部为山地丘陵,中部为平原盆地,南部为山地和丘陵。浙江省森林资源丰富,据 2021 年公布的森林资源数据显示,浙江省现有森林面积 623.46 万 hm²,森林覆盖率为 61.2%,其中阔叶林面积为 217.87 万 hm²,占全部森林总面积的 34.95%^[22]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文数据来源于浙江省森林资源监测中心 2021 年浙江省森林资源连续清查成果,选取植被覆盖类型为天然阔叶林的固定监测样地 1 003 个,样地为边长 28.28 m×28.28 m 的正方形,面积为 0.08 hm²,样地均未遭受气象、人为等因素破坏。将天然林阔叶林分为常绿阔叶林(EBF)、落叶阔叶林(DBF)、常绿和落叶阔叶混交林(EDBF),获取样地林分信息包含胸径、年龄、坡度、海拔和林分密度等,详见表 1。

表 1 选取样地林分因子						
植被覆盖类型	样木数	平均胸径 /cm	平均年龄 /a	坡度 /°	海拔 /m	林分密度 / (cm ² /m ²)
EBF	69 783	10. 43	29	34	437	0. 67
DBF	15 109	10. 73	27	29	397	0. 39
EDBF	49 878	10. 46	29	33	437	0. 53

注:林分密度采用林分单位面积胸高断面面积表示

2.2 研究方法

物种多样性^[23] 包括物种丰富度 (Richness, Rs)、香农多样性指数 (Shannon index, Hs)、辛普森多样性指数 (Simpson Diversity index, Ds) 和均匀度 (Evenness, Es); 结构多样性^[24] 基于胸径值计算, 包括胸径基尼系数 (Gini coefficient, Gc), 胸径香农指数 (DBH Shannon index, Hd) 和胸径变异系数 (coefficient of variation, Cv); 生产力^[25] 计算采用固定样地活立木每公顷总生物量除以林龄的方法计算林分生产力 (average biomass growth, ABG), 林木多样性指数和生产力计算公式详见表 2。

表 2 物种多样性与结构多样性指数和生产力计算式

指标	指数	计算式
物种多样性	丰富度	$Rs = N_s$
	香农指数	$Hs = - \sum_{i=1}^{N_s} (N_i \times \ln N_i)$
	辛普森指数	$Ds = 1 - \sum_{i=1}^{N_s} N_i^2$
	均匀度	$Es = Hs / \ln N_s$
结构多样性	基尼系数	$Gc = \frac{\sum_{k=1}^m (2k - m - 1) ba_k}{\sum_{k=1}^m (m - 1) ba_k}$
	香农指数	$Hd = - \sum_{j=1}^{N_d} (N_j \times \ln N_j)$
	变异系数	$Cv = 100 \times \frac{SD_{ba}}{\bar{x}_{ba}}$
生产力	年均生物量增长量	$\Delta ABG = \frac{ABG_{it} - ABG_{i(t-a)}}{a}$

注: N_i 表示样方中第 i 个物种的个体数, N_s 表示样方内物种总数; ba_k 为样方内按大小升序第 k 个个体的胸高断面面积, m 为样方内个体总数; N_j 表示样方内第 j 个胸径等级中的个体数, N_d 表示样方内胸径等级总数; \bar{x}_{ba} 和 SD_{ba} 指样方中所有个体胸高断面面积的平均值和标准差。 t 指调查时间, a 指间隔时间

本文采用 R3. 3. 3 进行物种多样性、群落多样性和生产力关系的回归拟合, 在分析之前, 在单个

样地水平上进行重复, 然后对这些数据进行 Shapiro-Wilk 正态性检验, 必要时进行对数转换。本文利用比较渐进残差均方和平方根 (RMSEA)、显著性概率值 (p) 来评价模型优度, 而为了检验各林分林木多样性与生产力的显著差异, 对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVE) 和最小显著差异法 LSD 多重比较 ($\alpha=0.05$) (R 中 agricolae 包)。为了检验不同植被覆盖之间的关系, 对所有可能的形状组合进行 Pearson 相关性分析 (R 中 agricolae 包), 并使用 R 中 ggplot2、ggphur 包进行图片绘制。最后, 使用软件 CANOCO 5 进行冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA), 分析 3 种植被覆盖类型中环境因子对林木多样性和生产力的影响。

