不同径级对黑松人工林生物量及其分配的影响

苏 帅[1] 汪晓红[2] 李海涛[3] 张凤启[3] 孙天旭[4] 姜 斌[5] 王 伟[5] 沙继国[6] 陈 宁[7]

1 临沂大学农林科学学院 山东临沂 276000
2 山东省林业保护和发展服务中心 济南 250014
3 费县国有林场总场 山东费县 273400
4 山东省国土空间规划院 济南 250000
5 平邑县林业发展中心 山东平邑 273300
6 沂水县自然资源和规划局 山东沂水 276400
7 费县林业发展中心派驻探沂镇林业站 山东费县 273400

摘要：【目的】揭示不同径级下黑松人工林生物量的变化及分配特征，为森林经营管理、城市造林、树种选择及区域碳收支平衡的维护提供科学依据。【方法】以鲁中南山区黑松人工林为研究对象，按 3 cm 等距划分 9 个径级组，每个径级组设置 3 个标准样地，分别进行乔木、灌木、草本的生物量测定及显著性检验，探究不同径级对林木生物量分配的影响。【结果】1）黑松人工林树高随着径级的增大呈上升趋势，胸径［8，20）cm 范围内，树高随胸径的增加呈直线上升，胸径［11，14）、［14，17）、［17，20）cm 的树高分别为胸径［8，11）cm 的 1.46、2.26、2.53 倍。2）当胸径（0，5）、［5，8）、［8，11）、［11，14）、［14，17）、［17，20）、［20，23）、［23，26）、［26，29）cm 时，黑松乔木单株生物量分别为 2.91、10.30、27.36、58.95、144.30、117.22、234.78、376.89、475.46 kg，随着径级增加而增加；各器官生物量大小依次为干生物量>根生物量>枝生物量>叶生物量；乔木层根冠比随着径级的增加而降低。3）灌木层和草本层生物量及其根冠比随着径级的增加无明显变化趋势。4）树高与乔木层生物量呈现正相关变化趋势，而与灌木、草本层生物量呈负相关关系。【结论】径级对黑松人工林乔木层生物量影响较大，合理的径级配比，对提高森林生物量和碳储量具有重要意义。

关键词：径级；黑松；生物量分配；鲁中南山区
DOI：10.12169/zgcsly.2024.10.08.0001

Influence of Different Diameter Classes on Biomass and Its Allocation in Planted *Pinus nigra* Forest

Su Shuai[1] Wang Xiaohong[2] Li Haitao[3] Zhang Fengqi[3] Sun Tianxu[4] Jiang Bin[5]
Wang Wei[5] Sha Jiguo[6] Chen Ning[7]

(1. College of Agriculture and Forestry, Linyi University, Linyi 276000, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Center for Forest Protection and Development, Jinan 250014, China; 3. Feixian State-owned Forestry Headquarter, Feixian 273400, Shandong, China; 4. Shandong Province Land Space Planning Institute, Jinan 250000, China; 5. Pingyi Forestry Development Center, Pingyi 273300, Shandong, China; 6. Yishui County Natural Resources and Planning Bureau, Yishui 276400, Shandong, China; 7. Feixian Forestry Development Center, Tangyi Town Forestry Station, Feixian 273400, Shandong, China)

收稿日期：2024-10-08
* 基金项目：山东省主要造林树种（栎类）优良树种选择研究与示范科研监测服务（SDGP370000000202402002056A）
第一作者：苏帅（2001-），男，硕士生，研究方向为林木生理生态。E-mail：sushuai@ lyu. edu. cn
通信作者：汪晓红（1977-），女，高级工程师，研究方向为林木生理生态。E-mail：wwangxiaohong@ shandong. cn

