

北京山区侧柏人工林林内景观质量分级技术

赵 凯, 李金航, 刘海轩, 马冰倩, 龙嘉翼, 崔哲浩, 徐程扬

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 北京山区侧柏 *Platycladus orientalis* 人工林在发挥生态服务功能的同时, 其景观质量也备受关注, 林内景观质量受美学质量和林分结构质量共同影响。综合考虑美学质量与林分结构质量, 对北京山区侧柏人工林进行林内景观质量分级。通过相关分析筛选与林内美景度显著相关的林分结构指标, 通过因子分析和逐步回归分析构建美景度模型, 使用 TOPSIS 法和系统聚类分析对林内景观质量进行分级。结果显示: ①平均胸径、林分密度、平均枝下高、灌木盖度、透视距离、郁闭度、径高比与美景度呈显著相关($P<0.05$), 林下有效空间与美景度呈极显著相关($P<0.01$); ②二次多项式逐步回归模型能够更好地解释林分结构与美景度间的关系; ③将山区侧柏人工林分为高质(I级)、中等(II级)、低质(III级)3个等级, 选择在各等级间差异显著的平均胸径、林分密度、平均枝下高、径高比、林下有效空间指标作为划分等级的主要参考依据。林内景观质量等级较高的林地, 树木粗壮且长势较好, 林分密度不宜过大, 枝下高较高且林下灌木较低矮, 具有一定的林下空间, 林内可进入性较高。图1表5参27

关键词: 景观生态学; 侧柏人工林; 美景度评价; TOPSIS法; 景观质量分级

中图分类号: S758.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)03-0557-08

Landscape quality grading technology for *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas

ZHAO Kai, LI Jinhang, LIU Haixuan, MA Bingqian, LONG Jiayi, CUI Zhehao, XU Chengyang

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: *Platycladus orientalis* plantations in the Beijing mountainous areas provide an ecological service function paying much attention to its landscape aesthetic quality with forest landscape quality being influenced by aesthetic quality and quality of stand structure. This study considered both aesthetic quality and stand structure for Beijing mountainous area biota of *P. orientalis* plantation forests for landscape grading quality. The forest structural indexes strongly related to scenic beauty in the forest were selected through a correlation analysis; then the landscape model was constructed by factor analysis and stepwise regression analysis; and finally the forest landscape quality was classified by the TOPSIS method and systematic cluster analysis. Results showed (1) the average diameter at breast height (DBH) ($r = 0.284$), forest density ($r = -0.285$), average height of the clear bole ($r = 0.274$), shrub coverage ($r = 0.307$), perspective distance ($r = 0.311$), density ($r = -0.323$), and diameter to height ratio ($r = 0.307$) were significantly correlated with scenic beauty ($P<0.05$). The effective space under the forest had a highly significant correlation to scenic beauty ($r = 0.457, P<0.01$). (2) The Quadratic Polynomial Stepwise Regression Model better explained the relationship between forest fractional structure and landscape degree. (3) The mountainous area of *P. orientalis* was divided into three levels: high quality (Level I), medium grade (Level II), and low quality (Level III). The average DBH, forest density, average clear bole height, diameter to height ratio, and effective spatial index under the forest were selected as the main references for classification. Thus, the forest landscape with high quality was thick and strong

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-11-01

基金项目: 国家林业公益性行业重大项目(201404301)

作者简介: 赵凯, 从事城市林业研究。E-mail: 664366440@qq.com。通信作者: 徐程扬, 教授, 博士, 从事城市树木与环境、城市森林构建、经营与评估等。E-mail: cyxu@bjfu.edu.cn

with the density of trees relatively favorable, the density of the forest not too large, a higher clear bole, and a relatively low forest underbrush, having a certain undergrowth space and higher accessibility of the forest. [Ch, 1 fig. 5 tab. 27 ref.]

