



广州市郊公路廊道旁适生植物*

彭少麟^{1,2}, 许为欣^{1,2}, 周婷^{1,2}, 廖慧璇^{2,3}, 陈宝明^{1,2}

1. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275
2. 中山大学国家公园与自然教育研究院, 广东 广州 510275
3. 中山大学生态学院, 广东 深圳 518000

摘要: 公路是人为修建用以促进人文交流与物质联通交换的廊道, 对社会经济、文化的发展起着极为重要的基础支撑作用。由于公路廊道与林地生境条件相比差距较大, 导致植物不易生长, 如何通过生态恢复构建道旁植被, 成为公路廊道生态建设的焦点问题之一。本研究选取广州郊区18条经历较长时间恢复的郊区道路设置了道旁样地, 共144个样方, 进行了植物群落调查和数据综合分析; 比较了6条公路与邻近林内生境的环境因子; 进一步测定了代表性优势适生物种的生理生态指标。试图解决如下科学问题: (1) 道旁与林内相比, 限制植物生长的环境要素有哪些? (2) 在道路旁有哪些自然适生植物? (3) 为什么这些植物能在道旁环境生长? 主要结果如下: (1) 广州郊区公路道旁生境较之林地, 对植物的生长起了限制作用的生态因子是强光照、高温以及干旱。(2) 筛选出33种道旁恶劣生境下自然生长的植物优势适生种, 其中16种广泛分布在道旁和林地, 17种广泛分布在道旁; 常绿种有2种、落叶种有9种, 落叶占比27.3%; 乔木有24种、灌木有6种, 藤本有3种, 乔木占比约72.7%。(3) 道旁自然生长植物具有阳性树种种数与数量增多, 树木形态矮化, 尖削度高, 叶片总厚度、栅栏组织和海绵组织增厚等适应性变化特征, 以及具有净光合速率、水分利用效率加快的生理生态特征; 这些特征也很好地解释了其适应的机理, 可作为道旁恢复物种筛选的科学依据。本研究揭示为什么这些植物能够在广州市郊区公路道旁生境下自然适生的机理, 丰富了公路生态廊道生态建设理论; 本研究提出的适生优势种, 可作为广州市郊区公路廊道植被快速生态恢复的优先物种选择, 对其他区域的道路生态廊道建设也有参考价值。

关键词: 广州郊区公路; 道旁生境; 适生物种; 适应特征

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)06-0086-09

Suitable plants along the highway corridor in the suburb of Guangzhou

PENG Shaolin^{1,2}, XU Weixin^{1,2}, ZHOU Ting^{1,2}, LIAO Huixuan^{2,3}, CHEN Baoming^{1,2}

1. School of Life Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. National Park and Nature Education Research Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
3. School of Ecology, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518000, China

Abstract: Road is a corridor built by people to promote cultural and material exchanges, and plays an important role in the foundation of social, economic and cultural development. Because of the big difference in habitat between road corridor and forest interior, plants are not easy to grow. How to construct roadside vegetation through ecological restoration has become one of the focus issues of road corridor ecological construction. In this study, a total of 144 roadside plots were set up in 18 suburban

* 收稿日期: 2024-05-17 录用日期: 2024-06-03 网络首发日期: 2024-07-22

基金项目: 中共广州市委政策研究室资助项目(056/2022 横)

作者简介: 彭少麟(1956年生), 男; 研究方向: 生态学;

E-mail: lsspsl@mail.sysu.edu.cn

论文视频摘要见增强出版



ZR20240162



ZR20240162

roads in Guangzhou after a long period of recovery, in which plant communities were investigated, and then the data were comprehensively analyzed. We also compared the environmental factors of 6 roads with their adjacent forest interior habitats, and determined the physiological and ecological indexes of representative dominant suitable species. We try to answer 3 scientific questions: (1) What are the environmental factors restricting plant growth along the road compared with forest interior? (2) What are the natural plants in the roadside? (3) Why do these plants grow in roadside environment? The main results are as follows: (1) Compared with forest interior, the main ecological factors limiting the growth of plants in roadside habitats are intense light, high temperature and drought. (2) A total of 33 natural dominant species were selected, of which 16 were widely distributed along roads and in forest interior, and 17 were mainly widely distributed in the roadside. There were 2 evergreen species and 9 deciduous species; the deciduous species accounted for 27.3%. There were 24 tree species, 6 shrub species and 3 vine species, accounting for 72.7% of the total. (3) The natural plants along the road had the characteristics of increasing number and quantity of positive tree species, dwarfing of tree form, high sharpness, thickening of total leaf thickness, palisade tissue and spongy tissue, etc. It has the physiological and ecological characteristics of higher net photosynthetic rate and water use efficiency; These characteristics also explain the mechanism of its adaptation, and can be used as the scientific basis for selecting species of roadside restoration. This study reveals the mechanism of why these plants can naturally adapt to the roadside habitat in suburban Guangzhou, and enriches the ecological construction theory of highway ecological corridor. The proposed biogenic dominant species is the priority species selection for rapid ecological restoration of highway corridor vegetation in suburban Guangzhou, and has a reference value for road ecological corridor construction in other areas.

