



引用格式: 陈波兰, 白一术, 唐岚, 等. 树种组成对成都绕城高速路域不同人工林群落物种多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(4): 0634-0643. [CHEN B L, BAI Y S, TANG L, et al. Effects of tree species composition on species diversity of different plantation communities in Chengdu ring expressway[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(4): 0634-0643.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230669

树种组成对成都绕城高速路域不同人工林群落物种多样性的影响

陈波兰¹, 白一术¹, 唐 岚¹, 陈辉琴¹, 魏俊德¹, 郝建锋^{1,2*}

(1 四川农业大学 林学院, 成都 611130; 2 四川农业大学 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130)

摘 要 【目的】探究乔木树种组成及林分因子对不同路域人工林群落物种多样性的影响, 为成都路域人工林营造与管理提供参考。【方法】采用典型样地法对成都绕城高速路域现种植的 5 种不同树种组成人工林群落(I, 加杨纯林; II, 樟树、加杨混交林; III, 樟树纯林; IV, 樟树、巨桉混交林; V, 巨桉纯林)的林分因子及林下植被物种多样性进行全面调查。【结果】(1)研究区共记录林下植物 190 种, 隶属于 71 科 131 属。林下记录到植物科属种数量均为草本层多于灌木层, 其中樟树纯林记录到的林下物种数最多。(2)构树(*Broussonetia papyrifera*)和菴草(*Humulus scandens*)重要值占比大, 分别占据不同人工林群落灌木层与草本层的优势地位。(3)樟树纯林的灌木物种丰富度指数(*D*)显著高于其他群落($P < 0.05$); 草本层的 Shannon-Wiener 指数(*H*)、Simpson 指数(*H'*)和 *D* 指数大小变化趋势一致, 表现为群落 III > IV > I > II > V, 其中樟树纯林的 *H* 指数显著高于樟树、巨桉混交林外其他群落($P < 0.05$)。(4)乔木层平均冠幅与灌木层的 *D* 指数和 *H* 指数、草本层的 *H* 指数、*H'* 指数、*D* 指数、Pielou 均匀度指数(J_{sw})均呈显著正相关($P < 0.01$), 与灌木层的 *H'* 指数和 J_{sw} 指数均呈显著负相关($P < 0.01$); 乔木层平均枝下高与灌木层的 *H* 指数、*H'* 指数、*D* 指数、 J_{sw} 指数均呈显著正相关($P < 0.01$)。【结论】乔木层的树种组成、平均枝下高和平均冠幅显著影响路域人工林群落的物种多样性, 因此, 选择合适树种并定期修枝管理, 有利于路域人工林乔灌草群落结构的形成和林下植被物种多样性维持。

关键词 树种组成; 路域人工林; 林下植被; 林分因子; 物种多样性

中图分类号 S718.54

文献标志码 A

Effects of tree species composition on species diversity of different plantation communities in Chengdu ring expressway

CHEN Bolan¹, BAI Yishu¹, TANG Lan¹, CHEN Huiqin¹, WEI Junde¹, HAO Jianfeng^{1,2*}

(1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract [Objective] The study aims to explore the effects of tree species composition and other stand factors on species diversity of plantation communities in different road areas, and provide reference for the construction and management of plantation communities in Chengdu. [Methods] By using the typical plot method, the stand factors and understory vegetation species diversity of 5 different tree species in the plan-

收稿日期: 2023-10-20; 修改稿收到日期: 2023-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370628); 四川省教育厅一般项目(15ZB0020)

作者简介: 陈波兰(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态学、林业生态工程学研究。E-mail: 2324210711@qq.com

* 通信作者: 郝建锋, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学、林业生态工程学研究。E-mail: haojf2005@aliyun.com

tation community (Ⅰ, poplar pure forest. Ⅱ, camphor and poplar mixed forest. Ⅲ, pure camphor forest. Ⅳ, mixed forest of camphor and eucalyptus. Ⅴ, eucalyptus grandis forest) of Chengdu Ring Expressway were investigated. [Results] (1) A total of 190 species of understory plants belonging to 71 families and 131 genera were recorded in the study area. The number of species of plant families recorded under the forest was more in the herbaceous layer than in the shrub layer, among which the number of understory species recorded in the pure camphor forest was the highest. (2) The important values of *Broussonetia papyrifera* and *Humulus scandens* dominated the shrub layer and herb layer of different plantation communities, respectively. (3) The shrub species richness index (D) of pure camphor forest was significantly higher than that of the other communities ($P<0.05$); the Shannon-Wiener index H , Simpson index (H') and D index size of the herbaceous layer had the same trend of change, showing Ⅲ > Ⅳ > Ⅰ > Ⅱ > Ⅴ, of which H of pure camphor forest was significantly higher than that of the other communities, except mixed forest of camphor and eucalyptus ($P<0.05$). (4) The average crown width in the tree layer was significantly positively correlated with D index and H index in shrub layer, H index, H' index, D index, and Pielou uniformity index (J_{sw}) in herbaceous layer ($P<0.01$), and negatively correlated with H' index and J_{sw} index in shrub layer ($P<0.01$). The average height under branches in the tree layer was significantly positively correlated with H index, H' index, D index, and J_{sw} index in shrub layer ($P<0.01$). [Conclusion] The tree species composition, average undershoot height, and average crown width of the tree layer significantly affect the species diversity of plantation communities in the road area, and the selection of appropriate tree species and regular pruning management would be conducive to the formation of good tree and shrub community structure and the maintenance of understory vegetation species diversity in road plantations.

