安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 573-580
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260910.002

牛海乐，王　琪，赵　枳，等. 林龄和立地条件交互对杨树人工林林下植被多样性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 573-580.
Niu Haile, Wang Qi, Zhao Zhi, et al. Interaction effects of tree age and site conditions on understory diversity in poplar plantations[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 573-580.

林龄和立地条件交互对杨树人工林林下植被多样性的影响

牛海乐[1,2]，王　琪[1,2]，赵　枳[1]，陈利娟[1]，何冬梅[2,3*]，季　淮[1,4*]
(1. 淮安大学生命科学与食品工程学院（农学院），江苏 淮安 223003；2. 江苏省林业科学研究院，江苏 南京 211153；3. 江苏盐城滨海湿地生态系统国家定位观测研究站，江苏 盐城 224136；4. 江苏洪泽湖湿地生态系统国家定位观测研究站，江苏 淮安 223934)

摘　要：【目的】本研究对苏南丘陵山区、苏北沿海滩涂区和苏北黄泛平原区不同龄级杨树人工林林下植被进行调查分析，以揭示林龄和立地条件对杨树人工林林下植被多样性的分布特征及影响因素。【方法】结合单因素、双因素和主成分分析,探讨立地条件和林龄对杨树人工林林下植被多样性特征的影响及其与土壤理化性质的相关关系。【结果】(1) 在中龄林阶段，苏北黄泛平原区林下草本层 Shannon-Wiener 指数与 Margalef 指数均显著高于苏南丘陵山区（P<0.05)。(2) 在近熟林阶段，苏南丘陵山区林下灌木层 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均显著高于苏北黄泛平原区（P<0.05）和沿海滩涂区（P<0.01)。双因素方差分析表明，立地条件和林龄的交互作用对林下灌木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数产生显著影响（P<0.05)。(3) 杨树人工林林下灌木层的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 指数及均匀度指数均与土壤有机碳（SOC）和全氮（TN）含量呈显著正相关。综合分析表明，苏北沿海滩涂区和苏北黄泛平原区林下灌木层多样性相对偏低，主要受 SOC、TN 等因素的影响。【结论】本研究阐明了江苏省不同立地条件下杨树人工林林下植被多样性的分布特征及其影响因素，为制定杨树人工林区域差异化经营管理措施，提高林下植被多样性，进而提升杨树人工林生产力提供了理论基础。

关键词：江苏省；杨树人工林；不同立地条件；植被多样性；土壤理化性质
中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672−352X (2026)04−0573−08

Interaction effects of tree age and site conditions on understory diversity in poplar plantations

Niu Haile[1,2], Wang Qi[1,2], Zhao Zhi[1], Chen Lijuan[1], He Dongmei[2,3], Ji Huai[1,4]
(1. College of Life Sciences and Food Engineering (College of Agriculture), Huai'an University, Huai'an 223003, China; 2. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China; 3. Yancheng Coastal Wetland Ecosystem Positioning Observation Station in Jiangsu Province, Yancheng 224136, China; 4. National Positioning Observation Station of Hongze Lake Wetland Ecosystem in Jiangsu Province, Huai′an 223934, China)

Abstract: [Objective] To reveal the distribution characteristics and influencing factors of understory vegetation diversity under different stand ages and site conditions, this study investigated the understory vegetation of poplar plantations of varying stand ages in the hilly region of southern Jiangsu Province, the coastal mudflats, and the alluvial plain area of northern Jiangsu Province. [**Method**] By combining one-way ANOVA, two-way ANOVA, and principal component analysis, the effects of site conditions and stand age on the diversity characteristics of understory vegetation in poplar plantations and their correlations with soil physical and chemical properties were explored. **[Result]** (1) At the middle-aged forest stage, the Shannon-Wiener and Margalef indices of the herb layer in the alluvial plain area of northern Jiangsu Province were significantly higher than those in the hilly region of southern Jiangsu Province (P<0.05). (2) At the near-mature forest stage, the Shannon-Wiener and Margalef indices of the shrub layer in the hilly region of southern Jiangsu Province were significantly higher than those in the alluvial plain

收稿日期：2025-09-08；**录用日期：**2026-03-23；**网络出版日期：**2026-09-11
基金项目：江苏省林业科技创新与推广项目（LYKJ[2022]05）；江苏省林业局揭榜挂帅项目（LYKJ[2022]01）；江苏省研究生实践创新计划项目（SJCX24_2137）；校级大学生创新创业项目（X202511049313）；洪泽湖湿地“碳封存”稳定机制及生态修复关键技术研究（HAB202361）
作者简介：牛海乐，硕士研究生，E-mail：1251092429@qq.com
* **通信作者：**何冬梅，副研究员，E-mail：ybfqxy@126.com；季淮，副教授，E-mail：jihuai3408@163.com

area of northern Jiangsu Province (P<0.05) and those in the coastal mudflats (*P*<0.01). The two-way ANOVA showed that the interaction between site conditions and stand age had a significant impact on the Shannon-Wiener and Simpson indices of the understory shrubs (*P*<0.05). (3) The Shannon-Wiener index, Simpson index, Margalef index and Pielou's evenness index of the shrub layer in the understory of poplar plantations were significantly positively correlated with soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) content. Comprehensive analysis showed that the diversity of the shrub layer in the coastal mudflats and the alluvial plain area of northern Jiangsu Province was relatively low, and it was mainly affected by factors such as SOC and TN.**[Conclusion]** This study clarified the distribution characteristics and influencing factors of understory vegetation diversity under the canopy of poplar plantations in different site conditions in Jiangsu Province, which provides a theoretical basis for formulating differentiated management measures for poplar plantations at the regional level, and for enhancing the diversity of the understory vegetation to improve the productivity of poplar plantations.