Key words: landscape ecology; *Platycladus orientalis* plantations; assessment of beauty; TOPSIS method; landscape quality classification

北京森林资源覆盖率较高,但人工林面积大,且纯林较多。其中,山区针叶人工林普遍存在林分结构简单、林木密度过大、林木生长缓慢、植物多样性水平低下、群落稳定性差等现象^[1-2],导致了山区针叶人工林综合质量偏低、景观效果偏差,并进一步影响了森林生态系统服务功能的发挥。侧柏 *Platycladus orientalis* 是北京山区针叶人工林的主要组成树种,其面积相对较大,但由于立地条件较差、抚育滞后、林分结构不合理、林木生长势衰弱,未能充分满足人们观赏、游憩的需求。风景游憩功能是北京市交通干线等通道两侧一重山范围森林的重要培育目标之一,因此,提升山区森林视觉景观质量已成为北京市森林经营的核心工作。目前,对景观质量的研究多侧重于美学方面^[3-5],鲜有同时兼顾美学与林分结构的综合景观质量评价。合理的林分结构是良好林分功能实现的基础,林分结构决定了森林的稳定性、发展的可能性和经营空间的大小^[6-8],影响森林景观的健康、高效和可持续发展。因此,林分空间结构调控是森林经营活动的本质,对林分空间结构进行定量分析,将提高林分经营决策的准确性^[9-10]。中国部分学者采用综合指数法或层次分析法进行林分结构质量评价^[11-12];而更多的是将林分结构作为美学质量评价的基础,如在美学质量评价中,通过构建美景度模型,探究林分结构指标对美学质量的影响^[13-16]。林分结构评价指标多从水平、垂直以及组成结构考虑^[17-19],选择生产实践中易于获得的指标构建评价指标体系,也有因研究目的不同,引入间接计算指标,如空间聚集指数、胸径大小分化度、竞争指数等,从林木竞争、空间分布格局、林木大小分化程度等角度构建指标体系^[20-21]。本研究以北京山区侧柏人工林为研究对象,以林分结构和美学结构为依据,构建北京山区针叶林景观质量评价指标体系,通过综合分析林分结构质量、美学结构质量,提出一套适合山区侧柏人工林的林内景观质量分级方法,为山区侧柏人工林的景观改造提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验样地分布在北京市西山林场、九龙山林场和金海湖3个地区。北京市西山林场位于北京市近郊小西山,总面积为5 949 hm²,所处小西山属太行山系的低海拔石质山,山区平均海拔为20~400 m,年降水量660 mm。小西山土层厚为30~50 cm,土壤中石砾含量多,立地条件较差,不利于造林和树木生长。植被类型属暖温带落叶阔叶林,主要组成树种有侧柏、油松 *Pinus tabulaeformis*, 刺槐 *Robinia pseudoacacia*, 黄栌 *Cotinus coggygria*, 元宝枫 *Acer trunoatum*, 栎树 *Koelreuteria paniculata*, 栓皮栎 *Quercus variabilis*, 山桃 *Prunus davidiana* 和山杏 *Prunus armeniaca* 等,天然分布的乔木树种有构树 *Broussonetia papyrifera*, 蒙桑 *Morus mongolica* 和臭椿 *Ailanthus altissima* 等,灌木组成有荆条 *Vitex negundo*, 酸枣 *Ziziphus jujuba*, 孩儿拳头 *Grewia biloba* 和锈线菊 *Spiraea salicifolia* 等。九龙山位于北京西郊门头沟区东南部,属太行山低山丘陵区,海拔为100~997 m。山体基本呈东西走向,形成典型的大阳坡和大阴坡。山坡普遍较陡,坡度多在25°以上,年均降水量623 mm,属暖温带大陆东岸半湿润季风气候。土壤类型属于山地褐土,土层普遍较薄,含石量高。侧柏人工林主要分布于低阳薄松的立地上,面积为284.89 hm²,占总面积的25%;蓄积为7 265.31 m³,占总蓄积的21%。乔木主要有侧柏,油松,栓皮栎,华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*, 黄栌和白蜡树 *Fraxinus chinensis* 等;灌木主要有酸枣、荆条和三裂绣线菊 *Spiraea trilobata* 等;草本植物主要有狗尾草 *Setaria viridis*, 茜草 *Rubia cordifolia* 等。金海湖位于北京市平谷区东部,地处京、津、冀交汇处,主要山脉为燕山山脉西段,属暖温带半湿润大陆性季风区。金海湖周边主要组成树种是侧柏和油松,以中幼龄林为主,林分密度较大;灌木组成有酸枣、荆条和小叶鼠李 *Rhamnus parvifolia* 等;草本植物主要有紫堇 *Corydalis edulis* 和马唐 *Digitaria sanguinalis* 等。

1.2 样地调查

在对西山林场、九龙山林场及金海湖周边全面踏查的基础上，采用典型抽样的方法共设置 55 块样地，样地大小为 20 m × 20 m，调查、记录标准地内所有树木(检尺直径 4 cm)；在样地的 4 角和中间设置 5 个 5 m × 5 m 的灌木样方和 5 个 1 m × 1 m 的草本样方。