Abstract：【Objective】 To reveal the changes and allocation characteristics of biomass in planted *Pinus nigra* forests under different diameter classes, and provide a scientific basis for forest management, urban afforestation, tree species selection and maintenance of regional carbon balance. 【Method】 Planted *P. nigra* forests in the central-south mountainous area of Shandong are taken as the research object, and they are divided into 9 diameter class groups at 3cm intervals, and 3 standard sample plots are set up in each diameter class group. The biomass of trees, shrubs, and herbs are measured and tested for significance, to investigate the effects of different diameter classes on the allocation of the forest biomass. 【Result】 1) The tree height in the planted *P. nigra* forests increases with the increase of diameter class, within the range of diameter at breast height (DBH) at [8, 20) cm. The tree height increases linearly with the increase of DBH, and the heights of trees with the DBH of [11, 14), [14, 17), and [17, 20) cm are 1.46, 2.26, and 2.53 times the heights of trees with DBH [8, 11) cm, respectively; 2) When the DBH is (0, 5), [5, 8), [8, 11), [11, 14), [14, 17), [17, 20), [20, 23), [23, 26), [26, 29) cm, the biomass of individual tree in planted *P. nigra* forests is 2.91, 10.30, 27.36, 58.95, 144.30, 117.22, 234.78, 376.89, and 475.46 kg, respectively, which increases with the increased diameter class. The biomass of each organ is in the order of stem biomass>root biomass>branch biomass>leaf biomass, and the root-crown ratio of the tree layer decreases with the increase of diameter class; 3) There is no obvious change in the biomass of the shrub layer and the herb layer as well as in their root-crown ratios with the increase of diameter class; and 4) The tree height shows a positive correlation with the biomass of the tree layer and a negative correlation with the biomass of the shrub and herb layers. 【Conclusion】 Diameter class has a great influence on the arbor layer biomass in planted *P. nigra* forests, and the reasonable ratio of diameter class is of great significance to improve the biomass and carbon stock of forests.

Keywords：diameter class; *Pinus nigra*; biomass allocation; Central-south mountainous Shandong

随着工业革命的发展，大气中的 CO_2 含量不断增加，全球气候变化已成为需科学界迫切解决的重大科学问题[1-2]。森林作为地球上最大的陆地碳库，其碳储量约占陆地生态系统总碳库的 80%，并累计超过 45%的陆地生物碳圈[3]，对维持全球碳平衡、减缓全球气候变化等问题具有重要意义[4-5]。

径级是指森林中原木的直径值，影响着树木的树高、干形、材积、材种及冠幅等因子[6]，森林径级反映了森林种群个体间的分异情况，揭示了森林种群数量的动态变化，对于研究和了解森林种群的更新对策、生态特征和生态效益等具有重要作用[7-10]。任雲雲等[11]认为大径级人工林对社会、林业的发展有着重要意义。森林生物量是指森林生态系统中所有干物质之和，生物量大小可以体现森林生态系统的健康程度，反映森林与其环境在物质循环和能量流动上的复杂关系[12]，是森林生态系统碳储量的数据来源及评价森林生态系统结构和功能的重要指标[13]。不少学者研究发现，生物量与碳储存、物种多样性和丰富度存在着关联性[14-16]。

黑松（*Pinus thunbergii*）属于松科松属[17]，是一种重要的林木资源，原产日本及朝鲜南部海岸地区，适合生长在温暖湿润的海洋性气候地区，在我国东北地区、华东地区、华中地区、华北地区均有引种栽植[18]。黑松因其四季常青、树形优美，常用于道路、小区、广场造景，是重要的城市绿化树种；同时又因其抗病虫害能力强、耐寒、耐热、耐旱、耐瘠等特性[19]，常作为沿海防护林及山地丘陵区主要造林树种之一。目前，对黑松人工林的研究多集中在林龄、林分类型、病虫害防治、分子遗传等不同方面[20-23]，而有关径级对黑松人工林生物量、碳储量的研究较少。为此，本研究以黑松人工林为研究对象，分析不同径级下黑松人工林植被层生物量变化特征，揭示径级对黑松人工林生物量分配的影响，为森林经营管理、城市造林、树种选择及区域碳收支平衡的维护提供科学依据。

1　研究区概况

研究区位于鲁中南山区（117°24′—119°11′ E，

34°22′—36°13′ N），属温带季风气候，气温适宜，四季分明，光照充足，雨量充沛，雨热同季，无霜期长。自然植被茂盛，种类丰富。

2 研究方法

2.1 样方选择

2023 年 7 月在鲁中南山区选取径级（0，5）、[5，8）、[8，11）、[11，14）、[14，17）、[17，20）、[20，23）、[23，26）、[26，29）cm 的黑松人工纯林（最小径级（0，5）cm 到最大径级[26，29）cm，大体等距确定变化范围为 3 cm，共划分 9 个径级组[24]）。每个径级设置 3 个 25.8 m × 25.8 m 的标准样地（表 1），在每个标准样地按“品”字型设置 3 个 5.0 m × 5.0 m 的灌木样方和 3 个 1.0 m × 1.0 m 的草本样方，进行灌木层、草本层生物量的测定。对标准样地内对每株树木进行胸径、树高、冠幅测定后，选取 3 棵标准木进行乔木层生物量的测定。

