专题：城市树木栽培与管理

人为管护因素哑变量对行道树国槐胸径-树高模型精度的影响*

——以北京市中心城区为例

王欣冉 孙 妍 徐程扬

北京林业大学林学院 城市林业研究所 森林培育和保护教育部重点实验室 北京 100083

摘要：为明晰特大城市都市区城市树木人为管护因素对行道树国槐的胸径-树高关系的影响，拟构建以人为管护因素为哑变量的行道树国槐胸径-树高关系模型，根据 2022 年北京市中心城区行道树的抽样调查，取得 685 株行道树国槐的实测数据，结合文献中的 12 个模型，通过决定系数（R^2）、平均预估误差（MPE）、赤池信息准则（AIC）、均方根误差（RMSE）4 个评价指标，筛选出最优基础模型，分析 7 种典型城市环境中的人为管护因素对行道树国槐胸径、树高的影响。结果表明：1）模型 M2（$R^2=0.647$，MPE=-2.241%，AIC=600.726，RMSE=1.683）综合拟合程度最优。2）地面防踩踏护网设置、建筑遮光和树池边长显著影响国槐胸径（$P<0.05$）；涂白保护、地面防踩踏护网设置和建筑遮光情况、垂直结构以及树池边长显著影响国槐树高（$P<0.05$）；株距和邻近树种的差异对国槐的胸径、树高生长影响不显著（$P>0.05$）。3）在模型中引入代表地面防踩踏保护、树木涂白、建筑遮光和树池边长的哑变量后，模型精度明显提升，R^2提升 15.8%，MPE 缩小 29.5%，AIC 值降低 29.0%，RMSE 值降低 15.0%。因此，将人为管护因素作为哑变量引入国槐胸径-树高模型可以有效提高模型的拟合精度与适用性，可为未来行道树的科学栽植、管护以及碳储量评估等提供理论基础。

关键词：国槐；行道树；生长模型；哑变量；树干涂白保护；地面防踩踏保护

DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.15.0001

Influence of Dummy Variables of Artificial Management Measures on Accuracy of DBH-Height Model of *Styphnolobium japonicum* Street Tree: A Case Study of the City Core of Beijing

Wang Xinran Sun Yan Xu Chengyang

(Key Laboratory of Ministry of Education for Forest Cultivation and Conservation, Institute of Urban Forestry, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to clarify the influence of the factors to artificial urban tree management on the DBH (diameter at breast height) -H (tree height) relationship of *Styphnolobium japonicum* street tree in mega-cities, a DBH-H relationship model for *Styphnolobium japonicum* street tree is proposed to be constructed

收稿日期：2024-06-15

* 基金项目：北京市自然科学基金项目（8222067）；国家自然科学基金项目（41801058）；北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目（BLRC2023B06）

第一作者：王欣冉（1998-），女，硕士生，研究方向为城市树木生长模型与健康评价。Email：wxr1271517948@163.com

通信作者：孙妍（1989-），女，博士，讲师，研究方向为区域城市扩张与生态系统服务评价、城市森林碳汇监测与评价、城市森林人居健康效应评估。Email：yanearth@bjfu.edu.cn

with the artificial management factors as dummy variables. According to the sampling survey of street trees in the city core of Beijing in 2022, the measured data of 685 *Styphnolobium japonicum* street trees are obtained. Combined with 12 models drawn from in literature, the optimal basic model is selected based on four evaluation indexes including determination coefficient (R^2), mean prediction error (MPE), Akaike information criterion (AIC), and root mean square error (RMSE). The effects of seven factors to artificial management in a typical urban environment on the DBH and the tree height of *S. japonicum* are analyzed. The results show that: 1) Model M2 ($R^2 = 0.647$, MPE = -2.241%, AIC = 600.720, RMSE = 1.683) has the best comprehensive fitting degree; 2) The installation of anti-trampling ground nets, the shading of buildings and the side length of tree grates significantly affect the DBH growth of *Styphnolobium japonicum* ($P<0.05$). Whitewashing protection, the installation of anti-trampling ground nets, buildings' shading, vertical structure, and the side length of tree grates significantly affect the height of *Styphnolobium japonicum* ($P<0.05$). The differences in plant spacing and adjacent tree species have no significant effect on DBH and tree height ($P>0.05$); and 3) After introducing the dummy variables of anti-trampling ground protection, whitewashing, buildings' shading, and tree grates' side length into the model, its accuracy is significantly improved, while R^2 increases by 15.8%, MPE decreases by 29.5%, AIC value decreases by 29.0%, and RMSE value decreases by 15.0%. Therefore, the introduction of artificial management factors as dummy variables into the DBH-H model of *Styphnolobium japonicum* can effectively improve the fitting accuracy and applicability of the model, which could provide a theoretical basis and science evidences for the planting, management, protection, and carbon storage evaluation of street trees in the future.