采用地理信息系统(GPS)测定样地的海拔，用罗盘仪测定坡度，并记录样地的林内透视距离、郁闭度；对乔木进行每木检尺，记录树种名称、树高、胸径、冠幅、活枝下高；样地内林下层植被调查包括灌木与草本的高度、盖度以及灌草总盖度。

表 1 样地概况

Table 1 Main factors of sample plots

样地位置	样地数量/个	林分密度/(株·hm ⁻²)	灌木盖度/%	平均树高/m	平均胸径/cm
西山林场	21	550~2 600	15~85	8.2 ± 0.2	15.9 ± 0.8
九龙山林场	18	750~2 100	15~75	7.4 ± 0.2	11.7 ± 0.7
金海湖	16	1 025~2 600	15~90	7.2 ± 0.1	9.7 ± 0.3

1.3 指标选取和计算

林分结构指标包括平均树高、平均胸径、平均冠幅、平均枝下高、林分密度、灌木盖度、草本盖度、灌草总盖度、郁闭度、透视距离以及林分结构复合指标。林分符合结构指标，包括反映林木相对生长状况的径高比(DHR)、反映树冠向外舒展程度的树冠伸展度(CED)、反映乔木相对密度大小的胸高断面积(BA)、反映林下空间大小的平均冠长率(CR)和林下有效空间(UES)共计 15 个指标，复合指标计算公式如下： $R_{DH}=D/H$ ； $D_{CE}=W_c/H$ ； $A_B=25 \sum \pi D^2/4$ ； $R_C=L_c/H$ ； $S_{UE}=1-H_s/L_{LC}$ 。其中： R_{DH} 是径高比； D 为胸径(cm)； H 为树高(m)； D_{CE} 是树冠伸展度； W_c 为冠幅(m)； A_B 为胸高断面积(cm²·hm⁻²)； R_C 为平均冠长率； L_c 为冠长(m)； S_{UE} 为林下有效空间； H_s 为灌木高度(m)； L_{LC} 为活枝下高(m)。

1.4 景观照片拍摄与评价

本研究中进行林内美景度评价。参照前人的林内景观照片拍摄规范^[15]，使用 Nikon D 7100 相机对样地进行拍照取样。

1.5 美景度(S_{BE})计算

①按照等级值的大小顺序统计各等级的频率(f)，计算相应的累积频率(f_c)、累积概率(cp)和正态分布单侧分位数(z)；②求各等级对应的 z 值的平均值 \hat{Z} ；③随机选择一景观作为对照景观， $S_{BE}=(\hat{Z}_i-\hat{Z}_0) \times 100$ 。其中： \hat{Z}_0 为对照景观各等级对应的 z 值的平均值， \hat{Z}_i 为第 i 个景观各等级对应的 z 值的平均值。

1.6 TOPSIS 分级法

TOPSIS 法是系统决策分析中常用的排序方法，是一种逼近于理想解的排序法。方案排队的决策规则是把实际可行解和理想解与负理想解作比较，若某个可行解最靠近理想解，同时又最远离负理想解，则此解是方案集的满意解^[22]。根据各样地与其对应指标最优方案及最劣方案的距离 D_i^+ 与 D_i^- ，计算各样地景观质量与最优方案的接近程度 C_i ，计算公式为： $C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$ 。式中， C_i 在 0 与 1 之间取值，愈接近 1，表示越接近最优水平，反之，愈接近 0，表示越接近最劣水平。

2 结果与分析

2.1 结构指标对林内美景度的影响

相关分析发现(表 2)：共有 8 个结构指标与林内美景度相关性显著，其中平均胸径、林分密度、平均枝下高、灌木盖度、透视距离、郁闭度、径高比与美景度间显著相关($P < 0.05$)；林下有效空间与美景度极显著相关($P < 0.01$)。根据 Pearson 相关系数绝对值判定指标对林内美景度影响程度排序从大到小依次为林下有效空间、郁闭度、透视距离、径高比、灌木盖度、林分密度、平均胸径、平均枝下高。其中，林下有效空间、透视距离、径高比、平均胸径、平均枝下高与美景度间为正相关，林分密度、郁闭度、灌木盖度与美景度间为负相关。