Keywords: Jiangsu Province; poplar plantations; different site conditions; vegetation diversity; physical and chemical properties of soil

过去几十年来，气候变化和人类活动导致全球植被变化与生物多样性显著下降，威胁生态系统平衡。人工林是我国森林生态系统的重要组成部分，在环境净化等方面发挥着关键作用[1]。然而，人工林普遍存在树种单一、结构简单等问题，导致林下植被多样性较低，生产力逐渐下降。有研究表明，林下植被多样性是维持土壤肥力和人工林长期生产力的重要途径[2]。因此，如何通过提升林下植被多样性以增强人工林生产力已成为森林可持续发展领域的重要课题[3]。

杨树人工林是我国重要的生态防护和速生用材林。就江苏省而言，杨树人工林种植面积占全省人工林总面积的 2/3，但地域分布极不均衡。苏北黄泛平原区面积占比最高，达 68.12%；沿海滩涂区次之，约占 1/4；苏南丘陵山区则不足 6%。这一分布差异主要由地形地貌、土壤盐碱化程度和区域经济发展水平共同决定。苏北徐州、宿迁一带的黄泛平原区地势平坦，适合集约化种植。在沿海滩涂区轻、中度盐碱化区域，杨树可作为兼具良好生态保护功能和高经济价值的优良树种。与以上区域相比，苏南丘陵山区地形和土壤条件更利于乡土树种生长，加之该区工业化、城市化水平较高，森林经营也更倾向于选择高经济、高观赏价值的树种，杨树种植规模相对偏低。上述地域差异为探讨不同立地条件下杨树人工林林下植被多样性及影响因素提供了重要的研究区域[4]。随着人工林经营管理向“近自然化”转变，杨树人工林林下植被受人为干扰较小，其多样性为相关研究提供了良好基础。目前研究多集中在林分因子与土壤理化性质对林下植被多样性的影响。有研究表明，较高的土壤氮和速效磷含量是调节杨树人工林林下植被多样性的主要因素[5]；也有研究认为林分冠层结构、光照与土壤理化性质会随林龄的增长而发生一定变化，进而导致林下植被多样性的差异[6-7]。

然而，江苏作为区域差异较为显著的地区，林分和立地条件是影响林下植被的重要因素。大部分研究若仅考虑林分因子，将难以阐明二者之间可能存在的交互作用，也不能明确同一树种在不同立地条件下林下植被多样性的差异性，难以为制定差异化经营措施提供参考。为弥补现有研究的局限性，本研究采用跨区域、多龄级的对比设计，拟解决以下两个关键问题：（1）不同立地条件和林龄下，杨树人工林林下植被多样性呈现何种差异？（2）立地条件和林龄如何交互影响林下植被多样性？明确影响杨树人工林林下植被多样性的主要因素，有助于指导林下植被管理与生产力的提升。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择江苏省 3 个典型的杨树种植区域：苏南丘陵山区、沿海滩涂区以及苏北黄泛平原区作为研究区。沿海滩涂区地处北亚热带湿润气候区，年平均气温为 13～15 ℃，降水主要集中在夏季，土壤以砂土、盐渍土为主，该区杨树人工林种植面积为 152 376.14 hm^2，其中连云港和盐城占比最大，分别占全省杨树人工林总面积的 10.21%和 13.21%，杨树人工林林下植被优势种以白茅（*Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv.）等为主。苏南丘陵山区位于江苏省中南部，地貌以丘陵山地为主，多太湖冲积土和黄棕壤，年平均气温为 15～16 ℃。苏南丘陵山区杨树种植面积为 32 585.22 hm^2，以南京市杨树人工林种植面积分布最广，占总面积的 65.16%，该区域杨树人工林人为干扰强度低，林下植被丰富，优势植物以阔鳞鳞毛蕨（*Dryopteris championii* (Benth.) C. Chr.）为主。苏北黄泛平原区地势平坦开阔，土壤以沙土为主，年均降水量为 800～940 mm，其中

6～9 月降水量约占全年的 57%，此区域杨树人工林种植面积为 380 418.70 hm^2，以徐州、宿迁种植面积占比最大，分别为 35.45%和 27.53%，该区林下优势植物以牛膝（*Achyranthes bidentata* Blume）、狗尾草（*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.）等为主。

1.2　样地设置及林下植被调查

为探讨杨树人工林的林下植被多样性及其影响因素，于 2023 年 8 月在江苏省苏南丘陵山区、沿海滩涂区和苏北黄泛平原区开展调查。为降低同一立地条件的差异性和确保样地的代表性，本研究在每个立地条件下分别设置 10 个 5 年内无人为干扰的杨树人工林调查样地，3 种立地共设置 30 个独立样地，包括幼龄林（0～5 a）10 个、中龄林（6～10 a）9 个，近熟林（11～15 a）11 个，具体见表 2 调查样方基本概况。乔木样方设置为 20 m × 20 m，在每个乔木样方中按对角线方向设置 5 个 2 m × 2 m 的小样方用于林下灌木调查，以及 5 个 1 m × 1 m 的小样方用于林下草本调查，灌木样方记录植物名称、盖度、冠幅、株数，草本样方记录植物名称、盖度、高度、频度和株数等指标。2023 年 8 月，在样地内随机选取 3 个点，挖土壤剖面，然后按照 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm、60～80 cm 和 80～100 cm 分层采集土样，将土样带回实验室进行混匀、风干、磨细后过筛，密封放置以待测定土壤理化性质。土壤 pH 值测定采用玻璃电极法[8]，水土质量比为 2.5∶1；土壤全钾（TK）测定采用安捷伦 7900 ICP-MS[9]；将风干土样研磨过 0.15 mm 筛后，用元素分析仪（EA-IRMS，德国）测定土壤全氮含量[10]；土壤有机碳采用重铬酸钾容量—外加热法测定[11]。土壤理化性质相关数据[12]如表 1 所示。