Keywords: *Styphnolobium japonicum*; street tree; growth model; dummy variable; whitewashing protection of tree trunk; anti-trample ground protection

树高与胸径是森林资源调查中最基本的测树因子，是计算森林蓄积量、生物量和碳储量，衡量林分生长潜力和立地质量的重要指标[1-2]。许多学者已研究不同区域树种胸径与树高间的关系[3-8]。城市行道树与天然林不同，不仅受遗传特性、气候、光照等常见因素的影响，还与人为管理等因素有关[9]，如地面防护网的设置[10]、树木涂白[11]、建筑对光照的遮挡[12]、株距[13]、树池大小[14]以及邻近树种[15]等，都可能影响行道树生长。

树高生长模型是林木生长与收获模型系统中重要的组成部分，能够反映树木高度随胸径变化而变化的规律，体现立地质量，一般用于预估树高、蓄积量、生物量等[16]。现有模型大多以胸径作为自变量直接预测林木树高，不能有效反映不同环境下树高-胸径生长的差异[17]，而且这类情况下的胸径-树高曲线变化情况也鲜有报道[18-19]。哑变量（Dummy Variables）模型是一种将多分类变量转换为二分变量的一种形式，通常取值为 0 或 1[20]。将感兴趣的因素设置为哑变量可以有效提升模型预测精度[1, 20]。哑变量在构建树高-胸径模型、生物量模型、碳储量模型和高径比模型的研究中都得到了广泛应用[20-23]。所以，在构建树高曲线模型时，增加人工管护情况等因素作为哑变量，可有效提高模型精度，保证模型的普适性[1]。

国槐（*Styphnolobium japonicum*）作为北京市的市树，是北京市栽植数量最大的行道树树种，约占所有树种栽植数量的 57%[24]，对城市生态改善与保持至关重要[25]。但目前对行道树国槐的研究多集中于栽培技术[26]、健康与安全[27]、病虫害治理与生态效益[28]，对于特大城市内人为管护对国槐胸径-树高生长关系的影响鲜见报道。

行道树作为城市森林的重要组成部分，其生物量的准确预测对于城市生态系统碳汇能力的评估具有重要意义。引入哑变量，探索不同管护措施对树木生长的影响趋势，可以更加精确地模拟行道树的生长过程，提高树高乃至城市树木生物量模型的预测精度，降低城市行道树的外业调查成本，精确预测城市绿化树木的生物量，进而为高碳汇城市森林管理提供科学依据。因此，探究北京主城区人为管护措施对行道树国槐胸径-树高模型的影响，可以加深对北

京行道树生长规律的认识，更好地理解以行道树为主的城市绿地在北京碳中和与碳达峰目标实现过程中的作用和价值，为相关政策制定和规划提供有力支持。

1 研究区概况

北京市（39°28′—41°25′N，115°25′—117°30′E）是世界重要的特大城市，也是我国城市化发展最快的城市之一[29]，具有人口基数大、城市化进度快、绿化率高的特点。北京市现共有行道树约200万株，构成了城市中兼具生态效益与美学效益的绿色网络[30]。研究区位于北京市中心城区（北京市城六区），包括东城、西城、海淀、朝阳、石景山和丰台区。

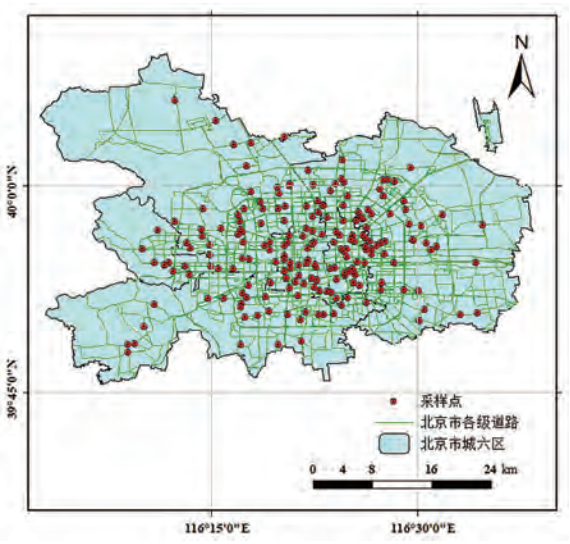


图 1 研究区及抽样街道和采样点分布

2 研究方法

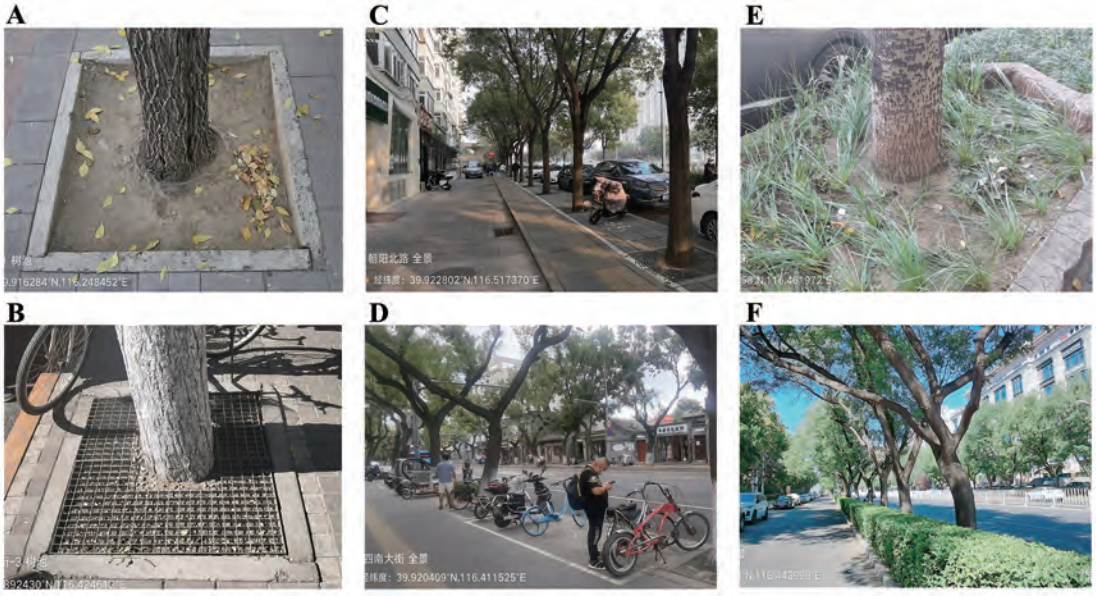
2.1 国槐生长状况调查

2022 年 7—11 月，在北京市城六区以 2 km 的间隔均匀选择样本点（图 1），取距离样点最近的 5 棵行道树进行调查，测量记录行道树的树种、胸径、树高。采样点的选择与点位信息来自 Tang 等[31]对北京市行道树碳储量的调查。