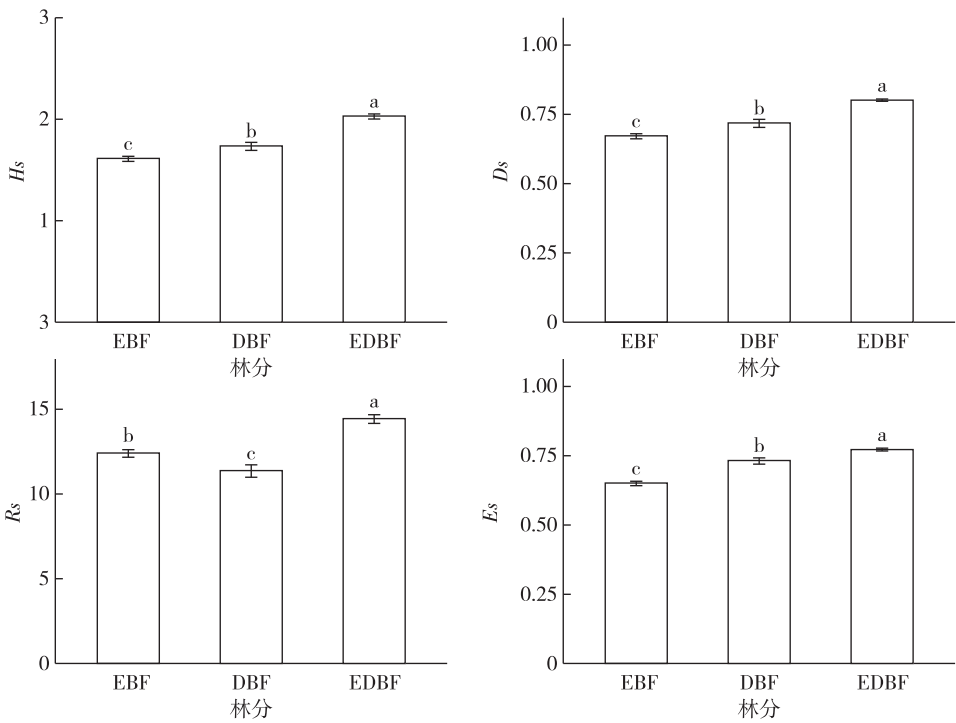
3 结果与分析

3.1 林木多样性差异分析

通过多重比较分析, 3 种植被覆盖类型 4 类物种多样性指数均差异显著 (如图 1)。而结构多样性表现则不尽相同 (如图 2), 3 种植被覆盖类型群落多样性 Gc 中常绿阔叶林、落叶阔叶林与常绿和落叶阔叶混交林差异显著, 落叶阔叶林与常绿和落叶阔叶混交林差异不显著; 3 种植被覆盖类型群落多样性 Hd 差异显著; 3 种植被覆盖类型群落多样性 Cv 中常绿阔叶林与落叶阔叶林、常绿和落叶阔叶混交林差异显著, 落叶阔叶林与常绿和落叶阔叶混交林差异不显著。