Key words: Guangzhou suburban road; roadside habitat; suitable species; adaptive characteristics

公路是人为修建用以促进人文交流与物质交换的廊道, 对社会经济、文化的发展起着极为重要的基础支撑作用。在景观生态学中, 道路作为一个典型的廊道结构, 切割与联系着沿路多个生态系统类型, 形成边缘效应, 影响着道路及周围环境的生态过程(彭少麟, 2000; 周婷等, 2009), 这种影响往往是负面的, 仅在一些小型的森林道路上会出现例外(Zhou et al., 2020)。由于公路建设时直接的破坏性影响和运营时车辆通行行为自然环境带来的长期且持续性干扰, 造成一定程度的生态破坏和环境污染, 导致植被破坏、水土流失、景观破碎化、生态干扰等一系列问题(Flory et al., 2006; Forsyth et al., 2006; Zemke, 2016), 威胁到公路附近动植物栖息(福曼等, 2008; 马永排, 2011)。此外, 公路路面的组成材料多为砂石、沥青或者水泥, 与周围地区地表材质不同, 形成了道旁周边特殊的小气候条件, 与林地生境条件相比差距大, 导致植物不易生长(章家恩等, 1995)。

在全国的公路网中, 国道里程 37.54 万 km, 省道里程 38.75 万 km, 农村公路里程 446.60 万 km。

农村公路在公路网中占据着极大比例, 它们是连接着城与乡、乡与乡之间的郊区公路, 多数与森林、草原等绿地接壤, 是公路廊道生态建设的重点与难点、过去出于景观审美与休憩功能修建了生态廊道。而自 20 世纪 90 年代以来, 由于景观破碎、生态环境破坏等问题, 人们开始对“生态廊道”的建设提出更高要求, 规定其在具备审美与休憩功能之外, 还应具有生物多样性保护、水源涵养、污染物过滤等多种生态功能(郑好等, 2019)。作为廊道的典型, “道路生态廊道”建设十分重要, 而恢复道旁植被, 则是其中最为关键的基础工作之一。

本研究以广州郊区公路廊道为研究对象, 在广州郊区测定了 6 条公路道旁与邻近森林两种生境的生态环境因子; 选取了 18 条经历较长时间恢复的郊区道路设置了道旁样地, 共 144 个样方, 进行植物群落调查和数据综合分析; 对代表性优势适生物种, 进行以适应机理为目标的生理生态测定。试图解决如下科学问题: (1) 道旁与林地相比, 限制植物生长的环境要素有哪些? (2) 在道路旁有哪些自然适生植物? (3) 为什么这些植物能在

道旁环境生长? 通过阐明这些科学问题, 理论上揭示这些适生植物在广州市郊区公路道旁生境下能够自然生长和发展的机理, 丰富公路生态廊道生态建设理论; 实践上为广州市郊区公路廊道旁快速恢复提出合适的适生植物种类, 也为其他区域同类生态廊道建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究选取的试验样地 (22° 26' ~ 23° 56' N, 112° 57' ~ 114° 3' E) 位于广州市城郊, 主要分布在从化区、花都区、增城区、黄埔区。广州市地处广东省中部、珠江三角洲北缘, 主要地貌特征为平原和丘陵、山地、台地。在海洋性亚热带季风气候的影响下, 全年温暖多雨、光热充足, 具有夏季长、霜期短的特征; 年均温 22 °C, 年降水量 1 640~1 970 mm, 4~9 月为雨季, 10~3 月为干季。成土母岩为红色岩系、砂页岩, 红壤与黄壤为其主要土壤类型。地带性植被为季风常绿阔叶林。

1.2 道路旁生境测定

选取 6 条道路测定道旁与林内对照环境因子指标, 每一条道路选取 3 个道旁环境测定位点和 3 个林内对照测定位点, 共计 36 个位点, 位点间相距 20 m 以上 (图 1)。道路生境指标包括有光照强度、大气温度、大气湿度、平均风速、土壤温度、土壤湿度、土壤 pH、土壤电导率。

大气环境因子测定。光照强度采用 TES-1332A 数位式照度计进行测定; 大气环境因子采用 Kestrel 红隼 5500 气象仪测定, 记录大气温度、大气湿度与平均风速。

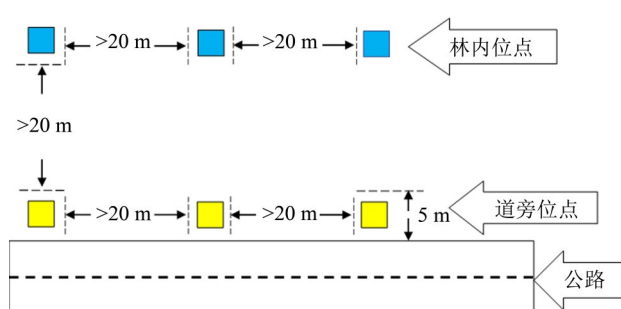


图 1 野外环境因子测定位点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of site determination of environmental factors in the field