表 1 标准样地概况

径级范围/cm	坡位	林分密度/（株/hm^2）	纬度 N	经度 E	海拔/m
（0，5）	中	1 800±150	36°15′64″	118°61′96″	369.0
[5，8）	南	1 800±150	34°42′08″	118°22′17″	360.0
[8，11）	中	1 500±150	35°35′46″	118°18′58″	223.0
[11，14）	上	1 500±150	36°08′18″	118°36′59″	410.2
[14，17）	上	1 200±120	35°42′45″	118°22′00″	454.9
[17，20）	中	1 200±120	35°35′58″	117°51′34″	410.5
[20，23）	中	1 050±90	35°45′80″	117°93′55″	75.8
[23，26）	上	1 050±90	36°03′39″	118°35′44″	630.0
[26，29）	中	900±75	36°10′13″	118°36′19″	624.5

2.2 生物量测定

2.2.1 乔木生物量

采用平均标准木法，在每个标准样地内选择生长正常、干形和冠形良好，能够代表平均生长状况的 3 棵黑松作为测定乔木生物量的样木。将样木伐倒、挖根，通过称重法测定树干、枝、叶、根的生物量。

1）树干生物量测定。从树木基部起，每 2 m 为一区，分成若干部分，顶部不足 2 m 取梢头，使用电子秤称取树木鲜重。将切割后的树干样品使用烘干器，进行样品烘干（105 ℃），计算出含水率，并利用树木鲜重，求出树干生物量。

2）树枝生物量测定。依据嵌套回归理论[25]，将树木上直接生长的枝进行切割，分为一级枝、二级枝……末级枝，之后进行称重，得出树枝鲜重。将树枝样品进行烘干（105 ℃），得出含水率。以鲜重、含水量为基础，计算枝条生物量。

3）树叶生物量。松类采用叶簇为单位统计，称出鲜重。依据系统抽样法抽出树叶样品，进行烘干（80 ℃），通过含水率得出树叶生物量。

4）树根生物量。本研究将根系分为<5 mm 为细根，>5 mm 为粗根。为保证树根的完整性，采用全株挖掘法和土钻法[26]称取鲜重。将取样品烘干，依据含水率得出生物量。

2.2.2 灌木生物量

在样地内设置 3 个 5.0 m × 5.0 m 的样方，将灌木全株挖掘，分为地上、地下部分并称鲜重，烘干（105 ℃）至恒重后，算出灌木生物量。

2.2.3 草本生物量

在样地内设置 3 个 1 m × 1 m 的样方，将草本全株挖掘，分为地上、地下部分并称鲜重，烘干（105 ℃）至恒重后，算出草本生物量。

2.3 数据分析

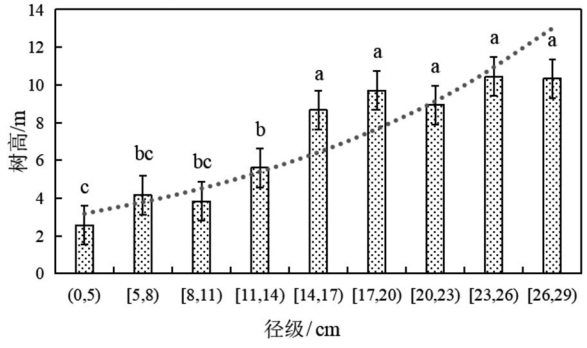
利用 SPSS 16.0 软件对数据进行显著性检验，采用单因素方差分析（ANOVA）、邓肯法（D）和最小显著差异法（LSD）在 5%的显著性水平上检验不同样地所测定结果的差异性是否显著。文中所有的插图均采用 Excel 2019 以及 Origin 2021 制作。

3 结果与分析

3.1 径级对黑松人工林树高的影响

由图 1 可知，黑松人工林树高随着径级的增大呈上升趋势。胸径范围为［8，20）cm 时，树高随胸径的增加呈直线上升，其中胸径［11，

14）、［14，17）、［17，20）cm 的树高分别为胸径［8，11）cm 的 1.46、2.26、2.53 倍。黑松胸径<8 cm 时，树高随胸径的增加程缓慢上升；当黑松径级达到 20 cm 后，树高随胸径的增加变化不大，其中胸径［20，23）、［23，26）、［26，29）cm 的树高分别为 8.93、10.43、10.33 m，各径级之间差异不显著（$P>0.05$），说明黑松树木高度的生长和胸径的大小有着密切的关系。总体来看，径级范围为［8，20）cm 时，黑松树高呈现快速生长趋势，而胸径范围为［5，11）和［17，23）cm 时，树高随胸径的增加而降低，具体原因还需要做进一步研究。