由于北京市行道树管理制度和落实情况不统一，存在缺失历史记录、绿化形式多样等问题[32-33]，灌溉、修枝、截干等情况难以量化记录，选择涂白、防踩踏保护、建筑遮光情况、垂直结构、株距、树池边长、邻近树种 7 个可现场判断的人为管护要素进行统计，用手持 GPS（Garmin 631csx）记录样点经纬度。本次共调查 205 条道路，得到行道树国槐的有效数据 685 条（表 1）。

2.2 模型构建

选择 12 个具有生物学意义且常见的模型作为研究国槐胸径-树高关系的候选模型。模型 M1～M9 参考石振威等[1]的研究，M10～M12 参考 Huang 等[34]与 Fast 和 Ducey[3]的研究。通过模型评价与参数误差选择最优模型为国槐胸径-树高基础模型。



注：图 A、B 为树干涂白和地面防踩踏护网的对照示意；图 C、D 为有无遮挡的对照示意；图 A、E、F 为垂直结构的对照示意。

图 2 不同城市管护措施示意

表 1　各管护类型样本分类情况

管护因素		胸径/cm					树高/m			
		样本数	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
涂白	有	244	30.80	65.41	6.90	9.33	12.73	18.60	5.30	2.36
	无	441	30.55	56.40	8.81	10.16	11.24	18.10	5.00	2.90
地面防护网	有	393	31.87	65.41	9.18	9.63	12.61	18.60	5.20	2.60
	无	292	28.98	49.48	6.90	9.95	10.63	16.50	5.00	2.68
建筑遮光情况	有	410	28.82	65.41	8.81	9.27	11.30	18.60	5.20	2.75
	无	275	33.35	56.40	6.90	10.12	12.46	18.10	5.00	2.75
垂直结构	单层	330	29.90	65.41	6.90	10.07	11.54	18.60	5.00	3.06
	复层	355	31.33	61.88	9.61	9.64	11.98	17.70	5.90	2.54
株距/m	0~4	6	29.97	38.43	20.08	7.04	13.02	16.60	10.00	2.74
	4~6	504	30.37	61.88	6.90	10.01	11.75	18.10	5.00	2.87
	6~8	120	30.93	54.30	9.61	9.08	11.73	18.10	5.90	2.63
	8+	55	32.54	65.41	15.88	10.49	11.83	18.60	7.00	2.72
树池边长/m	1.0	98	27.75	49.48	10.90	9.02	11.38	16.60	5.00	2.73
	1.2	211	30.95	65.41	8.81	10.95	11.86	18.60	5.70	2.98
	1.5	342	31.47	56.40	6.90	9.18	11.93	18.10	5.20	2.73
	树床	34	28.65	46.12	14.41	10.48	10.72	15.11	6.20	2.53
相邻树种	不同种	7	32.79	55.50	15.50	13.93	11.34	14.60	6.90	2.63
	同种	678	28.14	65.41	6.90	8.85	11.23	18.60	5.00	3.06

表 2　研究使用的胸径-树高模型信息

序号	表达式	序号	表达式
M1	$H = a \times D + b$	M7	$H = D^2/(a + b \times D)^2$
M2	$H = a \times \ln(D) + b$	M8	$H = e^{a+b/(D+1)}$
M3	$H = a \times D^b$	M9	$H = a(1 - e^{-b \times D})^c$
M4	$H = a \times D^2 + b \times D + c$	M10	$H = 1.3 + \frac{a \times D}{D + 1} + b \times D$
M5	$H = \frac{a}{(1 + b \times D^{-c})} + d$	M11	$H = 1.3 + \frac{D^2}{(a \times D^2 + b \times D + c)}$
M6	$H = a \times e^{-\frac{d}{D}}$	M12	$H = 1.3 + 10^a \times D^b$

注：式中，H 为树高，D 为胸径，a、b、c、d 为模型参数。

确定基础模型后，在参数上引入人为管护因素哑变量，探讨其对树高与胸径关系的影响。以模型 M1 为例，在参数 a 处引入涂白哑变量的模型形式如下：

$$H = (a + t \times T) \times D + b \qquad (1)$$

式（1）中：H 为树高；D 为胸径；a，b 为模型通用参数；t 为区分涂白的哑变量，涂白 T= 1，未涂白 T= 0；T 为相应参数。

2.3　模型检验与评价

本次分析模型检验采用确定系数（R^2）、赤池信息量准则（Akaike information criterion，AIC）、均方根误差（Root Mean Squared Error，RMSE）和平均百分比误差（Mean Percentage Error，MEP）4 个指标进行评价与比较[35]，其中确定系数 R^2数值越接近 1，模型的拟合效果越好，能解释因变量的比例越高；AIC 数值越小，模型优度越高；RMSE 数值越小，预测值与观测值间差异越小，模型预测精度越高；MPE：绝对值越小，预测结果越可靠。