土壤环境因子测定。土壤温度、土壤湿度采用 AZS-100 土壤水分仪测定; 测定完土壤温湿度后采集土壤装入自封袋, 带回实验室后, 利用天

平称量 10 g 土样, 加入去离子水 25 mL, 150 r/min 振荡 30 min, 静置沉淀 30 min 后, 利用 Mettler Toledo 的 FE28pH 计与 FE38 电导率仪测定并记录土壤 pH、土壤电导率。

采用混合效应模型分析方法 (mixed effect model), 以环境因子指标作为因变量, 固定效应为生境, 随机效应为道路, 比较道旁和相近林内位点的测定值, 阐明道旁生境的特征。

1.3 道旁适生植物种类调查

道旁样方与对照样方调查。选取 18 条广州市郊区近自然森林的道路 (图 2), 在距离道路路肩 0 m 处设置 8 个 20 m × 5 m 的调查样方 (总面积 800 m²), 记录样方内乔木与灌木层的胸径、株高与冠幅, 并在每个样方内设置 1 个 2 m × 2 m 的草本样方, 记录草本盖度、平均高度和株数。选择 3 条林地距离道路 20 m 以上的道路作为对照实验, 设置与每条道路同样面积的样地进行乔灌草群落调查。

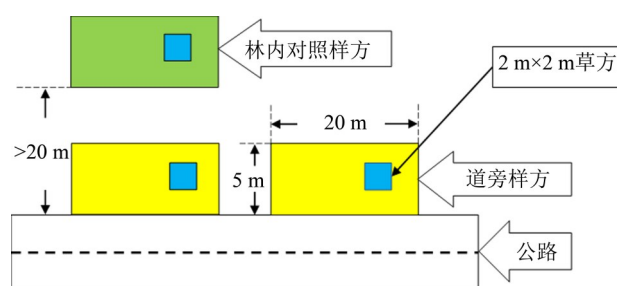


图 2 样方设置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of quadrat setup

道旁优势适生种测定。对样地数据进行分析, 分别统计道旁和林内生境中所有样方内的物种数量及其科、属组成, 计算乔木层各种群的重要值 (方精云等, 2009; 林鹏, 1986; 王伯荪等, 1996), 基于重要值筛选道旁自然发生的优势适生种。对每一种植物按喜光性分为阳性树种与中生树种, 阐明优势适生种的光生态型。

1.4 生物生态学测定

通过植物群落调查筛选出的道旁自然适生的植物, 作为研究对象, 于野外进行样品采集和生物生态学指标测定。

植物叶片光合生理指标测定。筛选道旁和相邻林地同种植物, 每种植物选择 6 片健康叶片, 利用 GFS-3000 光合仪测定净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和水分利用效率。以各项生理指标作为因变量, 以两种生境类型的优势适生种作为自变量, 进行单因素方差分析方法

(ANOVA)分析。

叶片形态与解剖结构测定。各生境下各物种分别采集30片叶片进行叶长宽比、含水率、比叶面积这两个的生理指标的测定;6片叶片进行包埋、切片和光学显微镜下观察,测定叶厚度、叶脉厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和下表皮厚度等解剖学特征。以各项指标作为因变量,以两种生境类型的适生种作为自变量,进行ANOVA分析。

树木形态适应特征测定。计算道旁与林内优势种不同径级下的植株高度和尖削度,以此为因变量,采用混合效应模型进行分析,固定效应为生境,随机效应为物种、道路。

2 结果与分析

2.1 道旁生境特征

测定道旁与林内两种生境的结果如表1所示。通过比较道旁与林内两种生境的大气环境因子发现,道旁生境的大气温度显著高于林内生境,比林内生境高了1.81℃;大气湿度显著低于林内生境,比林内低了8.87%;光照极显著高于林内,高了21 184.39 lx(表1)。道旁生境的土壤温度比林内生境高了1.68℃,土壤湿度则低了6.89%。由此可见,温度、湿度与光照强度是道旁与林内生境差异的关键环境因子。

表1 道旁与林内生境差异¹⁾

Table 1 Differences of environmental factors between roadside and forest habitats

环境因子	生境	Mean ± SE	df	F	P
大气温度	道旁	33.14 ± 0.91a	1, 5	10.72	0.022
	林内	31.33 ± 0.55b			
大气湿度	道旁	71.00 ± 3.13b	1, 5	33.37	< 0.001
	林内	79.87 ± 1.54a			
平均风速	道旁	0.48 ± 0.11	1, 5	3.56	0.077
	林内	0.22 ± 0.14			
光照强度	道旁	23 198.33 ± 2 506.85a	1, 5	63.01	< 0.001
	林内	2 013.94 ± 2 668.72b			
土壤温度	道旁	33.75 ± 0.68a	1, 5	7.62	0.014
	林内	32.07 ± 0.62b			
土壤湿度	道旁	11.40 ± 0.93b	1, 5	53.13	< 0.001
	林内	18.29 ± 0.95a			
土壤pH	道旁	5.32 ± 0.23	1, 5	6.46	0.052
	林内	4.90 ± 0.17			
土壤电导率	道旁	38.18 ± 7.26	1, 5	0.05	0.830
	林内	37.28 ± 4.02			