注：不同字母表示不同径级之间差异显著（$P<0.05$），下同。

图 1　不同径级黑松在树高上的分布

3.2　径级对单株黑松乔木生物量的影响

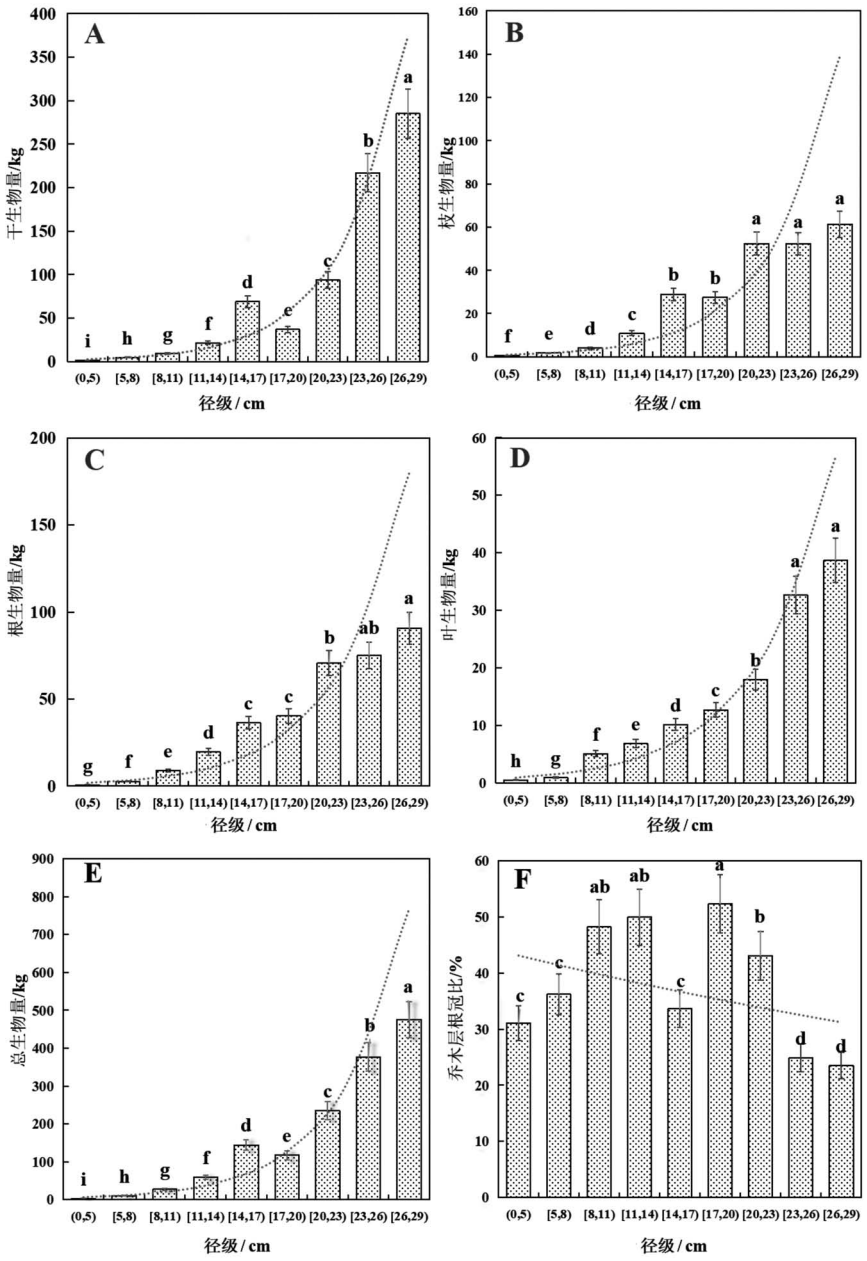
生物量是森林生态系统重要的数量属性[27]，乔木层是林分结构重要组成部分，能够截留降雨，并且是林分碳汇功能的主要承担者[28]。森林生物量的存量和生长量是体现森林固碳能力的重要指标，对估算森林生物量起到关键作用[29-30]。