表2 林分结构与美景度间相关性分析

Table 2 Correlation analysis between forest structure and scenic beauty

林分结构指标	相关系数	林分结构指标	相关系数	复合林分结构指标	相关系数
平均树高	0.188	灌木盖度	-0.307*	径高比	0.307*
平均胸径	0.284*	草本盖度	-0.003	树冠伸展度	0.008
平均冠幅	0.110	灌草盖度	-0.239	胸高断面面积	0.099
林分密度	-0.285*	透视距离	0.311*	平均冠长率	-0.241
平均枝下高	0.274*	郁闭度	-0.323*	林下有效空间	0.457**

说明：*表示 $P < 0.05$ ，**表示 $P < 0.01$

2.2 林分结构因子构建

对与林内美景度相关性显著的8个结构指标进行数据标准化，通过主成分因子分析并采用方差最大法进行旋转，构造了3个林分结构因子，其累计贡献率为83.93%，能够反映林分结构的主要信息。根据因子载荷矩阵发现：第一公因子与平均胸径、径高比、林下有效空间较强正相关，与林分密度较强负相关，主要反映林木生长状况与林内拥挤程度，定义为林内拥挤因子，记为 F_1 ；第二公因子与灌木盖度、郁闭度较强正相关，与透视距离较强负相关，主要反映林内空间开阔程度，定义为林内开阔因子，记为 F_2 ；第三公因子与平均枝下高较强正相关，主要反映林下空间高度，定义为林下高度因子，记为 F_3 (表3)。

根据林分结构指标在各因子上的载荷值，构建林分结构因子计算公式： $F_1 = 0.931x_1 - 0.877x_2 + 0.951x_7 + 0.593x_8$ ； $F_2 = 0.863x_4 - 0.892x_5 + 0.866x_6$ ； $F_3 = 0.909x_3$ 。以各因子的方差贡献率为权重构造林分结构质量指数 F ，计算公式如下：林分结构质量指数 $F = (0.382 \ 3F_1 + 0.298 \ 1F_2 + 0.158 \ 9F_3) / (0.382 \ 3 + 0.298 \ 1 + 0.158 \ 9)$ 。

2.3 林内景观美景度模型建立

以构建的3个林分结构因子作为自变量，美景度值为因变量，分别采用线性回归、二次多项式回归和二次多项式逐步回归进行模型拟合，并经系数标准化处理后，得到美景度模型(表4)。通过比较发现，3个模型的 P 值均小于0.05，但二次多项式逐步回归模型的 R^2 最大，模型的拟合精度更高，因而能够更好地解释美景度与林分结构间的关系。

表4 基于林分结构指标的美景度模型构建

Table 4 Construction of landscape model based on forest structure index

模型类型	模型表达式	R^2	P
线性模型 回归模型	$S_{BE} = -0.093F_1 + 0.469F_2 + 0.293F_3$	0.251	0.021
二次多项 回归模型	$S_{BE} = 0.293F_1 - 0.616F_2 + 0.429F_3 - 0.219F_1^2 + 0.131F_1F_2 - 0.047F_1F_3 - 0.180F_2F_3 + 0.327F_2^2 - 0.095F_3^2$	0.458	0.006
式模型 逐步回归模型	$S_{BE} = 0.202F_1 - 0.544F_2 + 0.394F_3 - 0.230F_2F_3 + 0.248F_2^2$	0.571	<0.001

2.4 林内景观质量分级

首先将林分结构指数和美景度进行归一化处理，然后采用TOPSIS法计算各样地林分结构指数与美景度的最优距离 D^+ 和最劣距离 D^- ，确定评价指标与最优方案的接近程度 C_i 。最终选择Ward法以欧氏距离对55块样地的TOPSIS值进行聚类分析，将划分林内景观质量划分为3个等级。其中，Ⅰ级林内景观质量最好，共有19块样地，其TOPSIS均值为0.614，取值范围为[0.537, 0.807]，定义为优质景观林；Ⅱ级林内景观质量次之，共有17块样地，其TOPSIS均值为0.468，取值范围为[0.403, 0.537]，定义为良好景观林；Ⅲ级林内景观质量较差，共有19块样地，其TOPSIS均值为0.292，取值范围为[0.085, 0.403]，定义为低质景观林。

通过方差分析和多重比较发现(图1)：美景度值、林分结构质量指数、平均胸径、林分密度、径高

表3 林分结构指标因子分析

Table 3 Forest structure index factor analysis

指标	F_1	F_2	F_3
平均胸径 x_1	0.931	-0.113	0.228
林分密度 x_2	-0.877	0.013	-0.180
平均枝下高 x_3	0.278	-0.006	0.909
灌木盖度 x_4	-0.222	0.863	-0.040
透视距离 x_5	-0.134	-0.892	0.186
郁闭度 x_6	-0.150	0.886	0.093
径高比 x_7	0.951	-0.103	0.147
林下有效空间 x_8	0.593	-0.186	0.542
方差贡献率/%	38.23	29.81	15.89
累计方差贡献率/%	38.23	68.04	83.93