表 1　调查样方土壤因子

Table 1　Soil factors of the survey sample plots

立地条件类型	龄组	pH 值	TK/(g·kg^{-1})	TN/(g·kg^{-1})	SOC/(g·kg^{-1})
NJCM	YY	6.58±0.01	42.07±5.31	0.43±0.07	1.55±0.41
	YH	7.60±0.51	14.75±1.86	0.71±0.06	3.66±0.50
	YN	7.55±0.54	11.13±0.53	0.52±0.01	3.17±0.59
SJHR	YY	7.06±0.62	12.17±1.55	0.80±0.14	5.32±0.83
	YH	6.41±0.19	10.85±1.03	0.90±0.08	6.40±0.67
	YN	4.99±0.36	6.05±0.15	0.72±0.04	5.43±0.21
NJAP	YY	8.65±0.01	13.58±0.13	0.36±0.12	1.72±0.02
	YH	8.34±0.08	13.88±0.35	0.48±0.07	2.80±0.38
	YN	8.54±0.01	11.13±0.53	0.52±0.01	2.50±0.06

注：YY，幼龄林；YH，中龄林；YN，近熟林；NJCM，沿海滩涂区；SJHR，苏南丘陵山区；NJAP，苏北黄泛平原区。

表 2　调查样方基本概况

Table 2　Basic overview of the survey sample plots

立地条件	地形地貌	土壤类型	品种	平均林龄/a	龄组	样方数量	保留密度株/m^2	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度	是否人为干扰
SJHR	丘陵、岗地	黄棕壤土	美洲黑杨南林（包括 3804、862、泗阳 1 号）	5	YY	3	0.04	10.92	9.88	0.70	无
				8	YH	3	0.04	16.98	14.02	0.86	
				15	YN	4	0.04	23.01	17.88	0.81	
NJCM	地势平坦	砂土		5	YY	3	0.05	12.16	14.82	0.55	
				8	YH	3	0.05	18.36	16.27	0.59	
				12	YN	4	0.07	21.49	16.68	0.73	
NJAP		沙土		4	YY	4	0.04	11.96	10.62	0.60	
				9	YH	3	0.05	17.18	18.90	0.63	
				15	YN	3	0.03	30.14	26.21	0.69	

注：YY，幼龄林；YH，中龄林；YN，近熟林；NJCM，沿海滩涂区；SJHR，苏南丘陵山区；NJAP，苏北黄泛平原区。

1.3　植物多样性

样方内各物种的重要值、α 多样性指数（其中包括 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数）均参考马克平等[13-14]方法计算。

1.4　数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 26.0 对林下植被多样性数据进行分析。不同立地条件多样性指数采用单因素方差分析，显著性水平设为 $P<0.05$；林下植被多样性的影响因素则采用双因素和主成分分析。文中所有图均采用 Origin 2021 进行绘制。

2　结果与分析

2.1　林下植被组成

对不同龄组林下植被的科、目、属、种数进行汇总，得到该立地条件下植物的物种组成（表 3）。其中，杨树人工林林下草本植物丰富度排序为：沿海滩涂区>苏北黄泛平原区>苏南丘陵山区。沿海滩涂区草本植物共计 72 种，以菊科、禾本科和苋科为主，分别占沿海滩涂区草本植物总种数的 23.61%、12.50%、8.33%；苏北黄泛平原区林下草本共有 61 种，隶属于 25 科 48 属，以菊科、苋科、禾本科为

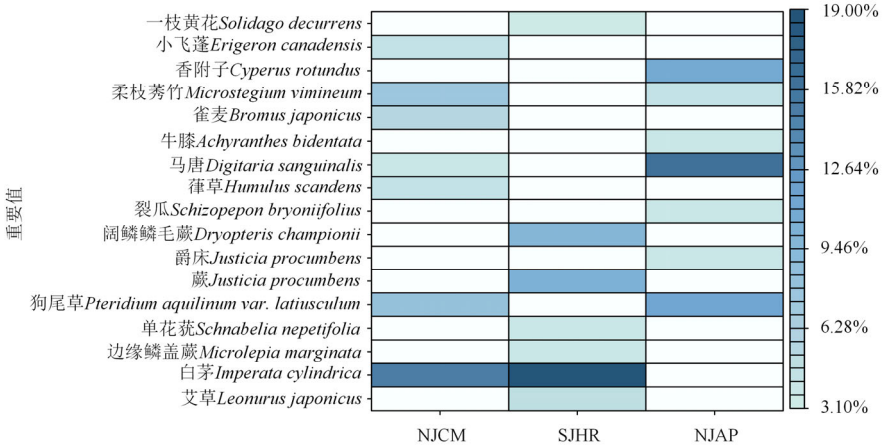
优势科，菊科草本植物占苏北黄泛平原区草本植物总种数的 18.31%，苋科和禾本科均占苏北黄泛平原区草本植物总种数的 8.45%；苏南丘陵山区杨树人工林林下草本共有 55 种，隶属于 32 科 49 属，以菊科、禾本科植物种类最多，分别占苏南丘陵山区草本植物总种数的 21.82%和 10.91%；与草本植物相比，沿海滩涂区与苏北黄泛平原区的灌木物种丰富度较低，而苏南丘陵山区的灌木物种丰富度则较高。3 种立地条件下灌木总种数排序为：苏南丘陵山区 > 苏北黄泛平原区 > 沿海滩涂区。沿海滩涂区杨树人工林林下灌木共有 7 种，隶属于 6 科 5 属；苏南丘陵山区林下灌木共计 73 种，隶属 35 科 57 属，以蔷薇科、樟科植物为主；苏北黄泛平原区林下灌木共计 10 种，以桑科植物种类最多。