Key words tree species composition; road plantation; understory vegetation; stand factor; species diversity

随着交通强国建设,道路路网越来越密集,不可避免地对沿线生态环境带来交通噪声、建设废渣、植被破坏、环境污染、生境破碎化、生物入侵等负面影响。目前不少学者的研究聚焦在高速公路沿线的生态环境恶化程度与修复策略方面^[1-2]。为减轻公路对路域环境的生态破坏,防止道路附近受到污染,在建设公路的同时保护原有植被,于道路两侧种植人工林是较有效的缓解策略^[3]。路域人工林在沉积空气污染、减少热岛效应、控制地表水径流、减轻交通噪声的污染、增添道路沿线美景等方面起到积极的作用^[4]。如今在“双碳”目标下,提升路域人工林的生态效益、恢复高速公路路域生态系统,对缓解道路交通运输带来的环境压力具有重要现实意义。由于路域生境特殊,营林树种选择成为一道难题,且混交林是否必然优于纯林,混交林内树种的不同组合与排列,其结构与生态过程更是复杂。为进一步了解科学营林措施,提高人工林的生态效益,近年来不少学者从林分因子对林下植被多样性的影响从不同层面进行大量研究。通过研究林分结构和林下物种多样性可有效反映种群性状、群落稳定性和演替规律^[5-6]。树高、胸径、枝下高、冠幅、密度、郁闭度等林分因子是描述森林群落结构特征的常用指标,其中

林分密度是人工林经营中最重要的可调控林分因子^[7],林分因子与林下植被的相关性研究发现,平均胸径、枝下高、林分密度和平均冠幅等是影响林下植被多样性的主要乔木特征因子^[8-9]。研究^[7,10-11]表明,杉木、柏木、巨桉等人工林林分密度直接或间接影响林下植被的多样性、生物量、种间关联。陈聪琳等^[11]对路域巨桉人工林的研究发现林分密度对灌木层和草本层的多样指数影响规律均为随林分密度先增后减。邓婷婷等^[12]对北京东灵山落叶阔叶林下草本的调查发现多样性指数随林分密度和林地物种丰富度的增大呈下降的趋势,但随平均胸径的增大呈上升的趋势。由此可见,在不同立地和林分中,各林分因子与林下植被多样性表现出的相关性差异较大,且对于某特定树种的人工林林分因子与林下植被相关研究的报道较多,而对于某特定生境下的研究较少,尤其是目前对于路域人工林树种组成与林下植被的相关研究鲜见报道。

截至 2014 年,为建设成都绕城高速两侧的 200 m 生态带,成都环城生态区共完成拆迁 2 248 万 m²,其中该拆迁范围内,有 97% 的部分用于建设 200 m 生态带。由此,全长 85 km 的成都绕城高速周围,基本形成了两侧宽 200 m 的生态带。该研究聚焦于路网建设密度大的成都绕城高速路段,探究路域

人工林树种组成及其他林分因子对林下植被多样性的影响,有助于改造当地路域人工林合理建议的提出,促进路域人工林生态效益提升,恢复公路路域生态系统。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区属四川盆地中部成都平原地区,所研究的路域人工林群落位于成都 G4202 绕城高速两侧(103°56′—104°02′E,30°44′—30°46′N)。G4202 全长 85 km,与成都多条放射状高速、主要干道等都有交错且相通部分。该区域气候类型为典型的亚热带季风气候,年平均气温 16℃,波动较小,年平均降水量约 900 mm,雨量充沛,年平均蒸发量相对较低,有温和多雨、四季分明的气候特征。土壤类型主要以水稻土、紫色土为主。研究区森林多为人工起源,林下灌木和草本为自然更新,林分结构相对简单。研究区内,主要乔木有巨桉(*Eucalyptus grandis*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、加杨(*Populus × canadensis*)等;主要灌木有构树(*Broussonetia papyrifera*)、天竺桂(*Cinnamomum japonicum*)、八角枫(*Alangium chinense*)等;主要草本植物有葎草(*Humulus scandens*)、求米草(*Oplismenus undu-*

latifolius)、莲子草(*Alternanthera sessilis*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查

依据方精云等^[13]和薛建辉^[14]的样地选取方法,对四川成都绕城高速路域人工林进行实地全面踏查的基础上,采用典型样地法,根据林分的主要组成树种,选取土壤、地形等多项立地条件相似,林相整齐,基本处于同一林龄(16 年),且未进行林下人工种植的 5 种不同树种组成的人工林(I,加杨纯林;II,樟树、加杨混交林;III,樟树纯林;IV,樟树、巨桉混交林;V,巨桉纯林)群落类型及林分因子数据见表 1。每种类型的人工林中,各设置 4 个样地,规格为 20 m×30 m,5 种不同树种中共计设置样地 20 个,总面积达 12 000 m²。

在每个样地内,用相邻格子法设置乔木样方 6 个,规格为 10 m×10 m,并在每个样格内进行每木检尺;用对角线法,分别设置灌木样方各 6 个、草本样方各 12 个,规格分别为 5 m×5 m、1 m×1 m,共计调查 480 个样方。乔木样方内统计树种的种类、胸径、树高、冠幅、株数;灌木样方内统计树种的种类、胸径、株数;草本样方内统计草本植物的种类、盖度和株数(丛数)。植物科属种的鉴定遵循中国在线植物志(<http://www.iplant.cn/frps>)。

表 1 样地概况

Table 1 General characteristics of the sample plots

样地编号 Sample plot number	群落类型 Community types	林分密度 Stand density (trees/hm ²)	平均高度 Average height/m	平均胸径 Average breast diameter/cm	平均枝下高 Average under-branch height/m	平均冠幅 Average crown width/m	郁闭度 Canopy density	海拔 Altitude /m
1—4	I	962.50	13.05	19.57	2.17	5.62	0.61	532
5—8	II	987.50	13.10	20.16	2.93	6.45	0.60	532
9—12	III	950.00	15.03	19.69	5.59	7.85	0.71	520
13—16	IV	1 137.50	17.84	21.23	4.13	4.66	0.81	537
17—20	V	1 183.33	17.64	23.36	5.70	5.98	0.72	533