比、林下有效空间在 I, II, III 级间均存在显著差异,且随着景观质量等级降低,美景度、林分结构质量指数、平均胸径、径高比和林下有效空间均显著降低,而林分密度随景观质量等级降低而显著增加;平均枝下高仅在 I 和 II 等级间差异显著,随景观质量等级降低而显著下降,灌木盖度、郁闭度、透视距离在 I, II 和 III 等级间差异均不显著。由此可见,对林内景观质量影响较大的林分结构指标主要是平均胸径、林分密度、径高比、林下有效空间,其次是平均枝下高,而灌木盖度、郁闭度和透视距离对景观质量分级影响不显著。

最终选择在景观质量等级间差异显著地林分结构指标作为分级标准,具体分级结果如下(表 5): I 级景观林林内美景度、林分结构质量最高,主要表现为胸径粗壮且径高比较大,树木长势旺盛,且林分密度较低,枝下高较高且林下有效空间较大、林内空间开阔,定义为优质景观林; II 级景观林林内美景度、林分结构质量较一般,主要表现为胸径适中且径高比较大,树木长势良好,且林分密度适中,枝下高较高具有一定的林下空间,定义为中等景观林; III 级景观林林内美景度和林分结构质量均较低,主要表现为胸径细小,树木长势一般,林分密度较大,枝下高较低,林下空间较小,定义为低质景观林。