1) 混合效应模型固定效应为生境,随机效应为道路。不同字母表示同一因素不同生境之间差异显著($\alpha=0.05$),同时其P值以粗体标示。

2.2 道旁适生优势种筛选

乔灌层群落调查数据中,以一条道路作为一个群落,在18个道旁群落中,群落平均物种数为48,取群落平均物种数的25%,将重要值排名前12种进行汇总分析,共有66个物种。从中筛选出重复数为2以上的33个乔灌物种,作为道旁生境的优势适生种。其中16个适生优势种在道旁和林内均广泛分布,另外17个适生优势种主要出现

在道旁(表2)。

道旁33个优势种中常绿种有24种、落叶种有9种,落叶种占比27.3%。落叶树在道旁占据很高的优势地位,前6个优势种有5个是落叶种,33个种中包含乔木24种、灌木6种、木质藤本3种,乔木占比72.7%。而林内对照优势种同样方法筛选出29个物种,其中落叶种只有2种,常绿种有27种,落叶占比仅为6.9%;灌木只有2种,乔木有27种,

表2 广州市郊廊道旁自然适生优势植物及其生态特征

Table 2 Ecological characteristics of natural dominant plants along corridors in Guangzhou suburbs

物种	重复数	重要值平均值	科属	生活型	生境分布	光生态型
鸭脚木(<i>H. heptaphylla</i>)	16	27.89	五加科鹅掌柴属	常绿乔木	道旁、林内	阳性
山乌柏(<i>T. cochinchinensis</i>)	16	27.30	大戟科乌柏属	落叶乔木	道旁、林内	阳性
盐麸木(<i>R. chinensis</i>)	12	19.52	漆树科盐麸木属	落叶乔木	道旁、林内	阳性
山苍子(<i>L. cubeba</i>)	11	23.08	樟科木姜子属	落叶小乔木	道旁、林内	阳性
红背山麻秆(<i>A. trewioides</i>)	9	28.66	大戟科山麻秆属	落叶灌木	道旁	阳性
野漆(<i>T. succedaneum</i>)	9	25.33	漆树科漆树属	落叶小乔木	道旁、林内	阳性
马尾松(<i>P. massoniana</i>)	8	34.75	松科松属	常绿乔木	道旁、林内	阳性
木荷(<i>S. superba</i>)	8	29.36	山茶科木荷属	常绿乔木	道旁、林内	中生
三桠苦(<i>M. pteleifolia</i>)	8	20.21	芸香科蜜茱萸属	常绿乔木	道旁、林内	中生
粗叶榕(<i>F. hirta</i>)	7	20.19	桑科榕属	常绿灌木	道旁、林内	阳性
白楸(<i>M. paniculatus</i>)	6	35.91	大戟科野桐属	落叶乔木	道旁	阳性
豺皮樟(<i>L. rotundifolia</i>)	6	18.80	樟科木姜子属	常绿小乔木	道旁	阳性
蕨萁(<i>C. fissa</i>)	5	22.67	壳斗科蕨属	常绿乔木	道旁、林内	中生
野牡丹(<i>M. malabathricum</i>)	5	22.12	野牡丹科野牡丹属	常绿灌木	道旁	阳性
桃金娘(<i>R. tomentosa</i>)	5	17.71	桃金娘科桃金娘属	常绿灌木	道旁、林内	阳性
水锦树(<i>W. uvariifolia</i>)	4	26.95	茜草科水锦树属	常绿乔木	道旁	中生
山黄麻(<i>T. tomentosa</i>)	4	23.75	大麻科山黄麻属	落叶小乔木	道旁	阳性
毛稔(<i>M. sanguineum</i>)	4	19.37	野牡丹科野牡丹属	常绿灌木	道旁	阳性
黄樟(<i>C. parthenoxylon</i>)	4	17.23	樟科樟属	常绿乔木	道旁、林内	中生
藤黄檀(<i>D. hancei</i>)	4	15.49	豆科黄檀属	常绿木质藤本	道旁、林内	阳性
樟(<i>C. officinarum</i>)	4	14.82	樟科樟属	常绿乔木	道旁、林内	中生
山杜英(<i>E. sylvestris</i>)	3	21.25	杜英科杜英属	常绿小乔木	道旁、林内	中生
山油柑(<i>A. pedunculata</i>)	3	19.82	芸香科山油柑属	常绿乔木	道旁	中生
锡叶藤(<i>T. sarmentosa</i>)	3	16.01	五桠果科锡叶藤属	常绿木质藤本	道旁	阳性
银柴(<i>A. dioica</i>)	3	15.06	大戟科银柴属	常绿乔木	道旁	中生
土蜜树(<i>B. tomentosa</i>)	3	14.07	叶下珠科土蜜树属	落叶小乔木	道旁	阳性
紫玉盘(<i>U. macrophylla</i>)	2	17.45	番荔枝科紫玉盘属	常绿灌木	道旁	阳性
轮环藤(<i>C. racemosa</i>)	2	17.02	防己科轮环藤属	常绿木质藤本	道旁	阳性
黄毛榕(<i>F. esquiroliana</i>)	2	16.28	桑科榕属	常绿小乔木	道旁	阳性
黄牛木(<i>C. cochinchinense</i>)	2	15.57	金丝桃科黄牛木属	落叶乔木	道旁	阳性
潺槁木姜子(<i>L. glutinosa</i>)	2	14.21	樟科木姜子属	常绿乔木	道旁	阳性
细齿叶柃(<i>E. nitida</i>)	2	11.96	五列木科柃属	常绿小乔木	道旁	中生
黄杞(<i>E. roxburghiana</i>)	2	10.90	胡桃科黄杞属	常绿乔木	道旁、林内	中生