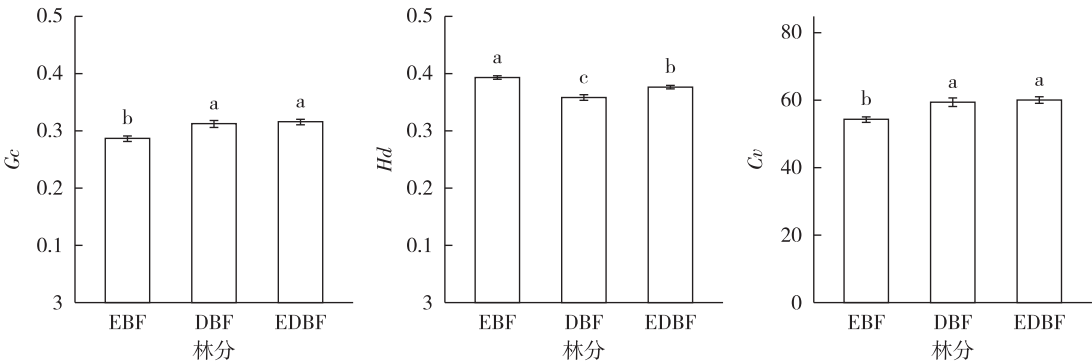
3.2 物种多样性对生产力的影响

通过物种多样性与生产力的回归分析显示 (如图 3), DBF 的 ABG 与 Hs 呈显著正相关线性关系 ($R=0.2, P<0.05$), 而 EBF 和 EDBF 的 ABG 与 Hs 无显著线性相关关系 ($R=-0.049, P>0.05; R=0.086, P>0.05$); EBF 的 ABG 与 Ds 呈显著负相关线性关系 ($R=-0.21, p=0.032$), 而 DBF, EDBF 的 ABG 与 Ds 无显著线性相关关系 ($R=0.15, p>0.05; R=-0.015, p>0.05$); 天然阔叶林中 ABG 与 Rs 均呈显著正相关线性关系 ($R=0.23, p<0.05; R=0.33, P<$



注:数值为平均值±标准差,图上不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

图 1 不同植被覆盖类型下的物种多样性指数差异性



注:数值为平均值±标准差,图上不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

图 2 不同植被覆盖类型下的群落多样性指数差异性

0.05; $R=0.32,P<0.05$);EDBF 的 ABG 与 E_s 无显著线性相关关系($R=-0.043,P>0.05$),而 EBF,EDBF 的 ABG 与 E_s 显著线性负相关关系($R=-0.26,P<0.05$; $R=-0.27,P<0.05$)。以上结果表明,EBF 物种多样性的均匀度指数最能代表与生产力关系,为负相关;落叶阔叶林与常绿和落叶阔叶混交林物种多样性的丰富度指数与生产力最相关,以 EDBF 的正相关性最高。

3.3 结构多样性对生产力的影响

通过结构多样性与生产力的回归分析显示(如图 4),EBF 的 ABG 与 G_c 显著负相关线性关系($R=$

$-0.22,P<0.05$),而 DBF,EDBF 的 ABG 与 G_c 无显著线性相关关系($R=-0.079,P>0.05$; $R=-0.042,P>0.05$);浙江省天然阔叶林中 ABG 与 H_d 均呈现显著正相关线性关系($R=0.51,P<0.05$; $R=0.51,P<0.05$; $R=0.47,P<0.05$);EBF 的 ABG 与 C_v 显著负相关线性关系($R=-0.22,P<0.05$),而 DBF,EDBF 的 ABG 与 C_v 无显著线性相关关系($R=-0.097,P>0.05$; $R=-0.042,P>0.05$)。以上结果表明,结构多样性的胸径香农指数与生产力最相关,且以 EBF,DBF 的正相关性最高。