分级结果表明:所调查 55 个样地中,各景观质量等级的样地数量较平均。其中,林内景观质量等

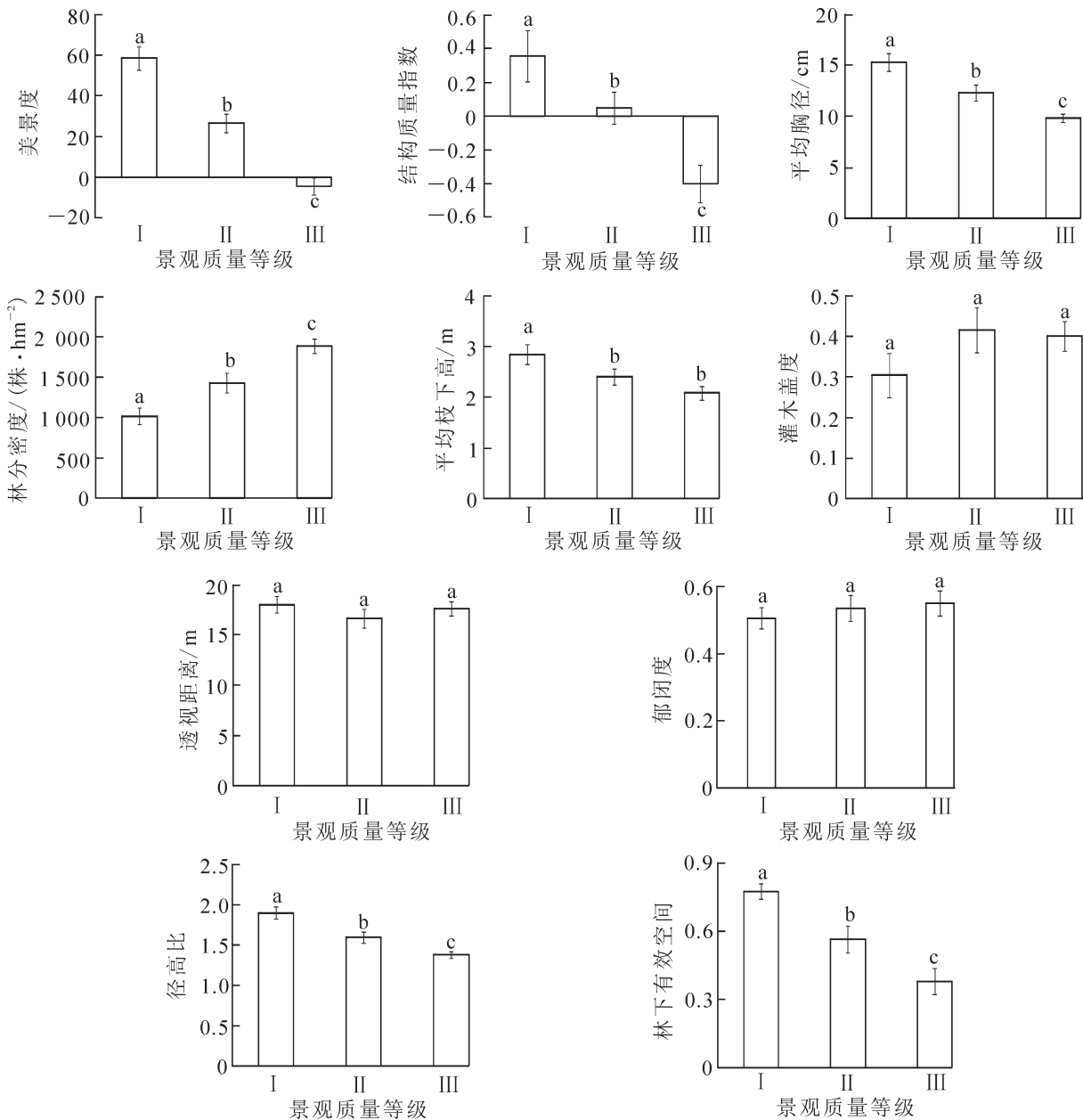


图 1 不同等级间指标差异显著性分析

Figure 1 Significance analysis of index difference between different grades

表5 林内景观质量分级结果及标准

Table 5 Forest landscape quality grading results and standards

等级	样地数量	美景度	林分结构质量指数		主要林分结构指标			
			量指数	平均胸径/cm	林分密度/(株·hm ⁻²)	平均枝下高/m	径高比	林下有效空间
I	19	58.57	0.36	15.3	1 019	2.8	1.90	0.78
		[-2.56, 95.49]	[-0.61, 1.77]	[10, 20.7]	[550, 2 075]	[2.0, 5.1]	[1.46, 2.56]	[0.36, 0.91]
II	17	26.78	0.05	12.3	1 432	2.4	1.60	0.57
		[-9.8, 52.87]	[-0.73, 0.59]	[8.6, 19.0]	[750, 2 200]	[1.4, 3.5]	[1.28, 2.18]	[-0.02, 0.88]
III	19	-4.26	-0.40	9.8	1 891	1.1	1.38	0.38
		[-41.73, 23.33]	[-1.25, 0.23]	[7.5, 12.9]	[1 450, 2 600]	[1.1, 3.3]	[1.16, 1.75]	[-0.08, 0.78]

说明：括号内数值为取值范围

级较高的林地，美学质量和林分结构质量都较高，树木粗壮、长势较好，林分密度不宜过大，枝下高较高且林下灌木较低矮，具有一定的林下空间，林内可进入性较高。

3 结论与讨论

对 15 个林分结构指标与美景度进行相关分析发现，平均胸径、林分密度、平均枝下高、灌木盖度、透视距离、郁闭度与美景度呈显著相关($P < 0.05$)；径高比与美景度呈显著相关($P < 0.05$)，林下有效空间与美景度呈极显著相关($P < 0.01$)，这与前人的研究结果相符^[23-26]。此外，通过比较得知，树高与美景度无显著相关性，但径高比与美景度相关关系显著且相关系数高于树高和胸径，说明乔木的绝对高度对林内美景度没有显著影响，但胸径与树高的相对生长情况与美景度显著相关；平均枝下高与美景度相关性显著而平均冠长率与美景度相关不显著，说明林内美景度与绝对枝下高度相关而平均冠长率不能有效衡量林下空间高度；林分密度与美景度显著相关而胸高断面面积与美景度相关性不显著，说明对美景度影响更大的是单位面积上的乔木数量；灌木盖度与美景度相关性显著而草本盖度、灌草总盖度与美景度没有显著相关性，主要原因是草本较低矮，因此其盖度变化对林内景观质量影响较小。

以往大多数研究构建的美景度模型为线性模型，非线性模型较少^[16,26-27]，本研究对与美景度显著相关的林分结构指标进行主成分因子分析，构建了 3 个林分结构因子，减小了各林分结构指标间相关性对模型的影响，并以此作为自变量构建与美景度间的线性模型和二次多项式模型，并采用逐步回归分析筛选自变量。通过比较发现，林分结构质量指数与美景度间并不是简单的线性相关关系，逐步回归二次多项式模型的模型精度更高，能够更好地解释美景度随林分结构指标的变化。