表 3 不同立地条件下林下物种组成

Table 3 Composition of forest understory species under different site conditions

立地条件	灌木层				草本层				总种数
	科数	目数	属数	种数	科数	目数	属数	种数	
NJCM	6	5	5	7	26	19	53	72	79
SJHR	35	20	57	73	32	20	49	55	128
NJAP	9	10	6	10	25	17	48	61	71

注：表中数值为不同龄组总和。NJCM，沿海滩涂区；SJHR，苏南丘陵山区；NJAP，苏北黄泛平原区。



图中各区域数据为对该区域所有林龄组的汇总数据进行分析所得。图中颜色越深表明该区域内重要值越高。NJCM，沿海滩涂区；SJHR，苏南丘陵山区；NJAP，苏北黄泛平原区。

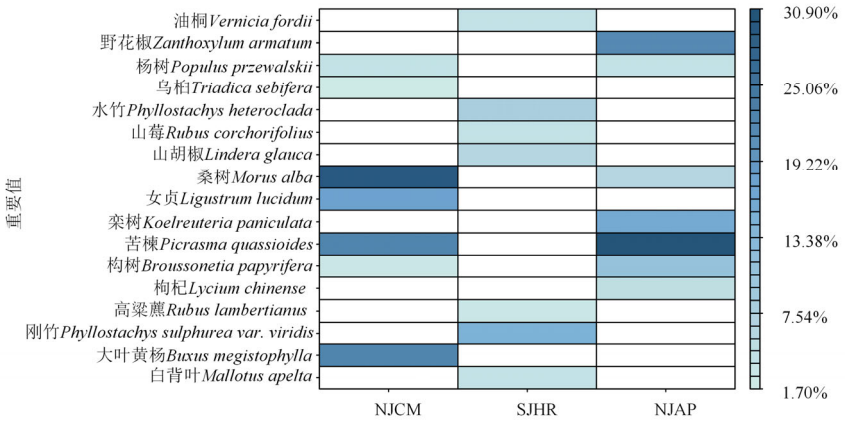
图 1 林下草本层优势种重要值热图

Figure 1 Heat map of the importance values of dominant species in the herbaceous layer under the forest

2.2 林下植被重要值

对各区域各龄组杨树人工林林下所有植物的重要值进行分析，结果（图 1）表明，沿海滩涂区杨树人工林林下优势植物多为一年生草本植物，优势种包括白茅、狗尾草、葎草（*Humulus scandens* (Lour.) Merr.）、柔枝莠竹（*Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus）、雀麦（*Bromus japonicus* Thunb. ex Murr.）、小飞蓬（*Erigeron canadensis* L.）等，多年生优势植物以白茅为主；苏南丘陵山区以多年生草本为主，其中以白茅、阔鳞鳞毛蕨（*Dryopteris championii* (Benth.) C. Chr.）的重要值较高；苏北黄泛平原区一年生草本植物重要值相对较高的包括：马唐（*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.）、狗尾草、柔枝莠竹（*Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus）、爵床（*Justicia procumbens* L.）、裂瓜（*Schizopepon bryoniifolius* Maxim.）等，多年生优势草本植物以香附子（*Cyperus rotundus* L.）、牛膝为主；一年生草本中，狗尾草、柔枝莠竹在沿海滩涂区、苏北黄泛平原区出现频率较高，而多年生草本白茅则多见于沿海滩涂区和苏南丘陵山区。

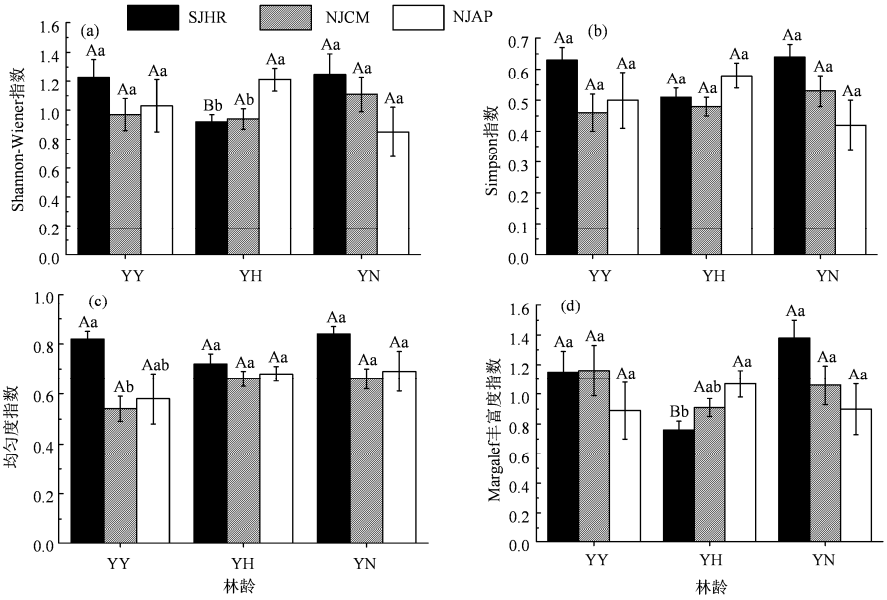
由图 2 可知，苏南丘陵山区重要值较高的是刚竹（*Phyllostachys sulphurea* var. *viridis* R. A. Young）、水竹（*Phyllostachys heteroclada* Oliv.）以及山胡椒（*Lindera glauca* (Siebold & Zucc.) Blume）等，沿海滩涂区、苏北黄泛平原区同以苦楝（*Melia azedarach* L.）、桑树（*Morus alba* L.）为优势植物，其中，沿海滩涂区灌木层以桑树重要值为最高，苏北黄泛平原区以苦楝重要值最高，其次为野花椒（*Zanthoxylum simulans* Hance）。