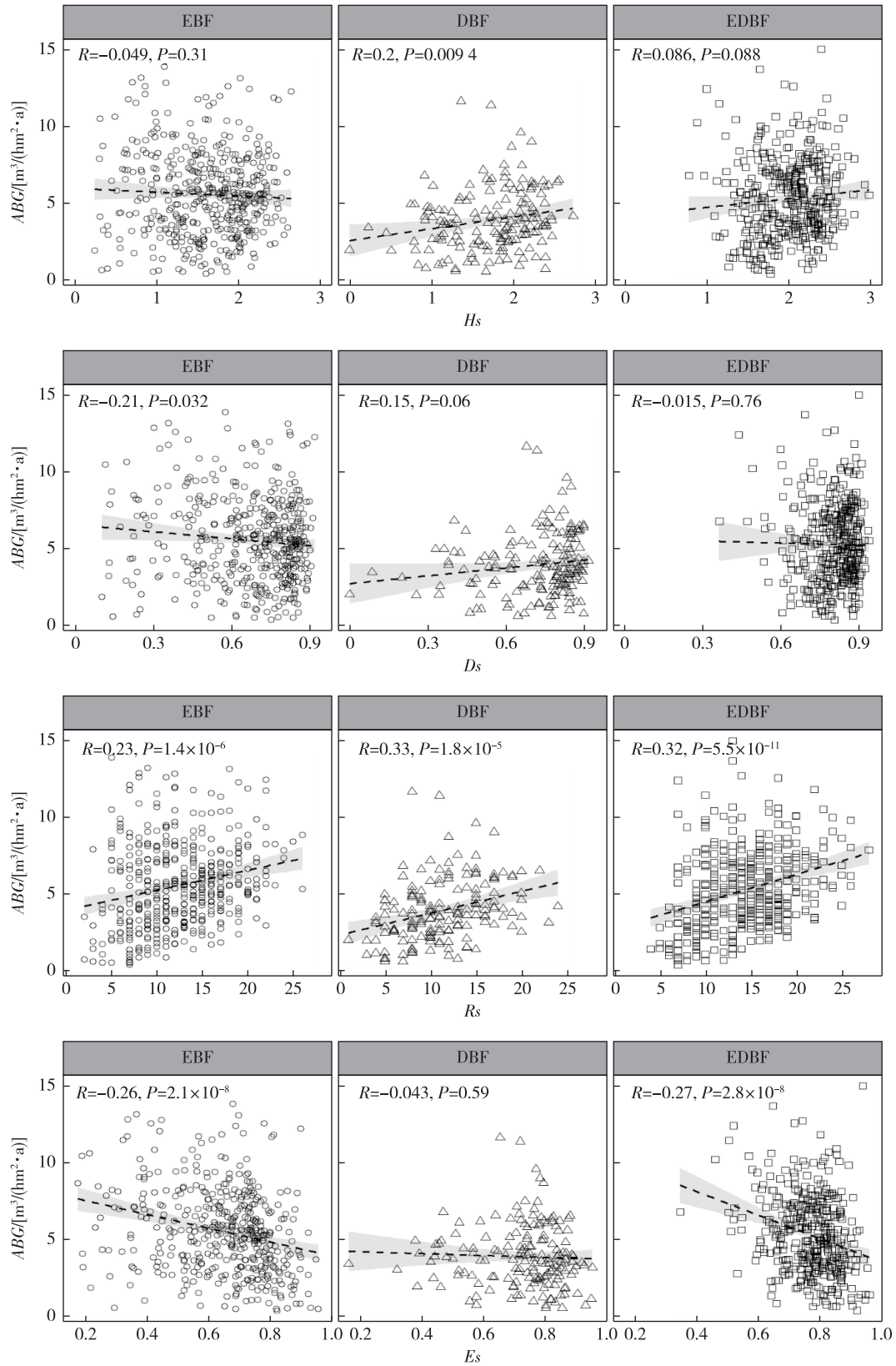


图3 浙江省天然阔叶林物种多样性与生产力的回归拟合

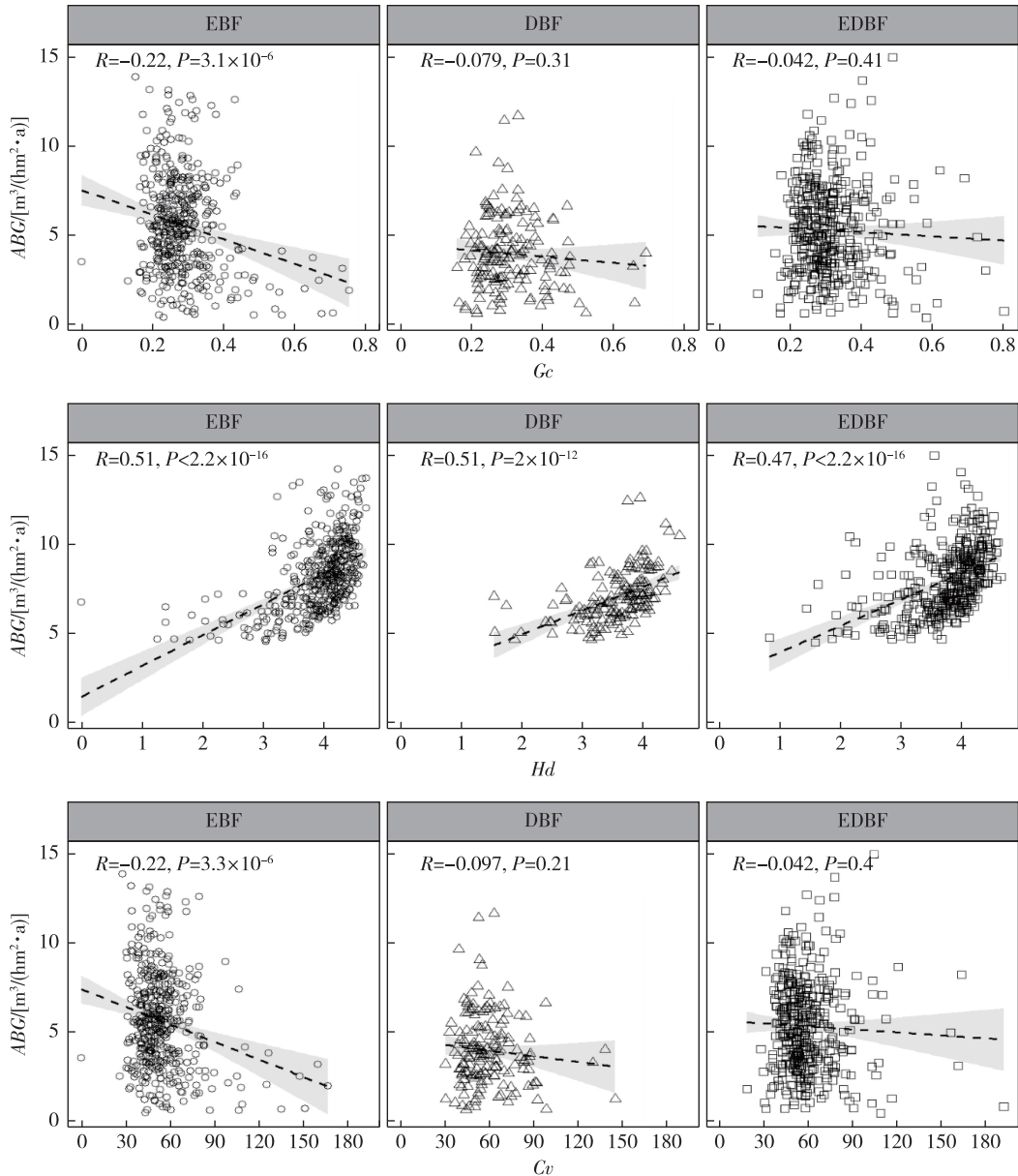


图 4 浙江省天然阔叶林群落多样性与生产力的回归拟合

3.4 环境因子对生产力的影响分析

群落生产力与林木多样性和环境因子 RDA 分析,呈现出不同的相关性显示(如图 5)。从表 3 可知,EBF 中生产力与坡度显著负相关最强,其次为坡位和海拔,生产力与土壤类型无明显相关性,生产力与坡向显著正相关;DDF 中生产力与坡位显著负相关最强,生产力与坡向无明显相关性,生产力与海拔、土壤和坡度显著正相关;EDBF 中生产力与环境因子坡位显著负相关最强,生产力与坡度、土壤、海拔和坡向显著正相关。