1.2.2 数据处理

研究采用林下植物的重要值(important value, I_V)和 α 多样性指数来综合评估绕城高速调查区域内不同人工林群落林下灌、草层的物种多样性特征。物种重要值计算公式^[15]为:

物种重要值: $I_V = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度})/3$

研究选取的 α 多样性指数包括:丰富度指数(D)、Simpson 优势度指数(H')、Shannon-Wiener 指数(H)、Pielou 均匀度指数(J_{sw}),具体计算公式^[16]为:

$$D = S \tag{1}$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$H' = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \tag{3}$$

$$J_{sw} = H / \ln S \tag{4}$$

式中: P_i 为第 i 种的个体数 n_i 占所有种个体总数 n 的比例,即 $P_i = n_i/n; i = 1, 2, 3, \dots, S; S$ 为物种数。

分别统计灌木层和草本层的物种重要值和多样性指数,以了解不同林分下优势物种组成及物种多样性差异。使用路域人工林的平均高度、平均胸径、

平均枝下高、平均冠幅、林分密度和郁闭度 6 个林分因子作为自变量,灌木层和草本层的 4 种多样性指数(H 、 H' 、 D 、 J_{sw})为因变量进行冗余分析(redundancy analysis,RDA)并制图。用 SPSS 20.0 和 Excel 2019 进行数据整理与统计分析,用 Origin 2023 和 Canoco 5.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同路域人工林群落林下物种组成

2.1.1 科属种组成分析

成都绕城高速路域人工林群落林下植被物种组成情况见图 1,共计录灌木层 28 科 37 属 57 种、草本层 50 科 98 属 133 种,其中草本层对群落物种多样性的贡献最大。在 5 种林分类型中,群落Ⅲ的林

下物种组成最丰富,分别统计到灌木 19 科 24 属 32 种和草本 33 科 54 属 64 种;而在群落Ⅰ中,记录的灌木种类为 5 种人工林中最少,仅发现灌木 5 科 6 属 9 种,而草本组成丰富,仅次于群落Ⅲ;群落Ⅱ和群落Ⅳ 2 种混交林群落中的灌木物种数相接近,仅次于群落Ⅲ;群落Ⅴ的草本植物科属种数最少,灌木物种数次于群落Ⅱ和群落Ⅳ,而多于群落Ⅰ。综合灌草两层物种组成数据发现,群落Ⅰ的林下环境相对而言更利于草本植物的生长,而群落Ⅴ的林分林下物种生长整体较差。

2.1.2 重要值指标分析

主要物种重要值分析结果(表 2)显示,不同路域人工林群落林下各层次的优势种组成不同,同一物种在不同群落中的重要性程度也不同。

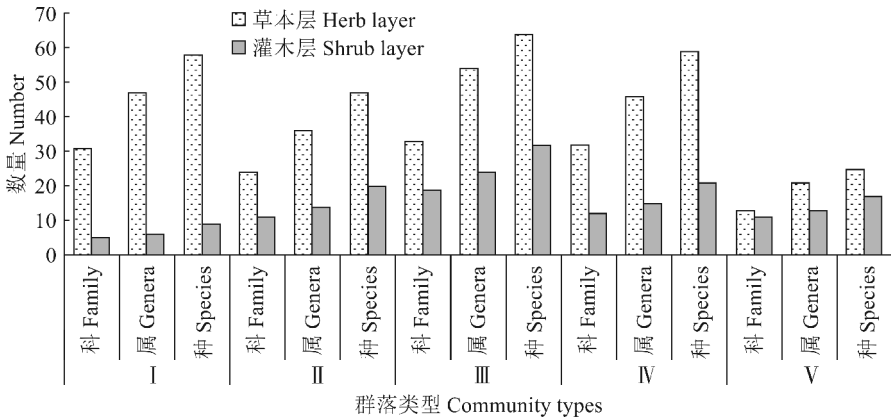


图 1 成都绕城高速路域人工林群落林下植被物种组成
Fig. 1 Species compositions of the understory vegetations in Chengdu ring expressway

表 2 成都绕城高速公路路域不同人工林群落灌木层主要物种重要值

Table 2 Important values of main species of shrub and herb layers in different plantation communities in Chengdu ring expressway