图中各区域数据为对该区域所有林龄组的汇总数据进行分析所得。图中颜色越深表明该区域内重要值越高。NJCM，沿海滩涂区；SJHR，苏南丘陵山区；NJAP，苏北黄泛平原区。

图 2　林下灌木层优势种重要值热图

Figure 2　Heat map of the importance values of dominant species in the shrub layer under the forest



不同大写字母表示同一立地条件下不同林龄组间差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母表示同一林龄下不同立地条件组内差异显著（$P<0.05$）。YY. 幼龄林；YH. 中龄林；YN. 近熟林；SJHR. 苏南丘陵山区；NJCM. 沿海滩涂区；NJAP. 苏北黄泛平原区。

图 3　林龄与立地条件对杨树人工林林下草本层植物多样性的影响

Figure 3　Effects of tree age and site conditions on the plant diversity of the herb layer beneath poplar plantations

表 4　林龄与立地条件对杨树人工林林下灌木层植物多样性的影响

Table 4　Species diversity index of the understory shrub layer

多样性指数	SJHR			NJCM			NJAP		
	YY	YH	YN	YY	YH	YN	YY	YH	YN
Shannon-Wiener 指数	0.77 ± 0.1^{Ba}	0.71 ± 0.07^{Ba}	1.27 ± 0.09^{Aa}	0.00^{Aa}	0.72 ± 0.18^{Aa}	0.62 ± 0.17^{Ab}	0.00^{Aa}	0.39 ± 0.12^{Aa}	0.22 ± 0.12^{Ab}
Simpson 指数	0.43 ± 0.06^{Ba}	0.34 ± 0.05^{Ba}	0.64 ± 0.04^{Aa}	0.00^{Aa}	0.42 ± 0.10^{Aa}	0.39 ± 0.10^{Aa}	0.00^{Aa}	0.24 ± 0.07^{Aa}	0.14 ± 0.09^{Aa}
均匀度指数	0.64 ± 0.04^{ABa}	0.57 ± 0.06^{Ba}	0.79 ± 0.05^{Aa}	0.00^{Aa}	0.73 ± 0.08^{Aa}	0.85 ± 0.06^{Aa}	0.00^{Aa}	0.73 ± 0.07^{Aa}	0.78 ± 0.13^{Aa}
Margalef 指数	0.87 ± 0.17^{Ba}	0.85 ± 0.12^{Ba}	1.41 ± 0.12^{Aa}	0.00^{Aa}	0.83 ± 0.19^{Aa}	0.52 ± 0.14^{Ab}	0.00^{Aa}	0.69 ± 0.21^{Aa}	0.41 ± 0.25^{Ab}

注：不同大写字母表示同一立地条件下不同林龄组内差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母表示同一林龄下不同立地条件组外差异显著（$P<0.05$）。YY. 幼龄林；YH. 中龄林；YN. 近熟林；SJHR. 苏南丘陵山区；NJCM. 沿海滩涂区；NJAP. 苏北黄泛平原区。

2.3　杨树人工林林下植被多样性指数

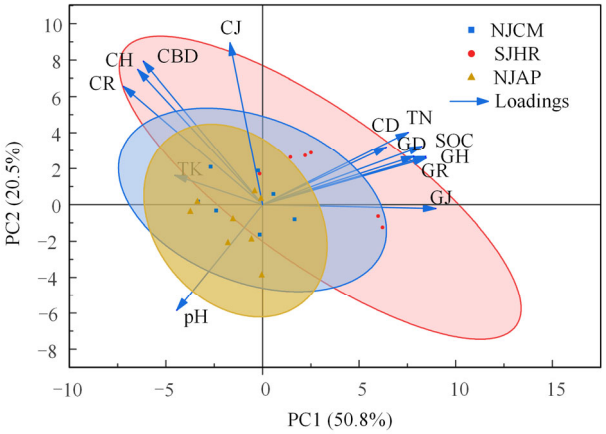
林龄与立地条件均显著影响杨树人工林林下草本层植物多样性指数。苏南丘陵山区中龄林 Shannon-Wiener 指数显著低于幼龄林和近熟林（$P<0.05$），不同立地条件下，苏北黄泛平原区 Shannon-Wiener 指数显著高于苏南丘陵山区（$P<$