3　结果与分析

3.1　树池覆盖和涂白对国槐树高、胸径的影响

由图 3 可知，国槐的树高随着胸径的增加而增大，增速先快后慢，两者呈非线性相关关系。胸径与树高数据近似于正态分布。

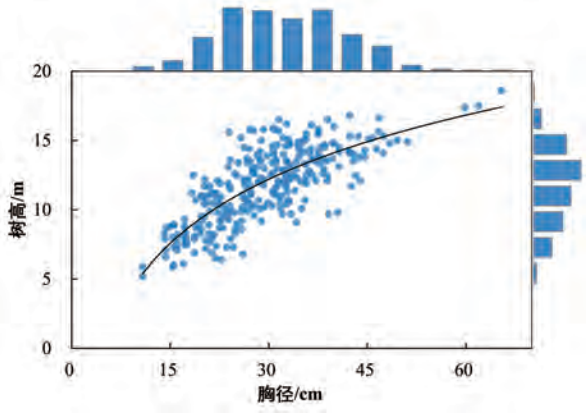
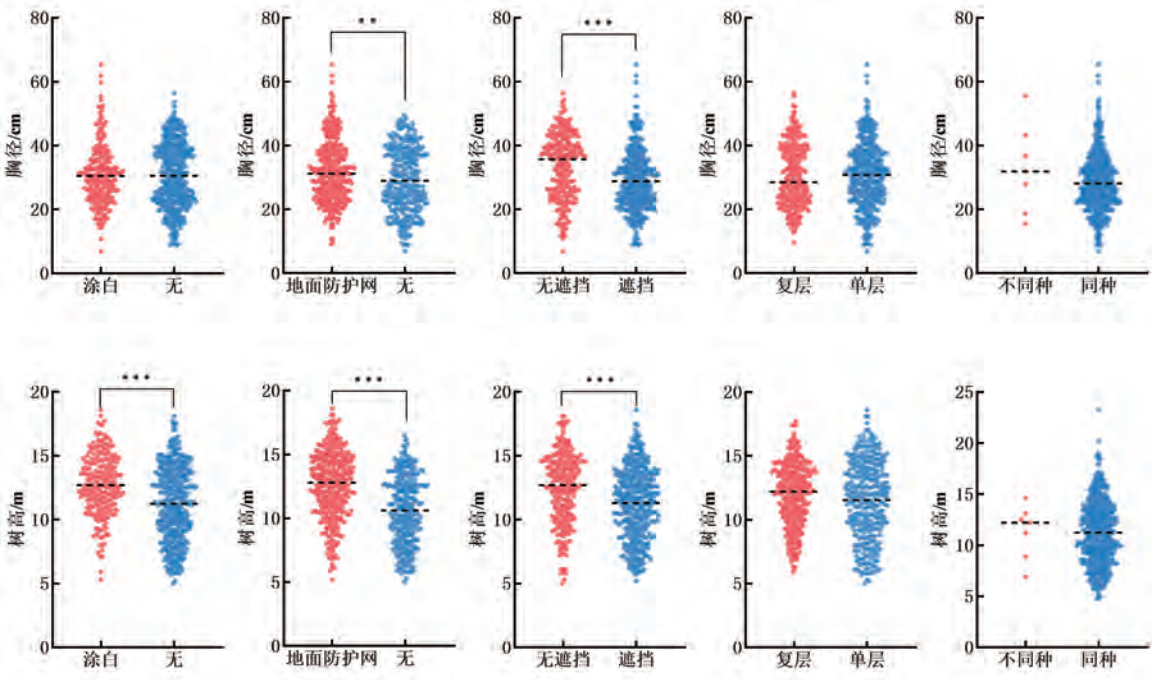


图 3　行道树国槐的胸径-树高散点图

运用 Mann-Whitney 检验分析数据（图 4）可知：设置地面防踩踏护网和建筑遮光显著影响国槐胸径（$P<0.01$）；涂白、地面防踩踏护网和建筑遮光显著影响国槐树高（$P<0.001$）。



注：图中黑色实线为中位数；虚线为四分位数；曲线范围的宽度变化代表数据的分布情况；＊＊、＊＊＊代表两样本的差异显著（$P<0.01$、$P<0.001$）。

图 4 不同管护因素对国槐胸径、树高影响的提琴图

通过 k-w 检验（图 5）发现，不同树池边长对行道树国槐的胸径分布有显著影响（$P<0.05$）。北京市城六区的道路上通常栽植同种行道树，相邻不同种的个体样本量极少，因此相邻树种对国槐的影响分析难具代表性。此外，株距（图 5）和垂直结构（图 4）对国槐胸径、树高影响不显著，故未纳入后续模型分析。因此，本研究将树干涂白、地面防护网、建筑遮光情况和树池边长 4 个因素纳入胸径-树高模型，并进一步分析它们对树木生长关系的影响。

3.2 胸径-树高基本模型的拟合

选取样本总量的 85% 为模型拟合组，15% 为模型检验组（表 3）[36-37]。基于模型拟合组的 573 条国槐数据，利用各候选模型拟合国槐树种胸径与树高的回归过程可知，12 个模型都有较好的拟合效果（表 4）。排除参数标准误差过大、参数不显著的模型 M4、M5、M9、M11 之后，M2 和 M7 模型的表现较好。考虑到模型的可解释性，最终选择 AIC 指标较低的 M2 模型（$R^2=0.647$，MPE = −2.241%，AIC = 600.726，RMSE = 1.683）作为北京市行道树国槐的胸径-树高最优基础模型。