乔木占比高达93.1%。

中性树种在道旁生境与林内生境下均有相近的发育发展程度,但林内种数较多;阳性树种在道旁生境下的发育发展程度远超林内生境,种数也更多,主要有鸭脚木、山乌柏、山苍子、盐麸

木、野漆、野牡丹、毛稔、马尾松、白楸、粗叶榕、红背山麻秆、山黄麻等,说明道旁生境与阳性树种有更高的适配性,阳性树种更能适应道旁生境。

2.3 道旁适生优势种的适应特征

2.3.1 形态适应特征 通过比较道旁与林内生境

下4个径级优势种整体的高度与尖削度发现(表3), 道旁优势种的高度均显著低于林内生境优势种的高度, 植物径级越大, 道旁植株高度差异值越大, 可见, 道旁生境的限制会持续抑制植物在株高方向上的生长。尖削度对比结果显示, 道旁优势种的尖削度均显著高于林内生境优势种的尖削度, 道旁的限制性生境会使得植物生长发育方向倾向于矮壮, 对植物横纵向的生长影响随发育时间增加而增强, 这很可能是因为随着植物的生长发育, 其增长的资源需求与道旁强光高温少水生境之间的矛盾日益突出, 迫使植物资源分配转向根茎的横向增粗, 提高自身吸水能力来适应道旁生境。

2.3.2 适生种叶片形态结构适应特征 选取在道旁与林内生境内均能够共同获得生长发育的山乌柏、鸭脚木、木荷、黄樟、三桠苦5种适生种进行叶片解剖形态特征研究。结果表明, 不同物种在叶形态解剖上对道旁生境的适应敏感性不同, 但栅栏组织与海绵组织、叶片厚度均有不同程度的增厚(表4)。

2.3.3 适生种叶片生理生态适应特征 选取在道旁与林内生境内均能够共同获得生长发育的山乌柏、鸭脚木、木荷、黄樟、三桠苦5种适生种进行

叶片生理生态特征研究。结果表明, 道旁优势适生种依靠相同方式, 即提高净光合速率和水分利用效率来应对道旁强光照和水分胁迫, 同时还可能依据不同的叶片适应策略而各自调整比叶面积和含水率来适应环境(表5)。

3 讨论

3.1 研究公路廊道旁自然发生植物的生态特性与适应性

广州市郊区公路廊道旁生境与林内相比, 光照增强、环境温度增加与水分减少, 这与众多文献结果一致(Ahmed et al., 2023; Coffin, 2007; Forman et al., 1998)。对道旁与林内生境群落多样性的比较发现, 道旁的整体多样性明显逊色于林内, 这表明了环境差异决定了道旁群落植物分布的差异性(de Pauw et al., 2021)。

道旁强光照、高风速、水分与养分限制等对群落结构组成与功能特征造成较大的改变。首先, 道旁的33个道旁优势适生种, 大部分物种为广布种, 有16种在道旁与林内均广泛分布, 道旁的环境有利于阳生性的种类生长(刘杰等, 2006; 2007); 其次, 道旁适生优势植物还通过减少株高生长、

表3 道旁与林内优势种各个径级高度与尖削度差异¹⁾

Table 3 The difference on height and taperingness of each diameter class of dominant species between roadside and forest habitats.

指标	径级	生境	Mean ± SE	df	F	P
高度	0 < D ≤ 5	道旁	2.78 ± 0.15b	1, 7	7.27	0.031
		林内	3.53 ± 0.28a			
	5 < D ≤ 10	道旁	5.52 ± 0.29b	1, 9	36.49	< 0.001
		林内	7.62 ± 0.35a			
	10 < D ≤ 15	道旁	7.06 ± 0.49b	1, 15	32.49	< 0.001
		林内	10.66 ± 0.63a			
	D ≥ 15	道旁	7.77 ± 0.56b	1, 4	57.41	0.001
		林内	13.34 ± 0.74a			
尖削度	0 < D ≤ 5	道旁	0.82 ± 0.05a	1, 542	7.67	0.006
		林内	0.74 ± 0.03b			
	5 < D ≤ 10	道旁	1.49 ± 0.08a	1, 60	16.05	< 0.001
		林内	1.18 ± 0.08b			
	10 < D ≤ 15	道旁	2.09 ± 0.14a	1, 11	22.84	< 0.001
		林内	1.23 ± 0.18b			
	D ≥ 15	道旁	2.96 ± 0.20a	1, 4	24.00	0.010
		林内	1.70 ± 0.26b			