0.05），见图 3（a）。Simpson 指数在不同林龄、立地条件下无显著性差异（$P>0.05$），见图 3（b）；均匀度指数在同一立地条件、不同林龄间无显著性差异（$P>0.05$），但苏南丘陵山区与沿海滩涂区幼龄林林下草本层均匀度指数差异显著（$P<0.05$），见图 3（c）。草本层 Margalef 丰富度指数中，苏南丘陵随林龄的增加呈先降后升趋势，苏北黄泛平原区中龄林 Margalef 指数显著高于苏南丘陵山区（$P<0.05$），表明前者林下草本植物物种更为丰富，见图 3（d）。

在不同林龄内，苏南丘陵山区灌木层各多样性指数之间均呈显著差异（$P<0.05$），整体呈先降后升的增长趋势；不同立地条件下，苏南丘陵山区近熟林林下灌木层 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均显著高于苏北黄泛平原区（$P<0.05$）和沿海滩涂区（$P<0.01$），而后两者之间差异不显著，说明苏南丘陵山区林下灌木层在物种数量与综合多样性上更具优势（表 4）。

2.4 林下植被多样性的影响因素

从整体来看，第一排序轴和第二排序轴分别解释杨树人工林林下群落多样性影响因素的 50.8%和 18.3%，前两轴累计方差贡献率为 69.1%（图 4）。植被多样性指数与土壤理化性质相互关联，其中灌木层 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 指数及均匀度指数与土壤有机碳（SOC）和土壤全氮（TN）均呈正相关，草本层均匀度指数与土壤有机碳呈正相关且相关性最高，而土壤全钾（TK）与灌木层均匀度指数呈负相关。同时，在林分因子方面，杨树人工林灌木层均匀度指数还受郁闭度影响，两者关系密切。



SJHR. 苏南丘陵山区；NJCM. 沿海滩涂区；NJAP. 苏北黄泛平原区。CH. 草本层 Shannon-Wiener 多样性指数；CBD. 草本层 Simpson 优势度指数；CJ. 草本层 Pielou 均匀度指数；CR. 草本层 Margalef 丰富度指数；GH. 灌木层 Shannon-Wiener 多样性指数；GD. 灌木层 Simpson 优势度指数；GJ. 灌木层 Pielou 均匀度指数；GR. 灌木层 Margalef 丰富度指数。pH. 土壤酸碱度；SOC. 土壤有机碳；TN. 土壤总氮；TK. 土壤总钾；CD. 郁闭度。PC1. 第一主成分；PC2. 第二主成分。

图 4 杨树人工林植被多样性与土壤理化性质主成分分析

Figure 4 Diversity of plant species in artificial poplar forests and principal component analysis of soil physical and chemical properties

表 5 立地和林龄对林下植被多样性的影响

Table 5 Effects of site and forest age on understory vegetation diversity

项目	参数	林龄/a	立地条件	林龄×立地条件
灌木层 Shannon-Wiener 指数	*P*	0.281	<0.010	<0.050
灌木层 Simpson 指数	*P*	0.378	<0.010	<0.050
灌木层均匀度指数	*P*	0.181	0.310	0.563
灌木层 Margalef 丰富度指数	*P*	0.311	<0.010	0.073
草本层 Shannon-Wiener 指数	*P*	0.509	0.640	0.067
草本层 Simpson 指数	*P*	0.749	0.185	0.137
草本层	*P*	0.205	<0.010	0.366
草本层 Margalef 丰富度指数	*P*	0.059	0.685	0.076

2.5 立地条件类型和林龄对林下植被多样性影响

由表 5 可知，立地条件类型和林龄对林下植被多样性具有显著影响。在灌木层中，除均匀度指数和 Margalef 丰富度指数之外，立地条件以及立地条件与林龄的交互作用对 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均有极显著影响（$P<0.01$）；在草本层中，立地条件与林龄的交互作用对 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 丰富度指数和均匀度指数均无显著影响（$P>0.05$）。

3 讨论

3.1 林下植被组成

物种组成是反映群落结构演化的关键指标[15]。本研究表明，苏南丘陵山区杨树林下植被种数最多，占 3 种立地条件总物种数的 46.04%。3 种立地条件林下植被优势科如下：沿海滩涂区草本层以菊科、禾本科和苋科为主；苏南丘陵山区草本层以菊科、禾本科为主，灌木层以蔷薇科、樟科为主。以上结

论与叶鹏程[16]、田甜[17]、韩学娇[18]等已有的研究结论相似，表明菊科与禾本科在江苏省杨树人工林中占有优势地位。

3.2　林下植被重要值

沿海滩涂区林下草本群落以白茅、柔枝莠竹、葎草、狗尾草和小飞蓬等为主，其中白茅重要值最高。白茅生态适应性强，能耐受贫瘠、盐碱土壤环境，已成为苏北滨海地区的主要植被之一[19]，其发达的根系结构有助于调节土壤侵蚀，因此加强该地区耐盐植物种质资源的保护与开发是实现区域经济可持续发展的重要途径[20]。此外，小飞蓬扩展速度极快[21]，建议加强日常监测工作，避免其成为优势种，破坏杨树人工林生态系统[22]。蕨类植物更适合在苏南丘陵山区特有的气候、地形和土壤条件下生存[23]，因而在自然状态下形成优势群落。苏北黄泛平原区光照充足、气候温和，为马唐、柔枝莠竹等一年生植物提供了良好生境；该区土壤渗透性较高，利于香附子等多年生植物对水分的利用，从而成为林下植被的关键组成部分[24]。