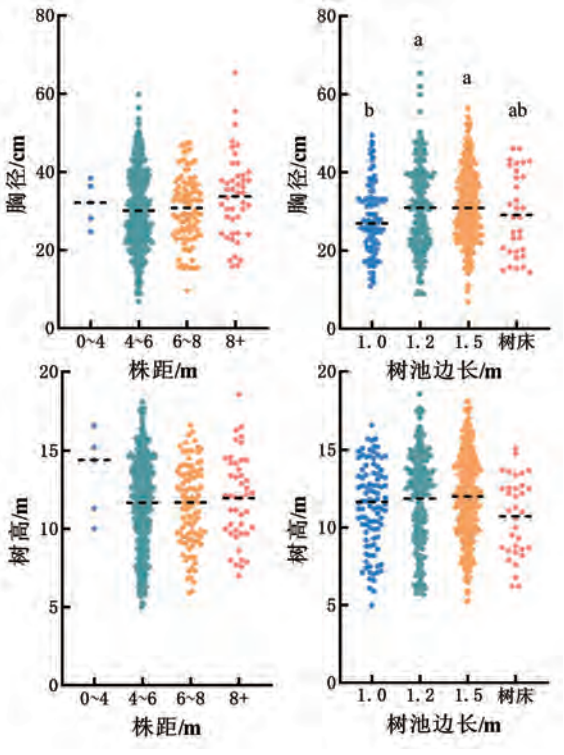


图 5 株距和树池边长对国槐胸径、树高影响的提琴图

表 3　行道树国槐模型拟合组与检验组基本信息

指标分类	胸径/cm					树高/m			
	样本数	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
模型拟合组	573	30.74	65.41	6.90	9.87	11.81	19.80	5.00	2.88
模型检验组	112	29.42	52.22	9.50	9.54	11.50	17.53	5.20	2.73

表 4　行道树国槐胸径-树高基础模型的拟合结果

模型	通用参数				模型精度			
	a	b	c	d	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M1	0.233 * (0.007)	4.736 * (0.241)			0.637	−2.561	603.455	1.691
M2	6.678 * (0.207)	−10.696 * (0.701)			0.647	−2.241	600.726	1.683
M3	1.648 * (0.109)	0.579 * (0.018)			0.645	−2.435	589.571	1.649
M4	−0.003(0.001)	0.436 * (0.035)	1.804(0.539)		0.646	−2.285	607.698	1.672
M5	16.120 * (4.065)	363.277(590.332)	1.778 * (0.518)	3.382(1.747)	0.651	−2.237	589.671	1.669
M6	20.4 * (0.416)	15.68 * (0.590)			0.639	−1.974	620.775	1.704
M7	2.406 * (0.091)	0.209 * (0.003)			0.647	−1.982	607.21	1.682
M8	3.04 * (0.020)	−17.01 * (0.631)			0.642	−2.019	616.205	1.696
M9	19.93 * (0.469)	0.028 * (0.705)	0.896(0.490)		0.649	−2.209	611.702	1.691
M10	3.718 * (0.259)	0.223 * (0.008)			0.633	−2.596	634.825	1.718
M11	0.039 * (0.005)	1.483 * (0.324)	4.943(4.562)		0.651	−2.228	606.217	1.677
M12	0.8054(0.034)	0.688 * (0.022)			0.642	−2.560	617.468	1.697

注：* 代表在显著性水平 $P<0.05$ 下具有显著影响，括号中数字为模型参数标准误差；下同。

3.3　不同管护方式下国槐树高与胸径的关系

将国槐数据按涂白、地面防踩踏护网、建筑遮光、树池边长分类后构建 M2 模型，部分分类模型精度较基础模型有提升（表 5），参数值差异显著，表明城市管护条件影响国槐胸径与树高的关系。因此，细化分类可准确判断不同条件下的国槐胸径与树高之间的关系，提高模型预测能力。

表 5　不同管护方式下的模型拟合结果

分类	通用参数		模型精度			
	a	b	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2	6.393 * (0.198)	−9.787 * (0.668)	0.647	−2.241	600.726	1.683
涂白	5.963 * (0.333)	−7.400 * (1.127)	0.613	−1.461	162.390	1.474
未涂白	6.510 * (0.215)	−10.700 * (0.724)	0.715	−1.907	331.321	1.558
有地面防护	6.553 * (0.276)	−9.766 * (0.944)	0.634	2.446	85.564	1.133
无地面防护	5.728 * (0.242)	−8.349 * (0.802)	0.697	−1.969	197.986	1.483
无遮挡	6.126 * (0.331)	−8.718 * (1.149)	0.604	−2.148	259.828	1.757
有遮挡	6.444 * (0.256)	−10.053 * (0.846)	0.649	−2.291	339.522	1.624
树池 1.0 m	6.074 * (1.363)	−8.109(4.588)	0.644	−1.142	10.215	1.270
树池 1.2m	6.481 * (0.313)	−9.947 * (1.059)	0.713	−2.208	176.738	1.638
树池 1.5m	6.770 * (0.302)	−11.012 * (1.033)	0.638	−2.018	290.761	1.651
长条树床	5.158 * (0.808)	−6.204 * (2.672)	0.610	−2.590	29.235	1.569

3.4　胸径-树高哑变量模型构建

将筛选后的人为管护因素以哑变量的形式引入模型发现，在基础模型 M2 中的参数 a 上引入地面防踩踏保护和树池边长，在参数 b 上引入树干涂白、建筑遮光哑变量，模型拟合精度最高（表 6~9）。

表 6　添加“树干涂白”哑变量的模型拟合结果

模型	参数位置	通用参数		哑变量参数	模型精度			
		a	b	T	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2		6.393 * (0.198)	−9.787 * (0.668)		0.647	−2.241	600.726	1.683
M2-T a	a	6.247 * (0.181)	−9.806 * (0.610)	0.425 * (0.040)	0.706	−1.803	498.480	1.537
M2-T b	b	6.361 * (0.180)	−10.201 * (0.609)	1.459 * (0.134)	0.708	−1.773	494.441	1.531