层次 Layer	群落类型 Community type	主要物种(重要值) Main species (important value)	重要值之和 Sums of important value
灌木层 Shrub	I	八角枫(0.366 1)+阴香(0.299 0)+天竺桂(0.142 9)+构树(0.088 1) <i>Alangium chinense</i> + <i>Cinnamomum burmanni</i> + <i>Cinnamomum japonicum</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i>	0.896 1
	II	构树(0.409 6)+天竺桂(0.288 7)+女贞(0.048 9)+阴香(0.036 5) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Cinnamomum japonicum</i> + <i>Ligustrum lucidum</i> + <i>Cinnamomum burmanni</i>	0.783 7
	III	构树(0.318 9)+天竺桂(0.238 7)+插田蕨(0.038 8)+栎树(0.031 5) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Cinnamomum japonicum</i> + <i>Rubus coreanus</i> + <i>Koelreuteria paniculata</i>	0.627 9
	IV	构树(0.239 4)+女贞(0.131 2)+小蜡(0.127 8)+天竺桂(0.106 5) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Ligustrum lucidum</i> + <i>Ligustrum sinense</i> + <i>Cinnamomum japonicum</i>	0.604 9
	V	桉树(0.343 7)+构树(0.152 4)+接骨木(0.096 3)+枫杨(0.091 6) <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Sambucus williamsii</i> + <i>Pterocarya stenoptera</i>	0.684 0
草本层 Herb	I	艾(0.167 3)+求米草(0.147 8)+葎草(0.083 2)+凤尾蕨(0.060 6) <i>Artemisia argyi</i> + <i>Oplismenus undulatifolius</i> + <i>Humulus scandens</i> + <i>Pteris cretica</i> var. <i>nervosa</i>	0.458 0
	II	冷水花(0.168 0)+龙葵(0.138 3)+牛膝(0.058 7)+马唐(0.057 1) <i>Pilea notata</i> + <i>Solanum nigrum</i> + <i>Achyranthes bidentata</i> + <i>Digitaria sanguinalis</i>	0.422 1
	III	葎草(0.083 0)+杠板归(0.073 8)+牛膝(0.067 9)+土牛膝(0.058 1) <i>Humulus scandens</i> + <i>Polygonum perfoliatum</i> + <i>Achyranthes bidentata</i> + <i>Achyranthes aspera</i>	0.282 8
	IV	葎草(0.186 4)+莲子草(0.170 7)+丛枝蓼(0.070 2)+冷水花(0.063 9) <i>Humulus scandens</i> + <i>Alternanthera sessilis</i> + <i>Persicaria posumbu</i> + <i>Pilea notata</i>	0.491 2
	V	葎草(0.359 8)+莲子草(0.184 9)+接骨草(0.118 1)+土牛膝(0.070 1) <i>Humulus scandens</i> + <i>Alternanthera sessilis</i> + <i>Sambucus javanica</i> + <i>Achyranthes aspera</i>	0.732 9

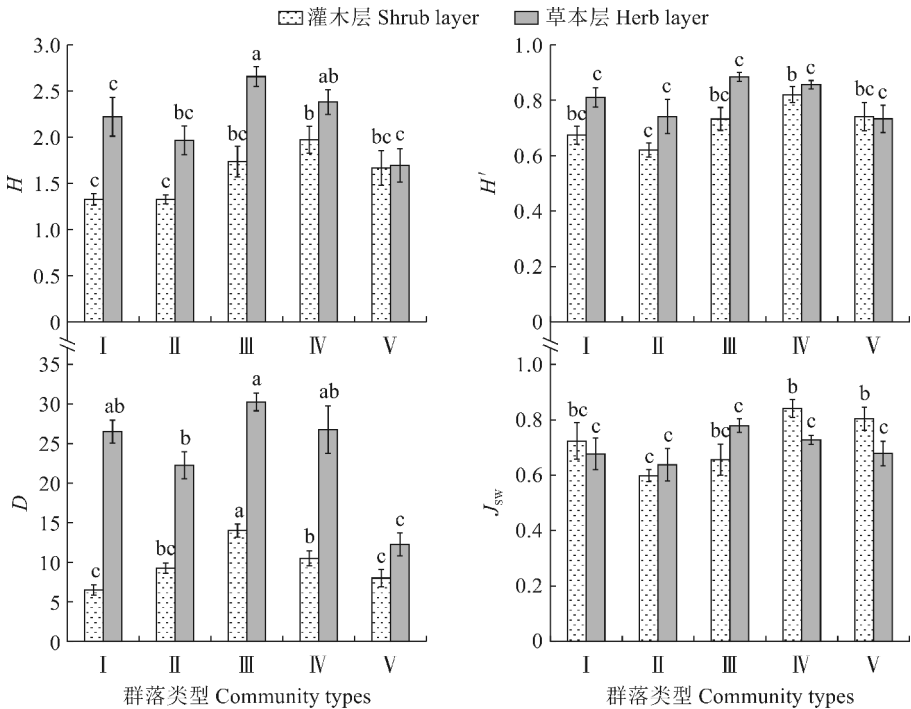
在灌木层中,构树和天竺桂分布广泛,构树在所调查的 5 种人工林群落中都分别占据明显优势地位。群落 II 中,构树和天竺桂的优势最明显,重要值分别达到 0.409 6 和 0.288 7。桉树作为群落 V 的乔木层优势树种,在灌木层中也以其更新的幼树占据明显优势地位,重要值为 0.343 7。在草本层中,主要物种组成有明显差异,荩草在 I、III、IV、V 4 个群落中均有广泛分布,优势地位明显。冷水花(*Pilea notata*)、牛膝(*Achyranthes bidentata*)、艾(*Artemisia argyi*)、土牛膝(*Achyranthes aspera*)、莲子草等物种在 5 个群落中出现较普遍。

2.2 不同路域人工林群落林下物种多样性指数

5 种路域人工林群落林下物种多样性的分析结

果(图 2),可见,草本层的 H 指数、 H' 指数和 D 指数大小变化趋势一致,其多样性顺序为 III>IV>I>II>V, J_{sw} 指数排序为 III>IV>V>I>II。5 种群落灌木层的 H 指数从大到小的排序为 IV>III>V>II>I, H' 指数的排序为 IV>V>III>I>II, D 指数的排序为 III>IV>II>V>I, J_{sw} 指数的排序为 IV>V>I>III>II。

从整体上来看,在 5 种群落的灌木层多样性指数中,群落 IV 的 H 指数、 H' 指数和 J_{sw} 指数均最大,群落 III 的 D 指数显著高于其他群落($P<0.05$);在草本层中,群落 III 的 4 种多样性指数均最大,其中 H 指数显著高于群落 IV 以外其他群落($P<0.05$)。



不同字母表示不同林分类型之间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 成都绕城高速路域人工林群落林下植被物种多样性指数

Different letters represent significant differences between forest types ($P<0.05$).