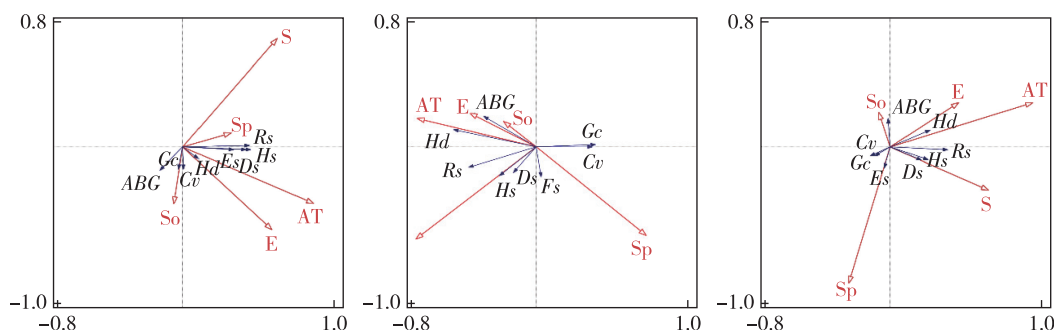
表 3 环境因子与生产力的相关分析

指标	EBF		DBF		EDBF	
	r^2	p	r^2	p	r^2	p
海拔	0.071	0.001	0.655	0.001	0.068	0.001
土壤	0.000 1	0.973	0.243	0.001	0.081	0.001
坡向	0.067	0.001	0.003	0.772	0.06	0.001
坡位	0.141	0.001	0.758	0.001	0.493	0.001
坡度	0.812	0.001	0.085	0.003	0.263	0.001

4 讨论与结论

4.1 讨论

浙江省属于亚热带季风性湿润气候,森林群落类型多样,物种丰富,生境复杂,群落结构稳定^[26],



注:从左到右依次为 EBF, DBF 和 EDBF 的 RDA 排序图;AT:海拔;E:土壤;So:坡向;Sp:坡位;S:坡度

图5 3种植被覆盖类型冗余分析排序

林木多样性主要受到扩散、生态位过程和森林类型分化影响^[27]。目前对浙江省林木多样性特征及其对生产力研究多集中于典型的植物群落^[28-29]或区域范围内^[30-31],研究结果多具有局限性,本研究范围扩大至整个浙江省,涵盖不同地理环境和生态系统类型,以全面了解该地区的阔叶林物种多样性和结构多样性。

物种多样性和结构多样性与生产力间的关系是 30 a 生态学的核心研究内容之一^[32-33],物种多样性与结构多样性和生产力呈正线性关系,主要因为树种多样性越高,林分中功能性状差异越大,进而促进种间互补效应^[12]。本研究发现常绿阔叶林的物种多样性与生产力呈显著负相关,而其结构多样性与生产力呈显著正相关,这与生态位互补效应观点有所不同。在常绿阔叶林中,结构多样性对生产力的影响更加显著,可能是因为该类林分内部竞争激烈,不同树种间的互补作用较少,而结构多样性有助于资源更有效利用和光合作用的优化^[34]。对于落叶阔叶林和常绿与落叶阔叶混交林,物种多样性和结构多样性均与生产力呈显著正相关,进一步支持了多样性—生产力生态位互补效应假说^[35]。