在灌木层方面，苏南丘陵山区降水量充足[25]，适宜多年生灌木的生长。落叶灌木山胡椒和常绿灌木刚竹对丘陵山区的环境有着极强的适应性，因此在林下灌丛中占据着重要的优势地位，其重要值较高。沿海滩涂区与苏北黄泛平原区林下灌木均以苦楝、桑树幼苗为优势植物，这两种立地条件虽自然地理环境条件各不相同，但都适宜桑树、苦楝的生长，其原因可能在于苦楝、桑树均是耐贫瘠、抗盐碱的树种[26-29]。此外，苏北黄泛平原区地势平坦，光、水等资源条件丰富，也为苦楝、桑树的生长提供了有利的条件。

3.3　林下植被多样性指数

已有研究表明，杨树人工林林下植被多样性指数随林龄增加呈先增后减趋势[30]，但在本研究中，苏南丘陵山区杨树人工林林下草、灌植物 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和均匀度指数随林龄呈现“先减后增”趋势，该差异可能与林分郁闭度变化对光资源的调节有关[7]，较高郁闭度限制了林下光照，造成中龄林草本层 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数偏低，同时也使其幼龄林草本层均匀度指数高于沿海滩涂区。而沿海滩涂和苏北黄泛平原地区地形平坦，林分郁闭度较低，林下光照充足，导致物种多样性较高而均匀度较低[31]。这种立地条件差异的影响在灌木层近熟林阶段尤为显著，苏南丘陵山区灌木层的 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数显著高于其他两区域，表明其灌木植物具有更高的生态适应性和竞争能力，从而能维持较高的物种多样性。

3.4　林下植被多样性的影响因素

本研究结果表明，杨树人工林林下植被多样性受多种环境因素的影响，其中土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全钾（TK）及郁闭度是主要影响因素。杨树人工林林下灌木层植物多样性指数（Shannon-Wiener、Simpson、Margalef 以及均匀度指数）与 SOC 和 TN 含量之间呈正相关关系，与王继丰等[32]的研究结果相符。其中，土壤 TN 既能对灌木层群落结构产生直接影响，又能通过对土壤理化性质的调控间接影响植物生长，两者存在协同效应[33-34]。另外，土壤 TK、郁闭度与灌木层均匀度之间均呈显著相关性，表明两者皆对杨树人工林林下植被的生长和分布起着重要作用[35-36]。高郁闭度林下有利于耐荫植物存活，促进林下灌木植物的均匀分布。其原因在于林冠遮荫形成了异质性光环境，为耐荫灌木提供了适宜生境，利于其种群的稳定。燕亚飞等[37]在杨树人工林中同样发现，高密度林分下林下植物分布更为均匀，与本研究结果一致。

此外，杨树人工林林下植被多样性受林龄、立地条件及两者交互作用的共同影响。立地条件与林龄的交互作用对灌木层植物的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数影响显著，表明林龄对 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数的影响因立地条件而异。具体来看，在水热条件较好的苏南丘陵山区，林龄增长伴随林下光环境的变化，能有效推动灌木群落的动态演替，多样性呈“先降后升”趋势，其近熟林阶段 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 丰富度指数显著高于苏北两地。而沿海滩涂区及苏北黄泛平原区受盐碱土和沙土限制，多样性水平偏低且各林龄间差异不显著。因此，林龄对林下灌木层多样性影响依赖于立地条件的差异[38-39]。

本研究揭示了林龄和立地条件对杨树人工林林下植被多样性的分布特征及主要影响，但在主成分分析方面仍存在一定局限性。在不同立地条件下，土壤盐分可能对林下植被产生重要影响，因此后续研究应增加水溶性盐含量的测定，进一步探讨土壤盐分对林下植被的影响，从而更全面地揭示环境因素的作用。

4　结论

本研究对比了苏南丘陵山区、沿海滩涂区及苏北黄泛平原区 3 种立地条件下的杨树人工林林下植被多样性，揭示林下植被多样性主要受 SOC、TN

及郁闭度等影响。研究表明：苏北黄泛平原区杨树人工林中龄林林下草本层 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均显著高于苏南丘陵山区，而苏南丘陵林下灌木层多样性指数为最高。双因素方差分析表明，立地与林龄的交互作用对林下灌木层 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数影响显著，林龄对多样性的影响会因立地条件的不同而改变。基于 SOC、TN 对植被的重要影响，本研究提出差异化管理措施：对于苏北黄泛平原灌丛覆盖率较低的区域，建议适量增施有机肥并协同调控碳氮以改善土壤环境；沿海滩涂区需重点提升土壤质量，加快林下植被恢复；苏南丘陵山区应保护原始生态环境，以维持林下植被多样性优势。综合来看，实施土壤与植被协同管理，是维持杨树人工林植被多样性和提升杨树生产力的有效途径。

参考文献：

[1] Shivanna K R. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare[J]. Proc Indian Natl Sci Acad, 2022, 88(2): 160-171.

[2] 冯健, 王骞春, 陆爱君, 等. 辽东山区落叶松-水曲柳混交林植物多样性和土壤特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 27-37.

[3] Zhang J, Qin G, Zhai Z, et al. Diverse understory vegetation alleviates nitrogen competition with crop trees in poplar plantations[J]. Forests, 2021, 12(6): 705.

[4] 徐钊, 曹国华, 李思刚, 等. 江苏省森林植被碳储量分布结构及变化特征[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 69-75.

[5] Li Y Z, Chen X S, Xie Y H, et al. Effects of young poplar plantations on understory plant diversity in the Dongting Lake wetlands, China[J]. Sci Rep, 2014, 4: 6339.