Fig. 2 Diversity indexes of the vegetation species under the forest of Chengdu ring expressway

2.3 路域人工林群落林下物种多样性与林分因子的冗余分析

通过冗余分析计算乔木层林分因子(平均高度、平均胸径、平均枝下高、平均冠幅、林分密度和郁闭度,数据见表 1)与灌木层和草本层的 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 指数之间的关系,结果(表 3,图 3)显示,灌木层中,RDA1 轴反映平均冠幅与 D 指数和 H 指数呈正相关,与 H' 指数和 J_{sw} 指数呈负相关;RDA2 轴反映另外 5 种林分因子的变化,平均高度、平均枝下

高、林分密度和郁闭度与 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 指数呈正相关,平均胸径与 H 、 H' 、 D 指数呈正相关, J_{sw} 指数呈负相关。其中平均枝下高和平均冠幅是显著影响灌木层的林分因子($P<0.01$)。草本层中,RDA1 轴反映平均高度、林分密度和郁闭度与 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 指数呈负相关;RDA2 轴反映另外 3 种林分因子的变化,平均枝下高、平均冠幅和平均胸径与 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 指数呈正相关。平均冠幅是显著影响草本层的林分因子($P<0.01$)。

表 3 冗余分析排序及蒙特卡洛置换检验结果

Table 3 Redundancy analysis ranking and Monte Carlo substitution test results

指标 Index	灌木层 Shrub layer						草本层 Herb layer				
	RDA1	RDA2	解释率 Explained variations /%	F	P		RDA1	RDA2	解释率 Explained variations /%	F	P
平均高度 Average height	−0.636 8	−0.182 6	2.5	1.0	0.312		0.356 5	−0.528 5	<0.1	<0.1	1.000
平均胸径 Average breast diameter	−0.136 0	0.699 4	1.6	0.7	0.488		−0.654 3	−0.103 6	6.0	2.4	0.176
平均枝下高 Average under-branch height	−0.872 3	0.406 8	38.4	11.2	0.002 **		−0.262 2	−0.649 0	3.4	1.4	0.252
平均冠幅 Average crown width	0.032 3	0.924 4	21.3	9.0	0.002 **		−0.879 3	−0.391 5	47.9	16.6	0.006 **
林分密度 Stand density	−0.610 7	−0.367 0	1.5	0.6	0.528		0.547 0	−0.131 3	0.4	0.2	0.706
郁闭度 Canopy density	−0.576 7	−0.112 1	1.2	0.5	0.618		0.530 1	−0.599 2	5.5	2.0	0.190
特征值 Eigen value	0.448 1	0.213 3					0.632 1	0.000 5			
累计解释变异 Explained variation (cumulative)/%	44.81	21.33					63.21	0.05			

注：** 表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: ** indicates an extremely significant correlation($P<0.01$).

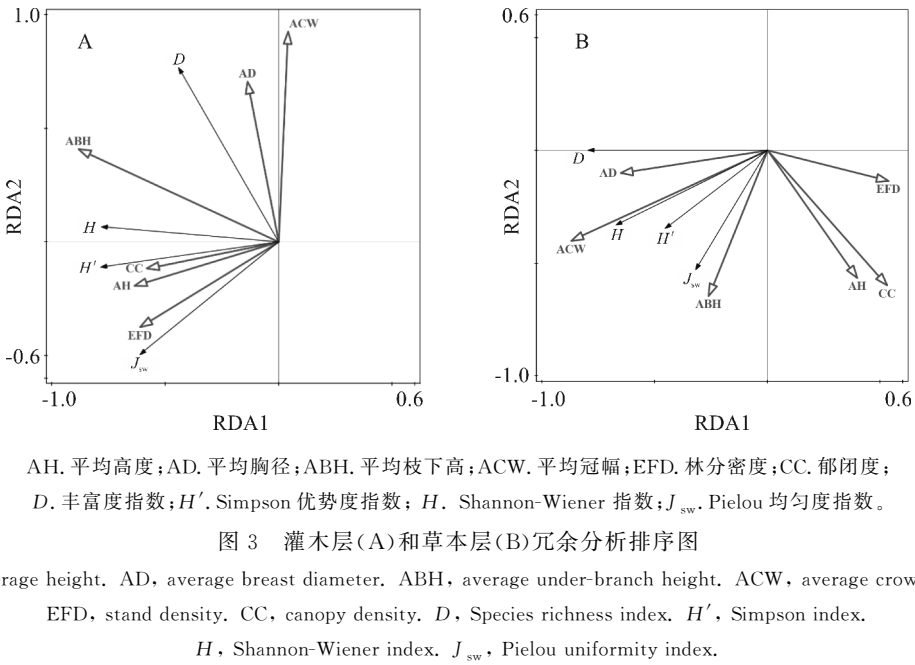


Fig. 3 Sorting diagram of redundancy analysis of the shrub layer (A) and herb layer (B)

3 讨论

3.1 树种组成对路域人工林林下物种组成的影响

研究发现该路域人工林群落的林下物种草本组成比灌木丰富,不同树种组成的林下植被物种差异明显。从植物生活习性来看,早期人工种植的路域树种皆为喜光树种,因路域林带窄而狭长,林内透光

率高,其林下自然形成的灌木层以喜光植物占据优势,在乔、灌层的遮蔽下,形成耐阴植物占主要优势的草本层,这是林下植物与林分因子及路域环境长期适应的结果^[12]。樟树纯林(群落Ⅲ)林下物种组成最为丰富,优于该路域现存的其他2种混交林,一方面是由于樟树作为亚热带常绿乔木树种在当地具有良好的适生性;另一方面是由于林下更新的幼树