1) 混合效应模型固定效应为生境, 随机效应为道路、物种。不同字母表示同一因素不同生境之间差异显著($\alpha=0.05$), 同时其P值以粗体标示。

增加尖削度的方式来适应道旁生境,使得乔木会变得“小乔木化”,其主要受到水分与养分的限制(赵贤慧等,2023),也可能会受到风的胁迫(Telewski, 2012)。再者,道旁植物还通过叶片的栅栏组织、海绵组织和总厚度的变化来适应道旁生境。

表4 道旁与林内适生种叶解剖差异变化¹⁾

Table 4 Leaf anatomy difference of adaptive species between roadside and forest habitats

指标	生境	鸭脚木 (<i>H. heptaphylla</i>)	山乌桕 (<i>T. cochinchinensis</i>)	三桠苦 (<i>M. pteleifolia</i>)	木荷 (<i>S. superba</i>)	黄樟 (<i>C. parthenoxylon</i>)
叶脉厚度/ μm	道旁	1 374.7 \pm 157.2	753.5 \pm 75.6	1 030.8 \pm 103.3a	699.1 \pm 171.9	1 027 \pm 84.5a
	林内	1 442.9 \pm 86.2	872.8 \pm 165.8	892 \pm 108.9b	737.3 \pm 79.2	835.3 \pm 103.5b
上表皮厚度/ μm	道旁	40.7 \pm 8.8	15.5 \pm 1.1	16.9 \pm 0.6	19.9 \pm 2.2	27.5 \pm 1.4
	林内	43.0 \pm 5.8	17.9 \pm 3.1	16.5 \pm 1.8	18.5 \pm 2.4	27.7 \pm 2.8
栅栏组织厚度/ μm	道旁	93.6 \pm 9.6b	65.9 \pm 12.7	60.1 \pm 10a	59.5 \pm 12.8	57.8 \pm 4.5
	林内	106.6 \pm 6.1a	73.0 \pm 5.4	42.9 \pm 6.1b	49.5 \pm 6.5	52.4 \pm 9.0
海绵组织厚度/ μm	道旁	175.5 \pm 29.1	87.1 \pm 14.4	114.6 \pm 12.1a	122.6 \pm 12.9a	126.4 \pm 11.7a
	林内	168.6 \pm 22.5	97.0 \pm 37.0	85.7 \pm 12.2b	97.9 \pm 10.2b	93.8 \pm 21.0b
下表皮厚度/ μm	道旁	24.8 \pm 2.8	15.1 \pm 2.7	16.6 \pm 0.7a	12.5 \pm 1.2	18.7 \pm 2.4
	林内	26.6 \pm 0.6	16.0 \pm 2.6	13.8 \pm 2.4b	11.6 \pm 1.0	18.4 \pm 2.3
叶总厚度/ μm	道旁	334.5 \pm 28.5	183.5 \pm 19.1	208.2 \pm 12.6a	214.6 \pm 24.8a	230.4 \pm 10.3a
	林内	344.8 \pm 27.0	203.9 \pm 44.9	158.9 \pm 19.2b	177.5 \pm 17.7b	192.3 \pm 27.6b
栅栏与海绵组织厚度比/%	道旁	54.5 \pm 10.0	77.1 \pm 17.1	53.2 \pm 11.4	48.4 \pm 7.6	46.2 \pm 6.7b
	林内	63.9 \pm 7.4	81.2 \pm 19.5	50.5 \pm 7.6	50.6 \pm 4.7	56.5 \pm 5.7a
栅栏组织占叶肉比/%	道旁	35.0 \pm 4.6	43.1 \pm 5.9	34.4 \pm 5.0	32.5 \pm 3.4	31.5 \pm 3.1b
	林内	38.9 \pm 2.8	44.2 \pm 6.6	33.4 \pm 3.2	33.5 \pm 2.0	36 \pm 2.3a
叶肉占叶总厚度比/%	道旁	80.4 \pm 2.6	83.2 \pm 2.5	83.8 \pm 1.4a	84.8 \pm 1.6	79.9 \pm 1.5a
	林内	79.7 \pm 1.9	83.2 \pm 2.3	80.9 \pm 2.1b	83.0 \pm 1.2	75.6 \pm 4.4b

1) 不同字母表示同一因素不同生境之间差异显著($\alpha=0.05$)。

强光照会导致比叶面积下降,道旁生境下的木荷、三桠苦、鸭脚木3个常绿种的比叶面积显著降低。在光合生理特征上,道旁的优势种利用道旁的充足光能,净光合速率大幅上升、水分利用效率提升,这与冯强等(2016)和石凯等(2018)的研究结果相同。落叶种占有比例,落叶种往往通过此种策略来保证生长季较高的水分供应用以生长:在冬季则以落叶方式避开干冷条件,来减少损伤风险适应非生长季的不利生境条件,对蒙古栎和火炬树的研究均与本研究一致(李东胜等,2017;赵贤慧等,2023)。本研究揭示公路廊道旁自然发生植物的生态特性与适应性,为寻找适用于道旁生境快速恢复的适生性物种提供理论支撑。