通过美景度的聚类分析对景观类型进行划分和质量分级^[17,26]，缺乏对林分结构信息的考虑；在单木分级中，有用 TOPSIS 法综合考虑生长势和美景度值对单木进行分级^[15]。因此，本研究将 TOPSIS 法应用到林内景观质量分级，通过因子分析构建林分结构因子，并以各因子方差贡献率作为权重构造的林分结构质量指数，并最终采用 TOPSIS 法，综合考虑林分结构质量指数与美景度值，通过聚类分析，将林内景观质量分为优质、中等和低质 3 个等级，并通过方差分析和多重比较，选择在各景观质量等级间差异性显著的林分结构指标作为分级标准，为山区侧柏人工林林内景观质量分级提供参考。分级结果表明：林木胸径较大、枝下高较高且长势良好，林分密度较低，林下灌木较低矮的林分林内景观质量较高。因此，在今后抚育管理中，应注意适当间伐、控制林分密度，保留和培育大径级的林木，及时修枝、伐除枯枝促进主干生长、调整树冠形态并对长势弱的林木进行复壮更新，定期割灌并控制灌木高度，提高林下有效空间，改善林内透视距离，从而提高林内景观质量。

4 参考文献

- [1] 董建文, 翟明普, 徐程扬, 等. 京郊侧柏刺槐混交林植物物种组成特征对林内景观美精度的影响[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(5): 756 - 761.
- DONG Jianwen, ZHAI Mingpu, XU Chengyang, et al. Effect of the character s of species composition on scenic beauty of in-forest landscape of *Platyclusus orientalis-Robinia pseudoacacia* plantation forest in the suburbs of Beijing [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2007, 29(5): 756 - 761.

- [2] 赵匡记,汪加魏,施侃侃,等.北京市西山林场游憩林抚育的森林健康评价[J].中南林业科技大学学报,2014,34(10):66-69.
ZHAO Kuangji, WANG Jiawei, SHI Kankan, *et al.* Forest health evaluation for tending of recreational forest in Xishan forest farm in Beijing City [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, 34(10): 66 - 69.
- [3] KARDAN O, DEMIRALP E, HOUT M C, *et al.* Is the preference of natural versus man-made scenes driven by bottom-up processing of the visual features of nature? [J]. *Front Psychol*, 2015, 6: 471. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00471.
- [4] GRIFFON S, NESPOULOUS A, CHEYLAN J P, *et al.* Virtual reality for cultural landscape visualization [J]. *Virtual Reality*, 2011, 15(4): 279 - 294.
- [5] FANAROTU I, SKURAS D. The contribution of scenic beauty indicators in estimating environmental welfare measure: a case study [J]. *Soc Indic Res*, 2004, 6(5): 145 - 165.
- [6] 肖欣,丁松,欧阳勋志.井冈山自然保护区典型常绿阔叶林林分空间结构分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):134-139.
XIAO Xin, DING Song, OUYANG Xunzhi. Stand spatial structure of typical evergreen broad-leaved forests in Jinggang Mountain National Nature Reserve [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2016, 44(3): 134 - 139.
- [7] 邓超.基于多功能经营的杉木生态公益林空间结构优化研究[D].长沙:中南林业科技大学,2016.
DENG Chao. *Study on Optimization of Spatial Structure of Cunninghamia lanceolata Ecological Public Welfare based on Multi-Functional Management* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [8] 游晓庆,彭诗涛,郭孝玉,等.闽楠天然次生林林分空间结构研究[J].江西农业大学学报,2016,38(4):660-667.
YOU Xiaoqing, PENG Shitao, GUO Xiaoyu, *et al.* A study on the spatial structure of natural secondary *Phoebe bournei* forest [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2016, 38(4): 660 - 667.
- [9] 汤孟平.森林空间结构研究现状与发展趋势[J].林业科学,2010,46(1):117-122.
TANG Mengping. Advances in study of forest spatial structure [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, 46(1): 117 - 122.
- [10] POMMERENING A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis [J]. *For Ecol Manage*, 2006, 223(3): 266 - 277.
- [11] 周建勤.北京低山风景区残次林评价与改造研究[D].北京:北京林业大学,2012.
ZHOU Jianqin. *Study on the Assessment and Reforms of Scenic Spot Relict Forest in the Low Mountain of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [12] 王晓荣,刘学全,唐万鹏,等.丹江口库区龙口林场水源涵养林林分质量评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(4):63-68.
WANG Xiaorong, LIU Xuequan, TANG Wanpeng, *et al.* Evaluation on stand quality of water conservation forest in Longkou Forest Farm on Danjiangkou reservoir area [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2013, 37(4): 63 - 68.
- [13] 韦新良,何莹.生态景观林景观效果构成特性定量分析[J].西北林学院学报,2011,26(6):181-185.
WEI Xinliang, HE Ying. Quantity analysis on scenery effect factor of ecological landscape forest [J]. *J Northwest For Univ*, 2011, 26(6): 181 - 185.
- [14] 欧阳勋志,廖为明,彭世揆.天然阔叶林景观质量评价及其垂直结构优化技术[J].应用生态学报,2007,18(6):1388-1392.
OUYANG Xunzhi LIAO Weiming, PENG Shikui. Landscape quality evaluation and vertical structure optimization of natural broad leaf forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(6): 1388 - 1392.
- [15] 毛斌,徐程扬,李乐,等.人工油松风景林的林木分级技术[J].林业科学,2014,50(10):49-58.
MAO Bin, XU Chengyang, LI Le, *et al.* Tree classification for *Pinus tabulaeformis* scenic plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, 50(10): 49 - 58.
- [16] 陈瑜,徐程扬,李乐,等.阔叶红松风景林单木景观质量评价与模型研究[J].北京林业大学学报,2014,36(5):87-93.
CHEN Yu, XU Chengyang, LI Le, *et al.* Assessment and model research on scenic forest individual tree landscape quality in broadleaved and Korean pine mixed forests [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, 36(5): 87 - 93.
- [17] 章志都.京郊低山风景游憩林质量评价及调控关键技术研究[D].北京:北京林业大学,2010.
ZHANG Zhidu. *Quality Assessing and Key Adjusting Technologies for Scenic-Recreational Forests in the Lower*