对林内光照、水分、生存空间等资源竞争激烈,显著影响林下灌草物种的多样性及生长。研究发现幼树与灌草的竞争呈现出纯林比混交林缓和,缓生长命树种比速生强繁殖力树种缓和的规律^[6]。在本研究中发现巨桉纯林内速生的桉苗幼树能够顶替灌木层的构树成为巨桉纯林灌木层的最大优势种,因此生长慢、寿命长的樟树纯林在路域环境下仍能维持较高的生物多样性。而引进、速生树种加杨、巨桉为主要树种营建的路域人工林林下的灌木组成最少,巨桉纯林内草本组成也属 5 种群落中最少。研究发现相比于灌木层,林下草本层植物对林分结构变化的响应更为灵敏^[17-18]。在本研究中郁闭度最高的樟树、巨桉混交林林下生长的草本多喜阴喜湿,与巨桉纯林相比,其林下性喜阳光的菵草重要值降低,莲子草、丛枝蓼、冷水花等喜阴植物重要值增加。杜雨霜等^[19]的研究提出在生态修复造林早期,可优先考虑林下本土植物丰富且入侵植物较少的林分,利于形成具稳定性的林下植物群落。在本研究区内广泛分布的菵草是多年生攀援草本植物,生态幅度宽,繁殖力和抗逆性极强,极具入侵性,在林下易发展成优势种,因此在选择路域林分时,可以优先考虑菵草重要值低、林下本土植物丰富的群落。

3.2 树种组成对路域人工林林下物种多样性的影响

林下植被是森林生态系统的重要组成部分,其物种多样性可作为衡量森林质量变化的重要指标。本研究区的调查结果显示,树种组成的差异对路域人工林林下植被物种多样性影响显著,且不同群落类型中的灌木层和草本层多样性分化明显。草本层中,5 种群落类型的 H 指数、 H' 指数和 D 指数大小变化趋势一致,其多样性顺序为樟树纯林>樟树、巨桉混交林>加杨纯林>樟树、加杨混交林>巨桉纯林。可以看出既有纯林物种多样性大于混交林,也有混交林物种多样性大于纯林,这与张涵丹等^[5]的研究一致。合适树种、合适比例混交造林有利于形成具稳定性的群落物种多样性^[20-21]。王磊等^[22]研究发现,尾巨桉与红锥混交能较好地发展林下物种多样性,改良土壤质量,有效提升混交树种和混交林分的生长量与生物量。而本研究调查的 5 种群落里,当营造纯林时,樟树林下草本物种多样性达到最大,巨桉林下的则最小,当营造混交林时,樟树、巨桉混交比樟树、加杨树混交林下草本多样性更高。可见,在该路域以樟树为主要树种营建纯林或与桉树混交皆有利于林下形成丰富的草本群落。灌木层中,樟树纯林下灌层的 D 指数最大,灌木树种数最

多,但 J_{sw} 指数和 H' 指数不如樟树、巨桉混交林。樟树、巨桉混交林下灌层的 H 指数、 H' 指数和 J_{sw} 指数均最大,属 5 种群落中长势最佳,种类分布最均匀。据研究发现,Pielou 均匀度指数对于树木稳定性有正向影响^[23]。此外,随着时间的推移,均匀度、丰富度对地上总生物量生产力的影响随着林分发育的增加而增加^[24-25]。因此在 5 种林分类型中,若以樟树、巨桉混交林作为路域人工林建设,随着时间推移,自然更新发展获更佳效益。整体来看,在研究区不同路域人工林下,草本层在 H 指数、 H' 指数和 D 指数 3 个维度上均高于对应的灌木层,森林草本植物多样性对于群落物种多样性贡献最大,与以往关于林下植被的研究发现^[26]一致。由此可知,在该路域樟树为主要树种的林分下能维持较高的灌木和草本物种多样性。

3.3 林分因子对林下物种多样性的影响

据研究报道^[8,27-28],林分因子通过林下植被生长发育所必需的阳光、空间、水分、温度等资源的利用和分配,对林下植被的生长发育产生显著影响。本研究通过对林分因子与林下物种多样性指数的冗余分析发现,路域人工林的 6 个林分因子中,平均冠幅显著($P<0.01$)影响灌木层和草本层的多样性指数,其中平均冠幅与灌木层的 D 指数和 H 指数呈正相关,与灌木层的 H' 指数和 J_{sw} 指数呈负相关。这与前人研究结果并未完全一致,更多的研究结果指向林分密度显著影响灌木的多样性指数^[8,11,29]。也有研究认为不同林分密度通过直接影响乔木层的林木生长,尤其是平均冠幅、平均枝下高等,进而影响林分内的光环境以及水热条件^[10]。冠层结构和林下光照异质性的增加,将更有利于林下植被物种多样性的维持^[30]。本研究区乔、灌层主要组成物种皆为喜光植物,随着乔木层冠幅增加,林下光照减少,使得原有的喜光灌丛不再占据优势地位,弱光环境开始衍生耐阴植物,从而形成 D 指数和 H 指数增加, H' 指数和 J_{sw} 指数下降的趋势,连带影响灌木层下的草本植物。随着乔木层平均冠幅增加和灌木层 H' 指数降低,草本层的 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 指数均显著增大。区余端等^[31]研究发现,恢复演替早期的常绿速生树种乔木层结构的树高、枝下高、冠幅等与林内环境的总光照、温度等几乎完全相关。对于条带状分布的路域人工林而言,乔木层结构与林内环境相互影响,互相成就。本研究中发现平均枝下高与灌木层的 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 指数呈显著正相关,与前人相关研究发现^[11]一致,狭长路域人工林的乔、