注：T 为树干涂白哑变量的特定参数，下同。

表 7 添加“地面防踩踏网”哑变量的模型拟合结果

模型	参数位置	通用参数		哑变量参数	模型精度			
		a	b	D	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2		6.393 *（0.198）	−9.787 *（0.668）		0.647	−2.241	600.726	1.683
M2−D a	a	5.919 *（0.187）	−8.988 *（0.617）	0.407 *（0.039）	0.703	−1.870	503.191	1.543
M2−D b	b	6.112 *（0.184）	−9.615 *（0.615）	1.349 *（0.133）	0.701	−1.862	506.940	1.548

注：D 为地面防踩踏护网哑变量的特定参数，下同。

表 8 添加“建筑遮光”哑变量的模型拟合结果

模型	参数位置	通用参数		哑变量参数	模型精度			
		a	b	G	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2		6.393 *（0.198）	−9.787 *（0.668）		0.647	−2.241	600.726	1.683
M2−G a	a	6.288 *（0.207）	−9.533 *（0.684）	0.072（0.043）	0.649	−2.241	599.935	1.679
M2−G b	b	6.313 *（0.203）	−9.621 *（0.673）	0.258 *（0.148）	0.649	−2.241	597.773	1.679

注：G 为建筑遮光哑变量的特定参数，下同。

表 9 添加“树池边长”哑变量的模型拟合结果

模型	参数位置	通用参数		哑变量参数			模型精度			
		a	b	S_1	S_2	S_3	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2		6.393 *（0.198）	−9.787 *（0.668）				0.647	−2.241	600.726	1.683
M2−S a	a	6.356 *（0.217）	−10.189 *（0.653）	0.233（0.109）	0.195（0.101）	0.175（0.098）	0.674	−2.114	571.985	1.633
M2−S b	b	6.539 *（0.193）	−10.739 *（0.707）	0.711（0.358）	0.591（0.335）	0.514（0.326）	0.673	−2.117	572.781	1.634

注：S_1 代表树池边长为 1m 时，哑变量 $s_1=1$ 对应的参数值、S_2 代表树池边长为 1.2 m 时，哑变量 $s_2=1$ 对应的参数值、S_3 代表树池边长为 1.5 m 时，哑变量 $s_3=1$ 对应的参数值 ，下同。

根据拟合结果（表 10）可以清晰地看出，在综合考虑人为管护因素，并在模型适当位置引入对应的哑变量之后，国槐的胸径−树高生长模型精度得到明显提升。

表 10 哑变量综合模型的拟合结果

模型	通用参数		哑变量参数						模型精度			
	a	b	D	S_1	S_2	S_3	T	G	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2	6.393 *（0.198）	−9.787 *（0.668）							0.647	−2.241	600.726	1.683
M2−综	5.895 *（0.201）	−9.458 *（0.586）	0.284 *（0.040）	0.233（0.109）	0.195（0.101）	0.175（0.098）	1.029 *（0.142）	0.597 *（0.129）	0.749	−1.579	426.768	1.431

3.5 胸径−树高哑变量模型的验证

应用 112 株国槐数据对胸径−树高模型进行拟合检验（表 11）发现，验证数据集拟合模型的结果良好，预估精度提高。这不仅说明该模型能够很好地描述北京市行道树国槐的胸径−树高生长规律，还意味着这种考虑人为管护因素并引入哑变量的方法同样适用于其他行道树国槐生长规律的预测。

表 11 哑变量模型的验证结果

模型	通用参数		哑变量参数						模型精度			
	a	b	D	S_1	S_2	S_3	T	G	R^2	MPE/%	AIC	RMSE
M2	6.142 *（0.521）	−9.099 *（1.771）							0.558	−2.131	119.874	1.677
M2−综	5.603 *（0.510）	−8.291 *（1.582）	0.226（0.097）	0.212（0.220）	0.022（0.206）	0.069（0.196）	1.193 *（0.334）	0.563（0.298）	0.680	−1.496	95.940	1.427

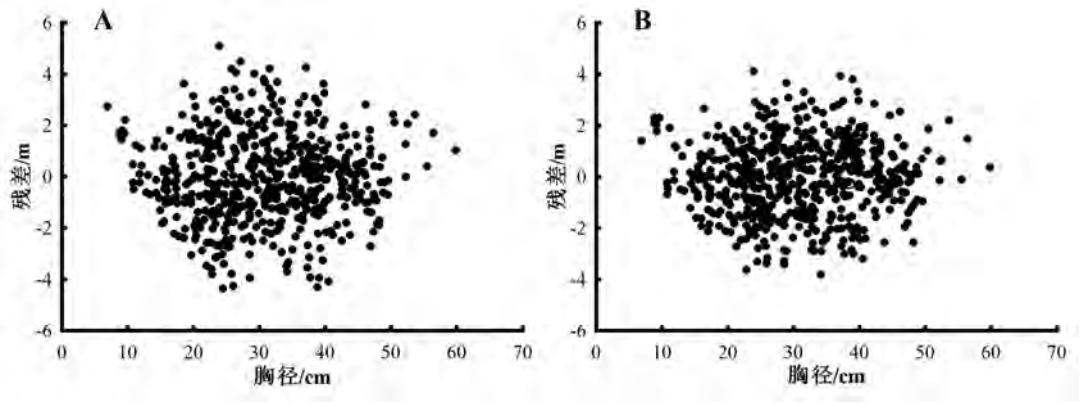


图 6　基础模型（A）与哑变量模型（B）的残差

图 6A 表明，基础模型 M2 的残差随预测值呈先增加后减少的趋势，残差值分布区间为（−5, 5）；图 6B 表明，引入哑变量模型的残差分布则均匀、无明显规律，残差值分布区间为（−4, 4），且图 6B 的残差优于图 6A 残差，说明哑变量模型拟合结果优于一般基础模型。