如图 2A 所示，黑松干生物量随径级增大而增大，各径级之间差异显著（$P<0.05$），其中［26，29）cm 干生物量最高，分别为胸径（0，5）、［5，8）、［8，11）、［11，14）、［14，17）、［17，20）、［20，23）、［23，26）cm 的 200.25、59.28、30.46、13.23、4.14、7.74、3.04、1.31 倍。就枝生物量而言（图 2B），随着黑松径级的增加呈现先迅速升高后缓慢升高的变化趋势，其中胸径［20，23）、［23，26）、［26，29）cm 的枝生物量分别为 52.35、52.22、61.17 kg，各径级之间差异不显著（$P>0.05$）。黑松根生物量随径级升高的变化趋势和枝相似（图 2C），其中胸径（0，5）、［5，8）、［8，11）、［11，14）、［14，17）、［17，20）cm 的根生物量分别为 0.69、2.74、8.90、19.63、36.31、40.26 kg，各径级之间存在显著性差异（$P<0.05$）。黑松胸径（0，5）、［5，8）、［8，11）、［11，14）、［14，17）、［17，20）、［20，23）、［23，26）、［26，29）cm 的叶生物量分别为 0.51、0.98、5.08、6.84、10.13、12.71、17.98、32.67、38.69 kg，说明叶生物量随着径级的升高而升高（图 2D）。

黑松总生物量随着胸径的增加而增加（图 2E），（0，5）、［5，8）、［8，11）、［11，14）、［14，17）、［17，20）、［20，23）、［23，26）、［26，29）cm 的总生物量分别为 2.91、10.30、27.36、58.95、144.30、117.22、234.78、376.89、475.46 kg，且各径级之间差异显著。其中干生物量占比最高，根次之，叶最小。乔木层不同径级根冠比分别为 31.10%、36.21%、48.20%、49.94%、33.62%、52.31%、43.08%、24.85%、23.54%，胸径［17，20）cm 时，其根冠比是胸径［26，29）cm 的 2.22 倍。（图 2F）。总体来说，随着径级的增加，根冠比呈降低趋势，说明黑松倾向于将更多的资源分配到地上部分，以促进地上部分的生长从而提高地上部分的光合作用、支撑和运输能力。

3.3　径级对黑松人工林灌木层和草本层生物量的影响

如图 3 所示，黑松灌木层和草本层生物量随黑松径级的升高无明显变化趋势。对于灌木层生物量（图 3A），不同径级的生物量分别为 3.49、4.13、3.80、3.69、1.76、2.09、1.70、4.18、3.30 kg，除胸径［14，17）、［17，20）、［20，23）cm 的灌木层生物量差异性显著（$P<0.05$），低于胸径（0，5）、［5，8）、［8，11）、［11，14）、［23，26）、［26，29）cm 之外，各处理之间差异不显著（$P>0.05$）。如图 3B 所示，径级（0，5）、［8，11）、［14，17）、［23，26）、［26，29）cm 的黑松人工林草本层生物量明显高于径级［5，8）、［11，14）、［17，20）、［20，23）cm。可见，黑松人工林乔木层径级的大小对其林下灌草的生物量影响不大，这是否由于人为干扰引起的还需要进一步研究。



注：A：干生物量；B：枝生物量；C：根生物量；D：叶生物量；E：总生物量；F：乔木层根冠比。

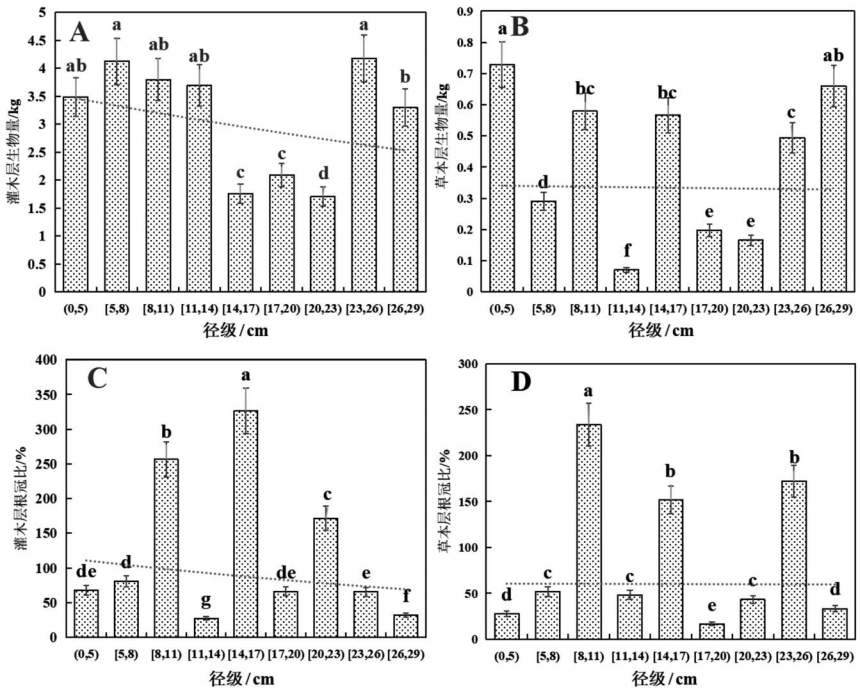
图 2 径级对单株黑松人工林乔木生物量的影响

就生物量分配率而言，不同径级灌木层根冠比分别为 67.77%、80.63%、256.60%、27.45%、326.53%、66.16%、171.60%、65.52%、32.12%，草本层根冠比分别为 27.78%、51.70%、233.58%、48.10%、151.78%、16.69%、43.08%、172.00%、33.29%。可见灌木层和草本层生物量分配率高低与乔木胸径大小关系不大。