- Mountains of Suburbans in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [18] 黄广远. 北京市城区城市森林结构及景观美学评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
HUANG Guangyuan. *Studies on Species Composition and Landscape Aesthetics Evaluation of Urban Forest in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [19] 曹小玉, 李际平. 林分空间结构指标研究进展[J]. 林业资源管理, 2016(4): 65 – 73.
CAO Xiaoyu, LI Jiping. Research progress on indicators of the stand spatial structure [J]. *For Resour Manage*, 2016 (4): 65 – 73.
- [20] 白超, 惠刚盈. 林木直径大小多样性量化测度指数的比较研究[J]. 林业科学研究, 2016, 29(3): 340 – 347.
BAI Chao, HUI Gangying. Study on diversity indices of tree diameter size [J]. *For Res*, 2016, 29(3): 340 – 347.
- [21] ARTHUR L M. Predicting scenic beauty of forest environments: some empirical tests [J]. *For Sci*, 1977, 23(2): 151 – 160.
- [22] 陈伯扬. TOPSIS 法在土壤环境质量评价中的应用[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 1003 – 1009.
CHEN Boyang. Application of TOPSIS method to the environment quality evaluation of soil [J]. *Geoscience*, 2008, 22(6): 1003 – 1009.
- [23] 陈鑫峰, 贾黎明. 京西山区森林林内景观评价研究[J]. 林业科学, 2003, 39(4): 59 – 66.
CHEN Xinfeng, JIA Liming. Research on evaluation of in-forest landscapes in west Beijing mountain area [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, 39(4): 59 – 66.
- [24] 毛斌, 徐程扬, 李翠翠. 不同修枝强度对侧柏、油松人工林林内景观美景度的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 123 – 125.
MAO Bin, XU Chengyang, LI Cuicui. Effects of pruning intensity on in-forest landscape of *Platyclusus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. *J Northwest For Univ*, 2013, 28(3): 123 – 125.
- [25] 毛斌. 北京中幼龄人工油松、侧柏风景林抚育技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
MAO Bin. *Studies on Tending Technique of Scenic Forest of Young and Half-mature Planted Pinus tabulaeformis and Platyclusus orientalis in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [26] 梁爽, 张洁, 戚继忠, 等. 次生林为主要的自然风景林林内景观质量评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 119 – 124.
LIANG Shuang, ZHANG Jie, QI Jizhong. The forest landscape quality evaluation of the natural scenic beauty mainly made of secondary forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, 39(6): 119 – 124.
- [27] 张凯旋, 凌焕然, 达良俊. 上海环城林带景观美学评价及优化策略[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5521 – 5531.
ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun. Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(17): 5521 – 5531.