灌层枝下高越高,林下的光照资源越充足,喜光的灌木树种在林下得以充分扩张占据较多的生态位。

3.4 关于提高成都绕城高速路域人工林群落生态效益的思考

适地适树原则在成都绕城高速路域人工林实际建设过程中未能很好地实施,存在选种、混交搭配不当问题。为更好地发挥路域植被的生态效益,基于本研究的调查结果探讨提高成都绕城高速路域人工林生态效益的管护措施。修枝是经营杨树人工林良材的重要技术措施^[32-33],也是维持林下物种多样性的必要措施。在该路域的人工林中,加杨属非地带性树种,在当地适生性差,且由于长期缺乏经营管理,以加杨为主要树种的林分平均树高、平均枝下高及林下物种多样性明显低于其他林分,建议进行修枝或更换该树种。研究表明多种作物种植结构^[34]和高密度、覆盖度^[4]的路域植被有利于降低空气中污染物的浓度,高速公路附近的乔、灌植被结构表现出最高的PM_{2.5}削减率^[35]。故而,乔、灌层组合结构是路域人工林改造的关键切入点。本研究区内,乔木层的樟树与灌木层的构树表现出很强的适应能力,各自占据乔、灌层大部分的生态位,适宜在成都绕城高速路域人工林下大面积种植。从路域植物近自然保护理念^[36]来看,为实现公路与生态环境协调发展,路域人工林模拟接近自然状态的植物群落而倾向于营造复层林群落结构,因而樟树、巨桉混交

林,恰好符合下层配置目标树种(樟树),上层配置速生先锋树种(巨桉)的结构设计。综合来看,该路域适合选择樟树作为主要树种,也可搭配较低比例的巨桉营造混交林。对于现有的路域人工林,可以选择对加杨进行修枝或替换成樟树,其林下补植构树,对巨桉林进行间伐后混交樟树等措施进行调整。

4 结 论

(1)成都绕城高速路域人工林乔、灌层的主要种为喜光树种,草本层主要种则多为耐阴植物,其中构树和葎草重要值分别最高可达40%和35%,分别占据灌木层与草本层的大部分生态位。

(2)5种树种组成中林下植被物种组成差异明显,物种数组成大小顺序为樟树纯林>樟树、巨桉混交林>加杨纯林>樟树、加杨混交林>巨桉纯林。

(3)成都绕城高速路域人工林林分因子与林下植被物种多样性的冗余分析显示,平均冠幅与灌木层的D指数和H指数、草本层的H、H'、D、J_{sw}指数均呈显著正相关(P<0.01),与灌木层的H'指数和J_{sw}指数呈显著负相关(P<0.01);平均枝下高与灌木层的H、H'、D、J_{sw}指数均呈显著正相关(P<0.01)。

(4)樟树作为路域人工林的主要树种,能够维持较高的林下物种多样性,保留樟树作为该路域人工林的主要树种是最优选择。

参考文献:

[1] JIN X Y, TANG J J, LUO D L, *et al.* Impacts of national highway G214 on vegetation in the source area of yellow and Yangtze Rivers on the southern Qinghai Plateau, West China [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1547.

[2] YANG H Z, ZHAO Y, CHENG Q F. Geohazards regionalization along highways in Shandong Province, China[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 1760-1781.

[3] BALDAUF R. Roadside vegetation design to improve local, near-road air quality[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52(11): 354-361.

[4] DESHMUKH P, ISAKOV V, VENKATRAM A, *et al.* The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, 12: 259-270.

[5] 张涵丹, 康希睿, 邵文豪, 等. 不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2118-2128.

ZHANG H D, KANG X R, SHAO W H, *et al.* Characteris-

tics of herbaceous plant biodiversity in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different community structures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2118-2128.

[6] 刘亚栋, 王晓霞, 和璐璐, 等. 北京地区油松人工林不同演替类型空间结构对林下植被及土壤的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 1959-1970.

LIU Y D, WANG X X, HE L L, *et al.* Effects of spatial structure on understory vegetation and soil properties in *Pinus tabulaeformis* plantation of different succession types in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 1959-1970.

[7] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 239-250.

ZHANG Y Q, LI Z C, HOU L Y, *et al.* Effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese fir plantation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 239-250.

[8] 周来. 落叶松天然林灌草多样性对林分乔木特征的响应[J]. *森林与环境学报*, 2023, 43(1): 44-51.

ZHOU L. Response of shrub and herb biodiversity to stand arbor characteristics in a natural larch forest[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2023, 43(1): 44-51.

[9] 王琴, 王芳, 何宇婷, 等. 林分因子对神木垒不同森林群落林下植物多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(11): 1950-1958.

WANG Q, WANG F, HE Y T, *et al.* Effects of stand factors on understory plant species diversity in different forest communities in shenmulei forest area[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(11): 1950-1958.

[10] 吴茜, 傅红, 郝建锋, 等. 林分密度对四川云顶山柏木人工林林下植被种间关联的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(4): 922-932.

WU Q, FU H, HAO J F, *et al.* Effect of stand density on interspecific association with under-canopy planting of *Cupressus funebris* plantation on Yunding Mountain in Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(4): 922-932.

[11] 陈聪琳, 孙一森, 龚利梅, 等. 不同密度路域巨桉人工林群落结构和物种多样性[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(1): 20-28.

CHEN C L, SUN Y M, GONG L M, *et al.* Community structure and species diversity of *Eucalyptus grandis* plantations with different stand densities in road area[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(1): 20-28.

[12] 邓婷婷, 魏岩, 任思远, 等. 北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响[J]. 生物多样性, 2023, 31(7): 18-29.

DENG T T, WEI Y, REN S Y, *et al.* Effects of topography and stand structure of warm temperate deciduous broad-leaved forest on understory herb diversity in Donglingshan, Beijing[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(7): 18-29.