3.4 植被层生物量与树高之间的相关性

图 4 所示，乔木层树高和乔木层、灌木层、草本层生物量相关系数分别为 0.76、−0.45、−0.14，可见，乔木层生物量随着乔木层树高的升高而升高，灌木层和草本层的生物量均随着乔木层树高的升高而降低。

就不同植被层的生物量而言，乔木层、灌木层、草本层之间均呈现正相关，但乔木层和草本层生物的相关系数明显大于乔木层和灌木层，可见草本层生物量随乔木层生物量的升高或降低趋势较灌木层明显，这是否与灌木生长需要较大的



注：A：灌木层生物量；B：草本层生物量；C：灌木层根冠比；D：草本层根冠比。

图 3　径级对黑松人工林植被层生物量的影响

光照强度导致的还需要进一步研究。总体来看，树高和乔木层生物量对灌木层和草本层生物量均有一定的影响。

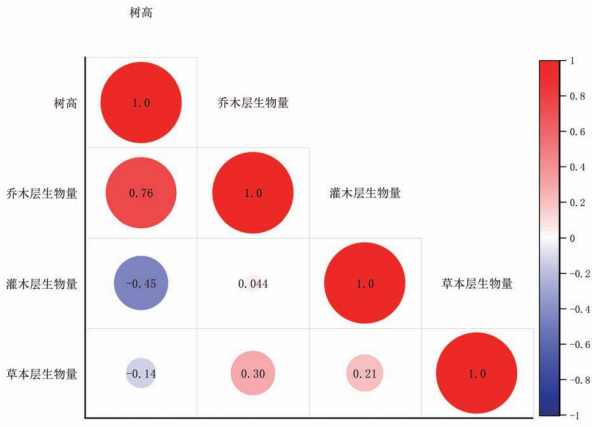


图 4　植被层生物量及树高之间的相关矩阵

4　讨论

森林径级结构是树木生长、竞争、死亡等过程的综合反映，也是估算森林生物量、判断森林演替阶段与健康状态以及预测森林碳汇潜力的基础依据[31]。生物量是树木储存能量的主要形式，与植物自身以及生长环境息息相关[32]。本研究中黑松人工林树高随着径级的增加而升高；当黑松胸径<8 cm 时，树高随胸径的增加呈缓慢上升趋势；当胸径范围为［8，20）cm 范围时，树高随胸径的增加直线上升，其中胸径［11，14）、［14，17）、［17，20）cm 的树高分别为胸径［8，11）cm 的 1.46、2.26、2.53 倍；当黑松径级达到 20 cm 后，树高随胸径的增加变化不大。孙宝刚等[33]研究发现，云南松林木生物量随着径级的增加呈现幂函数的增长趋势，树干、枝、叶、根各生物量均表现出大幅上升趋势，这与梁有祥等[34]研究发现火力楠（*Michelia macclurei*）单株生物量随着径阶的变化趋势相似，同时与本研究结果相似。树木径级是影响树木总生物量及各器官生物量的重要因素[35]，本研究中各径级下乔木层根冠比呈降低趋势，这与杜超群等[12]的研究结果相似；根冠比是植物地下部分与地上部分干重或鲜重的比值，反映植物地下部分与地上部分的相关性和植物对资源的分配情况[36-37]。本研究中根冠比随着径级的升高呈下降趋势，乔木层生物量在胸径［17，20）cm 时，其根冠比是胸径［26，29）cm 的 2.22 倍。