[6] Meng X Y, Fan S X, Dong L, et al. Response of understory plant diversity to soil physical and chemical properties in urban forests in Beijing, China[J]. Forests, 2023, 14(3): 571.

[7] 胡尔查, 王晓江, 王铮, 等. 毛乌素沙地杨树人工林林下植物群落特征[J]. 林业科学研究, 2023, 36(5): 189-197.

[8] 肖亚宏.山西省 3 种主要针叶林土壤碳储量研究[J].山西林业科技, 2026, 55(2): 35-37.

[9] 杨丽, 李和平. 测试条件对土壤中 33 种元素同时测定的影响[J]. 河南预防医学杂志, 2018, 29(11): 824-827.

[10] 孙玉芳, 王曦. 元素分析仪测定土壤氮、碳含量的不确定度评定[J]. 分析测试技术与仪器, 2016, 22(4): 240-245.

[11] 冉堃, 王泽锦, 李品. 典型城乡绿化树种土壤微生物组成和多样性的环境响应差异[J].生态学报, 2023, 43(23): 9758-9769.

[12] 牛海乐, 何冬梅, 季淮, 等. 江苏不同区域杨树人工林碳密度研究[J].江苏林业科技, 2025, 52(2):18-22.

[13] 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, 15(3): 268-277.

[14] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法Ⅱβ多样性的测度方法[J]. 生物多样性, 1995, 3(1): 38-43.

[15] 贾崴, 贺鹏. 南京城市森林的植物生物多样性研究[J]. 分子植物育种, 2023, 21(6): 2075-2079.

[16] 叶鹏程, 陈慧, 张光富, 等. 江苏东台野生草本植物多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2022, 41(3): 133-141.

[17] 田甜, 张旭东, 丁丽霞, 等. 南方低山丘陵区村域森林景观及植物群落特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(6): 121-130.

[18] 韩学娇, 杨雨薇, 何宝辉, 等. 鲁西黄泛平原毛白杨林林分结构对林下草本植物多样性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(4): 605-612.

[19] 李二焕, 沈俊, 鞠靖, 等. 苏北滨海盐土区河流入海口土壤盐分及养分分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 79-88.

[20] 肖立辉, 朱建杰, 卞金月, 等. 江苏洪泽湖东部湿地保护区植物多样性及区系特征分析[J]. 湿地科学与管理, 2023, 19(6): 40-44.

[21] 胡晓川. 浅析苏南地区林业有害生物防治研究[J]. 农业开发与装备, 2019(8): 63, 76.

[22] 李洪山, 陈俊. 沿海地区银杏采叶圃小飞蓬发生特点及防治实践[J]. 河南农业, 2022(5): 24-25.

[23] 葛波, 庄家尧, 常猛, 等. 苏南丘陵区典型林分林内外气温变化规律研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5): 1063-1069.

[24] 黄倩, 李朗. 苏北黄泛平原典型城市天然“海绵体”潜力评价体系[J]. 地质学刊, 2023, 47(2): 203-207.

[25] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 等. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 609-615.

[26] 陈丽文, 时群, 杨利平, 等. 乡土树种苦楝的采种育苗技术及应用价值[J]. 农业科技通讯, 2022(12): 247-249.

[27] 侯韶敏. 桑树经济价值及播种育苗技术[J]. 山西林业, 2021(2): 32-33.

[28] 蔡金峰, 郁万文, 汪贵斌, 等. 盐胁迫对苦楝苗木生长及离子平衡的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(4): 1-6.

[29] 毛莹, 郑冬梅, 辛愿, 等. 桑树对沙化土壤改良的试验研究[J]. 黑龙江农业科学, 2021(2): 45-48.

[30] 王树梅, 庞元湘, 宋爱云, 等. 基于林龄的滨海盐碱地杨树刺槐混交林土壤理化性质及草本植物多样性动态[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6539-6548.

[31] 李冬林, 仇曙光, 张珺, 等. 句容市仑山典型森林群落物种多样性特征[J]. 江苏林业科技, 2017, 44(1): 7-12.

[32] 王继丰, 黄庆阳, 谢立红, 等. 黑龙江松嫩草地植物群落物种多样性与植物碳储量的关系[J]. 中国草地学报, 2022, 44(7): 33-42.

[33] García-Palacios P, Maestre F T, Bardgett R D, et al. Plant responses to soil heterogeneity and global environmental change[J]. J Ecol, 2012, 100(6): 1303-1314.

[34] 苏天成, 向琳, 陈聪琳, 等. 营林措施对成都绕城高速路域杨树人工林物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(1): 58-66.

[35] 唐铭灿, 潘登, 潘高. 湘中丘陵区 3 种林分林下植物多样性与土壤特性研究[J]. 湖南林业科技, 2016, 43(1): 38-43.

[36] Cui R R, Qi S, Wu B C, et al. The influence of stand structure on understory herbaceous plants species diversity of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing, China[J]. Forests, 2022, 13(11): 1921.

[37] 燕亚飞, 方升佐, 田野, 等. 林下植物多样性及养分积累量对杨树林分结构的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1170-1177.

[38] Poudel D R, Chen H Y H, Kc M, et al. Understory vegetation dynamics across a poplar plantation chronosequence in reclaimed coastal saline soil[J]. Forests, 2019, 10(9): 764.

[39] 李朗, 戈弋, 何伟. 基于 GIS 与 DRASTIC 模型的苏北黄泛平原典型区域地下水脆弱性评价[J]. 地下水, 2023, 45(4): 30-33.