3.2 公路廊道旁生境群落恢复的物种选择

在公路廊道建设后,道旁生境与林地生境相比,光强、大气温度、大气湿度、土壤温度、土

壤湿度等生态因子均较为严酷。因此,寻找适用于道旁生境快速恢复的适生性物种是前提。通过公路廊道旁自然发生的植物调查与筛选,基于多个道旁群落乔灌层优势种的复现率,确定了道旁33个道旁优势种,这些种类是未来广州市公路廊道生态建设的优先物种。

过去多以外来速生植物为主要恢复树种,容易导致群落组成单一,稳定性差等问题(罗双等,2011)。本研究实地踏查时发现,广州相当一部分道旁区域被引种的桉树、光荚含羞草等外来树种占据,乡土树种定植困难,群落多样性较低,其原因多为缺少相近的种子源库与受到外来入侵树种的阻碍。要改变这种状况,应该采用土著乔木-灌木-草本相结合的模式,减少外来入侵风险,这一观点得到许多研究的认同(罗永宏,2021;田甜等,2010)。

结合本研究筛选而出的适生种进行快速恢复。

表5 道旁与林内适生种生理生态指标差异变化¹⁾

Table 5 Physiological ecology indexes difference of adaptive species between roadside and forest habitats

指标	生境	鸭脚木 (<i>H. heptaphylla</i>)	山乌柏 (<i>T. cochinchinensis</i>)	三桠苦 (<i>M. pteleifolia</i>)	木荷 (<i>S. superba</i>)	黄樟 (<i>C. parthenoxylon</i>)
净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	道旁	7.32 ± 2.10a	8.84 ± 2.39a	2.86 ± 0.41a	7.24 ± 1.45a	3.87 ± 1.91
	林内	0.32 ± 0.11b	4.47 ± 1.11b	1.10 ± 0.18b	4.77 ± 0.74b	2.35 ± 0.81
蒸腾速率/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	道旁	0.70 ± 0.24	1.10 ± 0.37	0.70 ± 0.11	1.46 ± 0.23a	0.93 ± 0.12
	林内	0.98 ± 0.30	1.15 ± 0.45	0.61 ± 0.05	1.16 ± 0.17b	0.82 ± 0.23
气孔导度/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	道旁	61.78 ± 20.56	73.18 ± 26.5	42.83 ± 7.89	77.81 ± 12.26a	56.15 ± 7.41
	林内	52.55 ± 15.93	88.80 ± 33.74	36.54 ± 2.92	60.24 ± 11.74b	50.69 ± 16.4
胞间CO ₂ 量比/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	道旁	199.68 ± 41.94b	193.92 ± 43.29b	281.98 ± 28.37b	242.74 ± 18.44	285.34 ± 42.96
	林内	377.97 ± 5.43a	305.31 ± 32.74a	342.87 ± 9.88a	263.78 ± 15.86	317.49 ± 18.99
水分利用效率/($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	道旁	10.93 ± 2.23a	8.27 ± 1.65a	4.16 ± 0.93a	4.98 ± 0.66a	4.05 ± 1.67
	林内	0.36 ± 0.19b	4.25 ± 1.71b	1.80 ± 0.33b	4.12 ± 0.44b	2.85 ± 0.74
比叶面积/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	道旁	106.18 ± 6.76	238.17 ± 13.81a	181.87 ± 22.59b	138.59 ± 3.83b	129.10 ± 6.04b
	林内	104.59 ± 12.51	192.81 ± 5.74b	304.98 ± 24.35a	159.73 ± 6.70a	145.69 ± 6.73a
叶含水率/%	道旁	66.65 ± 1.15b	86.50 ± 4.31a	83.25 ± 3.59b	73.92 ± 3.60	75.43 ± 3.59a
	林内	70.97 ± 0.60a	78.35 ± 2.28b	90.85 ± 1.73a	78.61 ± 3.98	69.01 ± 1.11b

1) 不同字母表示同一因素不同生境之间差异显著($\alpha=0.05$)。

可选用的常绿乔木有木荷、鸭脚木、三桠苦、鬃蕨、黄樟、樟、山杜英、黄毛榕、水锦树、银柴、山油柑、潺槁木姜子、马尾松；落叶乔木有山乌柏、盐麸木、野漆、白楸、黄牛木；落叶小乔木至灌木层可采用常绿种有豺皮樟、土蜜树、细齿叶柃、粗叶榕、野牡丹、桃金娘、毛稔、落叶种有山苍子、山黄麻、红背山麻秆；草本层可选用珍珠茅、东风草、弓果黍、马唐、叶下珠、一点红等一年生草本。特别的是，其中的落叶乔木可能特别契合亚热带道旁生境，本身的落叶特性能够更好度过亚热带的非生长季，其凋落物在生长季还能迅速分解，对土壤水分、养分、土壤微生物较高的蓄养功能。可尝试利用土坑法收集落叶贮存水分养护土壤，该方法具有更快更好的恢复效果(彭少麟等, 2006)。