尽管林下植被生物量在林分总生物量中占比较小，但它在森林物质养分循环中扮演着重要角色[38]。灌木是陆地森林生态系统的重要组成部

分，在防风固沙、保持水土及维持区域生态稳定等方面发挥着不可替代的作用[39]。草本层被认为是森林生态系统重要的组成部分，其丰富的物种多样性在维护生态系统的稳定、优化生态系统功能、减缓气候变化以及改善局部小气候方面具有重要作用[40]。本研究中灌木层生物量随着径级升高呈下降趋势（图 3A），且与径级升高关联性不大，草本层生物量在胸径＜5 cm 时为最高值 0.729 kg，且随着径级增加呈降低趋势（图 3B），这与王乐军等[41]研究结果相似。王乐军等[41]的研究表明林下植被与林木生长存在密切的联系，本研究表明黑松树高和其灌木层生物量之间存在显著的负相关性（图 4）。黄栋才等[42]发现林木树冠郁闭后，其林下灌草难以实现更新，本研究中灌木层生物量和草本层生物量与乔木层生物量呈正相关（图 4），与本研究结果不同。笔者认为出现这种现象的主要原因之一是黑松乔木层生物量越多，其凋落物量越高，土壤养分越充足，灌草生长累计越多。这与周钰淮等[43]认为抚育间伐作为森林生态系统经营的关键措施，对于改善林分生长环境、优化林分结构具有重要作用的结论一致。研究发现，进入防火期后，护林员会将枯枝败叶、干枯的杂草和其他低矮乔灌木的枝干等进行清理[44]，并设置长达 20～30 m 的森林防火带[45]。故笔者认为，本研究中黑松径级对其林下灌木层和草本层生物量影响不大是森林防火措施导致的。

5 结论

黑松人工林树高随径级的增加呈现较快的上升趋势；总生物量随径级的增加而增加；乔木层是黑松人工林生态系统中重要组成部分且随着径级的增加而增大，灌木层、草本层生物量较小，随径级的增加不显著；乔木层生物量大小排序为树干>树根>树枝>树叶，灌木层和草本层根冠比随着径级的增加无明显变化。由此可见，合理的径级配置是影响林木生物量和提高碳汇能力的关键因子。

参考文献

[1]崔晓伟，王金胜，刘志晓，等.碳排放“双控”背景下山东省碳中和实现路径[J].生态学报，2024，44(21)：9783-9791.

[2]刘鸣，李志朋，李艳.气候变化和人类活动对南京主城区植被覆盖变化的影响[J].中国城市林业，2025，23(1)：11-17.

[3]WANG B，NIU X，XU T Y.Identifying the full carbon sink of forest vegetation：a case study in the three northeast provinces of China[J].Sustainability，2023，15(13)：10396.

[4]江佩宜，戴菲.城市绿地碳汇测算方法研究进展[J].中国城市林业，2024，22(1)：87-93.

[5]于鲁冀，张亚慧，王燕鹏，等.河南省森林碳汇价值时空特征及其影响因素[J].水土保持通报，2023，43(5)：288-296.

[6]方精云，郭兆迪，朴世龙，等.1981～2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D 辑：地球科学)，2007，37(6)：804-812.

[7]高贤明，王巍，杜晓军，等.北京山区辽东栎林的径级结构、种群起源及生态学意义[J].植物生态学报，2001，25(6)：673-678.

[8]盘金文，郭其强，余大龙，等.不同林龄马尾松人工林优势种径级结构及物种多样性分析[J].西北植物学报，2019，39(4)：722-728.

[9]韩路，王家强，王海珍，等.塔里木河上游胡杨种群结构与动态[J].生态学报，2014，34(16)：4640-4651.

[10]何东进，肖石红，李晓景，等.中国红树林北缘区秋茄树种群空间分布格局和结构特征分析[J].植物资源与环境学报，2014，23(2)：41-47.

[11]任雲雲，李雪，崔自杰，等.中国大径材人工林培育研究进展[J].世界林业研究，2024，37(3)：86-93.

[12]杜超群，袁慧，林虎，等.湖北杉木人工林生物量及其可变密度预估模型研究[J].西南林业大学学报(自然科学)，2024，44(3)：138-147.

[13]邓昭华，莫木信，陈玉华.火力楠人工林森林生物量和林分碳储量研究[J].陕西林业科技，2023，51(3)：48-51.

[14]WANG Y Y，DAI X Z，CHEN X L，et al.Effects of urbanization and forest type on species composition and diversity，forest characteristics，biomass carbon sink，and their associations in Changchun，NorthEast China：implications for urban carbon stock improvement[J].Journal of Forestry Research，2024，35(1)：36.

[15]DEVI N B，LEPCHA N T.Carbon sink and source function of Eastern Himalayan forests：implications of change in climate and biotic variables[J].Environmental Monitoring and Assessment，2023，195(7)：843.

[16]谢政锡，曹小玉，赵文菲，等.不同龄组杉木公益林林分空间结构与灌木物种多样性[J].生态学杂志，2022，41(8)：1466-1473.