早在 2001 年就指出生物多样性—生产力关系研究需要考虑外界环境变化^[36-37]。本研究详细量化了环境因子对生产力的影响,发现不同植被覆盖类型中,生产力与坡度、坡位、海拔和土壤等环境因子的关系存在显著差异。例如,在常绿阔叶林中,坡度对生产力的负面影响最为显著,即坡度越陡峭,林分生产力越低;而在落叶阔叶林和常绿与落叶阔叶混交林中,坡位对生产力的影响较为明显,即山脊林分生产力较低,而山中部、水稻土和平坡则更适合生长。这些结果表明,不同类型的天然阔叶林对环境条件的响应不同,林业管理应根据具体

环境因子有针对性地调整策略。

综上所述,本研究强调了群落结构复杂性和物种多样性对促进天然阔叶林生产力的关键作用,并揭示了不同环境因子在不同类型天然阔叶林中对生产力的显著影响。这不仅为理解天然阔叶林的生态机制提供了新视角,也为林业管理和生态保护策略的制定提供了科学依据。未来的研究可以进一步探讨其他潜在的影响因素,如气候变化和人为干扰对天然阔叶林生产力的长期影响等。

4.2 结论

本研究结果表明天然常绿阔叶林中物种多样性与生产力显著负相关,而结构多样性与生产力显著正相关,且在落叶阔叶林和常绿与落叶阔叶混交林中,物种多样性和结构多样性均与生产力显著正相关。此外,研究还详细表明了环境因子对不同类型天然阔叶林生产力的影响,显示坡度、坡位、坡向、海拔和土壤等因素对生产力有显著差异性影响。强调了群落结构复杂性和物种多样性对提升天然阔叶林生产力的重要作用,为森林管理提供了重要科学依据。

参考文献:

- [1] 李晓景,江传阳,江希钿,等.闽北天然阔叶林林分材种结构分析及出材率模型[J].福建林学院学报,2013,33(2):137-141.
- [2] 李宸钟,李淑静,王新杰,格氏栲天然林群落结构特征及多样性分析[J].西北林学院学报,2023,38(4):44-50.
- [3] LEENDERTSE P C, ROOZEN A J M, ROZEMA J. Long-term changes (1953–1990) in the salt marsh vegetation at the Boschplaat on Terschelling in relation to sedimentation and flooding[J]. Plant Ecology, 1997. 132(1):49-58.
- [4] BROWN L R, PEET K R. Diversity and invasibility of southern Appalachian plant communities [J]. Ecology, 2003, 84(1):32-39.
- [5] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,