4　讨论

以往的模型往往集中于常见的环境与自身遗传因素的分析[38]，难以将城市特有的人为管护因素与树木生长关系建立相应的联系[18]，但作为城市森林的主要组成部分，行道树的生长环境受城市环境和人为管护的影响极大。

城市生态系统中，人为干扰引起了土壤容重增大、孔隙度减小等现象[39]，土壤中气体含量和有效含水量锐减，根系延伸受阻、吸收能力减弱，使植物生长势降低[40]。设置地面保护网可以防止土壤环境干扰，保护行道树根部生长环境，保障行道树水养分吸收。此外，地面保护网可以减少行人与交通工具对树木基部的机械损伤，保障树体健康。因此，树池防踩踏保护网的设置会影响国槐的胸径和树高生长，进而使其相关关系发生变化。

树干涂白剂具有杀菌、杀虫功能，病虫害会使树木生长过程缩短、树高生长量降低[41]，涂白可填补树皮的裂缝，杀死蚧壳虫和螨类等害虫，降低病虫害发生率[11]。同时，涂白能减少水分蒸发，降低树体消耗，警示路人和车辆，减少事故剐蹭带来的树体损伤。此外，涂白措施通过白色反射光线的原理，减少树干吸热，有效防止日灼和冻裂的发生[42]。

良好的光照条件能够促进植物的光合作用，刺激植物细胞的分裂和生长[43]，对胸径树高的生长有一定影响，但对其相关关系的影响力表现差异不大。因此，在规划行道树时，需尽量减少对建筑与设施对其自然光照的遮挡，以维护生态平衡和植物正常生长。

树池的大小直接决定了树木根系的生长空间。较大的树池能提供更充足的土壤空间，储存更多的水分和养分，使得根系能够充分生长和发育。过小的树池尺寸会限制树木的生长空间，导致行道树生长势差[14]。因此，在设计和选择树池尺寸时，需要综合考虑树木的生长需求、水养供给、维护管理等因素，以确保树木能够协调环境、健康生长。

国槐移栽后生长速度和抗逆性随年龄而异[44]，这可能影响人为管护因素对树木胸径和树高的作用效果。研究人为管护起始及持续时间有助于推测其对行道树生长的具体影响[45]，但北京市行道树缺乏相应的管护落实与记录[32-33]，本次研究尚无法全面深入地探究这些影响。行道树健康状况[46]、所处的道路等级、布置形式等差异[47]，修枝截干[24]、灌溉浇水等管护的频率和标准等[48]，都可能对行道树生长产生影响。相邻不同种样本数量少，行道树垂直结构、株距对国槐生长影响不显著，可能受到样本总数影响。因此，未来研究中，可增加实地调查，运用径向生长监测等方法确定树木生长速率、年龄；也需结合城市人为管护、道路布局、城市热环境等环境变量，建立更精准、更具针对性的生长模型，为

城市行道树的科学规划、种植、管护和碳汇评估提供科学参考。

5 结论

本研究构建了适用于北京市城六区行道树国槐的胸径-树高模型，并引入“涂白”“地面防踩踏保护网”“建筑遮光”和“树池边长”4个哑变量，显著提升模型精度与表现。其中，涂白显著促进了国槐树高生长；设置地面防踩踏保护网显著提升了国槐的胸径、树高生长；建筑遮挡光照减缓国槐的胸径、树高生长；树池边长的减小会降低国槐的胸径生长。因此，科学管护可有效促进北京市城六区国槐的生长，并影响其胸径-树高关系。人为管护因素哑变量模型可以将不同管理类型的行道树合并，提高行道树国槐胸径-树高的建模精度与普适性。

参考文献

[1]石振威,曾思齐,刘发林,等.基于地形与竞争因子的青冈栎次生林树高哑变量模型研究[J].西北林学院学报,2020,35(1):196-202,272.

[2]MIRANDA E N,BARBOSA B H G,SILVA S H G,et al.Variable selection for estimating individual tree height using genetic algorithm and random forest[J].Forest Ecology and Management,2022,504:119828.

[3]FAST A J,DUCEY M J.Height-diameter equations for selectnew Hampshire tree species[J].Northern Journal of Applied Forestry,2011,28(3):157-160.

[4]徐悦,陈昌华,蒋之富,等.天然赤松胸径与树高相关模型的研究[J].林业调查规划,2008,33(3):56-58.

[5]田军.华北落叶松和樟子松树高与胸径的相关性研究[J].安徽农学通报(下半月刊),2011,17(22):72,76.

[6]樊艳文,王襄平,曾令兵,等.北京栓皮栎林胸径:树高相关生长关系的分析[J].北京林业大学学报,2011,33(6):146-150.

[7]HUSSAIN M,SITUMORANG R O P,AMIR K.Modeling the tree height-diameter relationship in natural forests of *Cedrus deodara* in the Pakistani Himalayas[J].Taiwan Journal of Forest Science,2023,38(1):27-42.

[8]HAO M,ZHAO X Y,WANG Q,et al.Modelling tree height-diameter relationship of *Quercus acutissima* in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Mount Tai,China[J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,791:012173.

[9]LÁZARO-LOBO A,RUIZ-BENITO P,LARA-ROMERO C ,et al.Biotic, abiotic, and anthropogenic drivers of demographic performance of non-native *Eucalyptus* and *Pinus* species in forested areas of Spain[J].Forest Ecology and Management,2022,510:120111.