[13] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.

FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533-548.

[14] 薛建辉. 森林生态学[M]. 修订版. 北京: 中国林业出版社, 2006.

[15] 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.

SU T C, XIANG L, CHEN C L, *et al.* The effects of forest management on species diversity and soil physicochemical property of poplar plantations along the expressway areas around Chengdu[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(1): 58-66.

[16] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.

MA K P. Measurement method of biological community diversity; I. Measurement method of α diversity (I) [J]. *Biodiversity Science*, 1994, 2(3): 162-168.

[17] 李婷婷, 鱼舜尧, 吴傲森, 等. 林分因子对云顶山不同人工林林下植物多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(8): 1463-1471.

LI T T, YU S Y, WU A M, *et al.* Effects of stand factors on understory species diversity of different plantations in yunding mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(8): 1463-1471.

[18] 刘江丽, 吕倩, 刘俊杰, 等. 林窗尺度对马尾松人工林林下灌草层优势种生态位的早期影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(2): 312-325.

LIU J L, LÜ Q, LIU J J, *et al.* Early effect of forest gap size on niche of dominant species in shrub and herb layers under *Pinus massoniana* plantation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(2): 312-325.

[19] 杜雨霜, 吴刘萍, 陈杰, 等. 崩岗生态修复不同人工林林下入侵植物和本土植物对群落稳定性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1855-1600.

DU Y S, WU-LIU P, CHEN J, *et al.* Effects of understory invasive plants and native plants on community stability in Benggang ecological restoration of different artificial forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1855-1600.

[20] 康希睿, 李晓刚, 张涵丹, 等. 不同混交措施下杉木人工林群落稳定性特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2912-2920.

KANG X R, LI X G, ZHANG H D, *et al.* Community stability characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different mixing measures[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(9): 2912-2920.

[21] 胡佳佳, 王晖, 刘世荣, 等. 树种及多样性组配对南亚热带人工林早期树木生长的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1511-1517.

HU J J, WANG H, LIU S R, *et al.* Effects of tree species identity and diversity on young tree growth in a south subtropical plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1511-1517.

[22] 王磊, 温远光, 周晓果, 等. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1340-1349.

WANG L, WEN Y G, ZHOU X G, *et al.* Effects of mixing *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* with *Castanopsis hystrix* on understory vegetation and soil properties[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1340-1349.

[23] WANG J J, WANG Y Z, TIAN D Y, *et al.* Modeling response of tree slenderness to climate, soil, diversity, and competition in natural secondary forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 545: 121253.

[24] SHOVON T A, KANG S, SCHERER-LORENZEN M, *et al.* Changes in the direction of the diversity-productivity relationship over 15 years of stand development in a planted temperate forest [J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110(5): 1100-1110.

1125-1137.

[25] ZHANG Y, CHEN H Y H, REICH P B. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: A global meta-analysis[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100 (3): 742-749.

[26] 黄炎根, 李丽, 戴兴安. 张家界砂岩峰林不同海拔林下植物多样性及其与土壤因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2023, 42 (10): 2469-2476.

HUANG Y G, LI L, DAI X A. Understory plant diversity of Zhangjiajie sandstone peak forest at different elevations and its relationship with soil factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(10): 2469-2476.

[27] YANG S L, MAO K S, YANG H, *et al.* Stand characteristics and ecological benefits of Chinese fir, Chinese cedar, and mixed plantations in the mountainous areas of the Sichuan Basin[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 544: 121168.

[28] 陈笑, 李远航, 左亚凡, 等. 林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(8): 1396-1407.

CHEN X, LI Y H, ZUO Y F, *et al.* Effects of stand characteristics and soil nutrient characteristics on herbaceous diversity[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(8): 1396-1407.

[29] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4521-4530.

SHU W W, LU L H, LI H, *et al.* Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (11): 4521-4530.

[30] 王莉, 林莎, 李远航, 等. 青海大通典型林分冠层结构与林下植被物种多样性关系研究[J]. *西北植物学报*, 2019, 39 (3): 524-533.

WANG L, LIN S, LI Y H, *et al.* Relationship between typical canopy structure and understory vegetation diversity in Datong, Qinghai[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(3): 524-533.

[31] 区余端, 吴刘萍, 杜雨霜, 等. 崩岗修复中速生树种冠层结构对林内环境的影响[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(6): 585-591.

OU Y D, WU L P, DU Y S, *et al.* Overstory structural effects of fast-growing trees on the understory environment in the restoration of Benggang[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(6): 585-591.

[32] 张康, 黄开栋, 赵小军, 等. 修枝对杨树人工林林内小气候及林下植被的短期效应[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(8): 1548-1556.

ZHANG K, HUANG K D, ZHAO X J, *et al.* Effects of pruning on microclimate and understory vegetation in a poplar plantation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(8): 1548-1556.

[33] HUANG K D, XU C, QIAN Z Z, *et al.* Effects of pruning on vegetation growth and soil properties in poplar plantations[J]. *Forests*, 2023, 14(3): 501.

[34] JEONG N R, HAN S W, KO B. Effects of green network management of urban street trees on airborne particulate matter (PM_{2.5}) concentration[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 2507.

[35] CHEN J G, YU X X, SUN F B, *et al.* The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) at shelterbelt site in Beijing[J]. *Atmosphere*, 2015, 6 (5): 650-676.

[36] 李齐丽, 刘杰, 朱高儒. 路域植物近自然保护技术体系研究[J]. *交通运输研究*, 2020, 6(4): 36-44.

LI Q L, LIU J, ZHU G R. Technical system of near-nature protection of highway plant[J]. *Transport Research*, 2020, 6(4): 36-44.