[17]王琳琳，吕东安.蒙阴县黑松荒山造林幼林抚育管理技术及病虫害防治研究[J].绿色科技，2024，26(05)：123-126，130.

[18]孙圣君，颜廷强，谭佩芝.蒙阴县国有天麻林场常用造林树种栽培技术[J].南方农业，2024，18(4)：203-206.

[19]薛聪贤，杨宗愈.景观植物大图鉴 2：观赏树木 680 种[M].广

州：广东科技出版社，2015.
[20]付德刚，乔显娟，王新媛，等.林龄对黑松人工林植被层生物量分配的影响[J/OL].分子植物育种，1-10[2025-03-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231007.1317.006.html.
[21]任奕炜，钟小瑛，衣华鹏，等.不同林分类型对叶功能性状、林下物种多样性及土壤养分的影响[J].林业科学研究，2023，36(2)：161-168.
[22]李德斌，李志鹏，王伟韬，等.辽宁省松材线虫病疫木伐根传播风险研究[J].中国森林病虫，2023，42(6)：23-27.
[23]张宇.黑松抗松材线虫病相关 microRNAs 及其靶基因的筛选[D].青岛：青岛大学，2023.
[24]国家林业局.立木生物量建模样本采集技术规程：LY/T 2259—2014[S].北京：中国标准出版社，2014.
[25]刘琪璟.嵌套式回归建立树木生物量模型[J].植物生态学报，2009，33(2)：331-337.
[26]李维炯.测定根生物量的简便方法：土钻法[J].耕作与栽培，1984，4(6)：73.
[27]蒋晨阳，李宪，张涵，等.不同杉木林分类型乔木层生物量与碳储量及养分分布特征[J].东北林业大学学报，2023，51(9)：8-14.
[28]郭宾良.冀西北 3 种典型林分乔木层生物量研究[J].防护林科技，2024(4)：66-68，76.
[29]李敏敏，刘鹏程，温庆忠，等.不同林龄西南桦人工林的生物量及其分配特征[J].西部林业科学，2024，53(4)：91-97，104.
[30]王姣娇，高唤唤，康宏樟.杉木人工林碳储量影响因素研究进展[J].西北林学院学报，2018，33(3)：74-81.
[31]周建，王焓.森林径级结构研究：从统计描述到理论演绎[J].植物生态学报，2024，48(6)：675-689.
[32]赵虎，杜超群，袁慧，等.鄂西日本落叶松人工林碳储量成熟龄研究[J].森林与环境学报，2023，43(2)：132-138.
[33]孙宝刚，陈飞，王健敏，等.不同径级云南松各部位生物量及其分布规律[J].林业科学研究，2012，25(1)：71-76.
[34]梁有祥，韦中绵，玉桂成，等.桂东南地区火力楠人工林生物量研究[J].林业科技开发，2010，24(5)：45-49.
[35]林国刘.云南松不同径级组各部位生物量对比研究[J].林业调查规划，2022，47(3)：21-26.
[36]张志明，孙小妹，包段红，等.祁连山北麓荒漠草原 5 种优势植物生物量与土壤养分特征[J].干旱区地理，2024，47(4)：662-671.
[37]孙越，何怀江，李良，等.阔叶红松林下 6 种早夏草本不同生长期生物量分配及模型构建[J].生态学报，2017，37(19)：6523-6533.
[38]韩畅，宋敏，杜虎，等.广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征[J].生态学报，2017，37(7)：2282-2289.
[39]张建设，邱林，王晓云，等.间伐强度对黄山松人工林林下植被的影响[J].甘肃农业大学学报，2025，60(1)：224-230.
[40]郭玉东.库布齐沙漠地区人工灌木林生物量与碳密度研究[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.
[41]王乐军，曹恭祥，李银祥，等.毛乌素沙地羊柴人工林生物量特征及固碳能力研究[J].内蒙古林业科技，2024，50(1)：14-18.
[42]黄栋才，郭鑫，王得祥，等.不同经营方法对秦岭华北落叶松林分生长和林下植被的影响[J].林业科学，2024，60(8)：57-66.
[43]周钰淮，王瑞辉，刘凯利，等.抚育间伐对川西柳杉人工林生长和林下植被多样性的影响[J].中南林业科技大学学报，2022，42(6)：65-74，84.
[44]吴锡成.营林技术在森林防火中的应用及管理对策[J].现代农业科技，2022(13)：90-92.
[45]李志伟.浅谈常见林业造林方法及森林防火措施[J].新农业，2022(19)：53-55.