[10]王琰,余韵,刘勇,等.北京市核心区洋白蜡行道树健康评价及影响因素[J].浙江农林大学学报,2022,39(6):1340-1349.

[11]洪爱英,刘爱青,孙胜.冬季园林绿地树木保护管理措施[J].乡村科技,2022(3):115-117.

[12]李佳慧.北京市核心区国槐健康及表型变异的评价研究[D].北京:北京林业大学,2021.

[13]王清茹.北京城市街区行道树存在的问题及修正措施[J].现代园艺,2020,43(22):150-153.

[14]周晓梦.秦皇岛市主城区行道树的调查及发展建议[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2018.

[15]张岚棋,杨华,张晓红.天然云冷杉林树木生长与树木大小、竞争和树种多样性的关系[J].北京林业大学学报,2024,46(5):64-72.

[16]陈立莉.树种树高曲线模型的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.

[17]杜志,陈振雄,李锐,等.气候敏感的杉木树高-胸径非线性混合效应模型研建[J].北京林业大学学报,2023,45(9):52-61.

[18]康梓杭,倪苗,邓晶,等.海口市10种行道树最优生长模型研究[J].热带生物学报,2020,11(1):79-83.

[19]庄崇洋,黄清麟,马志波,等.典型中亚热带天然阔叶林各林层树高胸径关系研究[J].林业科学研究,2017,30(3):479-485.

[20]贾炜玮,孙赫明,李凤日.包含哑变量的黑龙江省落叶松人工林碳储量预测模型系统[J].应用生态学报,2019,30(3):814-822.

[21]ZENG W S,ZHANG H R,TANG S Z.Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales—a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in Southern China[J].Canadian Journal of Forest Research,2011,41(7):1547-1554.

[22]曾伟生,唐守正,夏忠胜,等.利用线性混合模型和哑变量模型方法建立贵州省通用性生物量方程[J].林业科学研究,2011,24(3):285-291.

[23]邵威威,董灵波.大兴安岭地区兴安落叶松的高径比模型[J].应用生态学报,2023,34(2):342-348.

[24]李佳慧,彭祚登,刘勇,等.北京市首都功能核心区国槐健康评价及其影响因素研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(1):64-73,84.

[25]李佳慧,彭祚登,刘勇.北京市区国槐表型差异及综合评价研究[J].北京林业大学学报,2022,44(6):23-33.

[26]孟祥涛.关于国槐行道树栽培技术研究[J].农业与技术,2018,38(2):198.

[27]周小娟,孙毅宁,刘杰.郑州市城区国槐生长与健康状况

调查[J].安徽农业科学,2021,49(12):129-132,136.
[28]赵策,邱尔发,马俊丽,等.行道树国槐不同形态重金属富集效能研究[J].林业科学研究,2019,32(3):142-151.
[29]谢晓阳,崔雅君,邱尔发,等.2010—2020 年北京市行道树结构特征变化分析[J].北京林业大学学报,2023,45(1):78-88.
[30]卜燕华,何建勇.发挥行道树遮阴功能 提升道路空间舒适度[J].绿化与生活,2023(7):6-7.
[31]TANG Y J, CHEN A P, ZHAO S Q. Carbon storage and sequestration of urban street trees in Beijing, China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2016, 4:53.
[32]张毅.加强树池覆盖管理[J].北京观察,2019(1):35.
[33]金小军,张军,杨凡,等.城市行道树生长健康状况与种植形式的相关性分析[J].城市建筑,2021,18(34):188-192.
[34]HUANG S, PRICE D, TITUS S J. Development of ecoregion-based height - diameter models for white spruce in boreal forests[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 129(1/2/3): 125-141.
[35]李洪成,张茂军,马广斌.SPSS 数据分析实用教程[M].第 2 版.北京:人民邮电出版社,2017.
[36]李学辉.关帝山油松天然次生林单木生长模型构建[D].太谷:山西农业大学,2021.
[37]ÖZÇELIK R, DIAMANTOPOULOU M J, CRECENTE-CAMPO F, et al. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 306:52-60.
[38]李沁园.城乡树木生长特征对比及驱动因素研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
[39]谢天,侯鹰,陈卫平,等.城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J].生态学报,2019,39(4):1154-1164.
[40]Komatsu H, Katayama A, Hirose S, et al. Reduction in soil water availability and tree transpiration in a forest with pedestrian trampling[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 146(1/2): 107-114.
[41]周晏平.辽宁章古台樟子松树高生长影响因素分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
[42]葛华丽,李鹏宇,庄桂荣.浅谈园林绿化树木冬春季养护技术要点[J].农技服务,2014,31(10):165.
[43]王德斌.谈光照条件与经济树木的生长发育[J].黑龙江科技信息,2016(16):272.
[44]淑芳,白玉娥.林木不同时期生长发育状况研究进展[J].内蒙古林业科技,2021,47(2):49-52.
[45]韦兴兰,李树萍,王元友,等.土壤含水量对树番茄苗木生长及非结构性碳水化合物的影响[J].经济林研究,2024,42(1):178-188.
[46]苏琦,段婷婷,陈杰,等.热带滨海城市行道树结构与健康评估[J].热带农业科学,2023,43(12):55-60.
[47]王霄.郑州市行道树物种多样性及空间结构特征调查分析[D].郑州:河南农业大学,2022.
[48]赵修全,陈祥,王宝宁.立地条件和灌溉方式对行道树夏季生长作用调查[J].绿色科技,2016(7):35-36,40.