- 1995(3):268-277.
- [6] 陈 杰,李文君,钟娇娇,等.陕西米仓山巴山冷杉天然林群落物种多样性及种群分布格局[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(1):69-78,89.
- [7] 袁 蕾,周华荣,宗召磊,等.乌鲁木齐地区典型灌木群落结构特征及其多样性研究[J].西北植物学报,2014,34(3):595-603.
- [8] 柴永福,岳 明.植物群落构建机制研究进展[J].生态学报,2016,36(15):4557-4572.
- [9] 朱 杰,吴安驰,邹 顺,等.南亚热带常绿阔叶林树木多样性与生物量和生产力的关联及其影响因素[J].生物多样性,2021,29(11):1435-1446.
- [10] PANDEY S K, SHUKLA R P. Plant diversity in managed sal (*Shorea robusta* Gaertn.) forests of Gorakhpur, India: species composition, regeneration and conservation[J]. Biodiversity and Conservation, 2003, 12(11):2295-2319.
- [11] LOREAU M, NAEEM S, INCHAUST P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges[J]. Science, 2001, 294(5543):804-808.
- [12] NAEEM S. Ecosystem consequences of biodiversity loss: the evolution of a paradigm[J]. Ecology, 2002, 83(6):1537-1552.
- [13] OUYANG S, XIANG W, WANG X, et al. Significant effects of biodiversity on forest biomass during the succession of subtropical forest in south China[J]. Forest Ecology & Management, 2016, 372:291-302.
- [14] WU C, HAN W, JIANG B, et al. Relationships between species richness and biomass/productivity depend on environmental factors in secondary forests of Dinghai, Zhejiang Province[J]. Biodiversity Science, 2018,26:545-553.
- [15] LIANG J, BUONGIORNO J, MONSERUD R A, et al. Effects of diversity of tree species and size on forest basal area growth, recruitment, and mortality[J]. Forest Ecology Management, 2007, 243(1):116-127.
- [16] GRACE J B, ANDERSON T M, SEABLOOM E W, et al. Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness[J]. Nature, 2016, 529(7586):390-393.
- [17] DANESCU A, ALBRECHT A T, BAUHUS, et al. Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in south-western Germany[J]. Oecologia, 2016, 182(2):1-15.
- [18] 范秀华,张宝权,范春雨.长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响[J].北京林业大学学报,2021,43(12):1-8.
- [19] LONG J N, SHAW J D. The influence of compositional and structural diversity on forest productivity[J]. Forestry, 2010,289(83):121-128.
- [20] RYAN M G, STAPE J L, BINKLEY D, et al. Factors controlling *Eucalyptus* productivity:How water availability and stand structure alter production and carbon allocation[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259:1695-1703.
- [21] 陶吉兴,季碧勇,张国江,等.浙江省森林资源一体化监测体系探索与设计[J].林业资源管理,2016(3):28-34.
- [22] 浙江省林业局.浙江森林资源报告[EB/OL].[2021-01-08]. <http://lyj.zj.gov.cn/>.
- [23] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法: I_a 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994(4):231-239.
- [24] 谭凌照,范春雨,范秀华.吉林蛟河阔叶红松林木本植物物种多样性及群落结构与生产力的关系[J].植物生态学报,2017,41(11):1149-1156.
- [25] 黄小荣.广西马尾松林植物功能多样性与生产力的关系[J].生物多样性,2018,26(7):690-700.
- [26] 魏 铮,韩明春,顾 卿.浙江省生物多样性特征分析[J].生物技术世界,2014(6):11-12,14.
- [27] 王月霞,金 毅,吴初平,等.浙江省主要亚热带森林群落类型物种和谱系水平的 α 和 β 多样性比较[J].生物多样性,2016,24(8):863-874.
- [28] 黄旭波,秦玉川,王丽玲,等.浙江省鼠茅植物群落物种多样性研究[J].浙江林业科技,2023,43(1):45-52.
- [29] 仲 磊,刘菊莲,丁文勇,等.浙江省不同演替阶段的低海拔次生林植物功能群结构的比较研究[J].浙江大学学报(理学版),2014,41(5):593-599,610.
- [30] 金 超,李领寰,吴初平,等.浙江省公益林生物多样性和立地对生物量的影响[J].浙江农林大学学报,2021,38(6):1083-1090.
- [31] 吴初平,韩文娟,江 波,等.浙江定海次生林内物种丰富度与生物量和生产力关系的环境依赖性[J].生物多样性,2018,26(6):545-553.
- [32] 高 伟,黄石德,林建丽,等.亚热带 3 种森林类型的群落特征与物种多样性的耦合关系[J].热带作物学报,2021,42(6):1756-1763.
- [33] DU J, WANG Y, HAO Y, et al. Climatic resources mediate the shape and strength of grassland productivity-richness relationships from local to regional scales[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, AS7330:107888.
- [34] 尹再芳,孙洪刚,谭梓峰,等.混交林生产力研究进展[J].应用生态学报,2023,34(11):3135-3143.
- [35] MAIRE G L, NOUVELLON Y, Christina M, et al. Tree and stand lightuse efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis*, and *Acacia mangium* plantations[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 288(1):31-42.
- [36] REICH P B, KNOPS J M H, TILMAN D, et al. Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition[J]. Nature, 2001, 410(6830):809-810.
- [37] 董玉洁,毛岭峰,张 敏,等.华东地区亚热带典型常绿阔叶林地上生物量与环境因子的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(1):74-80.