建议按如下的程序恢复广州郊区公路廊道旁生境群落：早期恢复建议优先栽种山苍子、山黄麻、红背山麻秆等乡土落叶灌木树种，播撒一年生草本改善道旁生境的土壤水分和养分条件，快速建立多样性较高的灌草群落，不建议采用蔓生莠竹、粽叶芦、五节芒等多年生禾本科草本，因在实地调查发现，其具有一定的侵略性，容易形成单优群落，会挤占后续乔灌幼苗定植的生存空间和资源；在经历1~2 a的早期恢复后，中期可增

栽乔木种类，并保证足够的落叶树种比例，形成较为稳定的乔灌群落，提高土壤物质循环能力，保障土壤水分和养分的蓄存；在经过4~5 a的中期恢复后，道旁应形成良好发展的阳性树种为主且乔灌草兼备的生物群落，可视情况增栽多种乡土乔灌树种(阳性树与中生树均可)，以提高群落物种丰富度，提高群落稳定性。

揭示公路廊道旁自然发生植物的生态特性与适应性，为寻找适用于道旁生境快速恢复的适生性物种提供理论支撑，是公路廊道生态建设行之有效的办法。

4 结 论

本论文通过广州市郊区公路廊道生态环境的因子测定、群落调查筛选、植物性状指标测定和综合分析，得出如下主要结论：

1) 道旁生境具有强光照、高温、少水的环境限制。

2) 通过公路廊道旁自然发生的植物调查与筛选，基于多个道旁群落乔灌层优势种的复现率，确定了道旁33个道旁优势种，这些种类以常绿乔木为主，阳性树种占优，是未来广州市公路廊道生态建设的优先物种。

3) 植物还能通过调整自身的形态与生理生态

特征来适应道旁生境, 群落整体在植株树木形态上降低株高、增加尖削度, 植株更加矮壮, 会变得“小乔木化”; 栅栏组织、海绵组织和叶片总厚度均不同程度的增厚; 净光合速率和水分利用率等指标也增加, 从而在道旁环境能够自然生长。

以上的研究结果为广州市郊公路廊道生态建

设的关键环节、植被的快速恢复提供了理论支撑和实践依据, 也为其他区域的公路廊道生态建设提供理论基础和实践对策。

致谢 中山大学百年校庆之际, 谨以此文献给中山大学生态学的奠基者——张宏达和王伯荪教授等人, 向他们对中山大学生态学作出的卓越贡献表示敬意!

参考文献:

- 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等, 2009. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 17(6): 533-548.
- 冯强, 刘宁, 王瞰, 2016. 不同森林光环境下 4 种灌木 1 年生幼苗形态和光合生理特性[J]. 中南林业科技大学学报, 36(5): 93-101.
- 福曼, 李太安, 安黎哲, 2008. 道路生态学: 科学与解决方案[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 李东胜, 白庆红, 李永杰, 等, 2017. 光照条件对蒙古栎幼苗生长特性和光合特征的影响[J]. 生态学杂志, 36(10): 2744-2750.
- 林鹏, 1986. 植物群落学[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 刘杰, 崔保山, 董世魁, 等, 2006. 公路建设干扰下的生态系统变化及其机理[J]. 水土保持通报, 26(2): 31-36.
- 刘杰, 崔保山, 董世魁, 等, 2007. 纵向岭谷区高速公路干扰下群落组分及其水平分布格局变化研究[J]. 科学通报, 52(S2): 185-194.
- 罗双, 孙海龙, 李绍才, 等, 2011. 四川道路边坡自然恢复的植被调查[J]. 中国水土保持(10): 12-16.
- 罗永宏, 2021. 公路绿化生态恢复与绿化养护技术[J]. 交通世界, (S1): 219-220.
- 马永排, 2011. 云南高速公路建设对生态环境的影响及对策分析[J]. 林业调查规划, 36(3): 112-116.
- 彭少麟, 2000. 南亚热带演替群落的边缘效应及其对森林片断化恢复的意义[J]. 生态学报, 20(1): 1-8.
- 彭少麟, 侯玉平, 俞龙生, 等, 2006. 澳门植被恢复过程土坑法的效应机制探讨[J]. 生态环境, 15(1): 1-5.
- 石凯, 李泽, 张伟建, 等, 2018. 不同光照对油桐幼苗生长、光合日变化及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 38(8): 35-42+50.
- 田甜, 李绍才, 孙海龙, 等, 2010. 道路建设扰动下的生态效应分析及其消减对策[J]. 水土保持通报, 30(1): 199-204.
- 王伯荪, 余世孝, 李鸣光, 1996. 植物群落学实验手册[M]. 广州: 广东高等教育出版社.
- 章家恩, 徐琅, 1995. 道路的生态学影响及其生态建设[J]. 生态学杂志, (6): 74-77.
- 赵贤慧, 李玉武, 李文彬, 等, 2023. 不同光照和水分条件对火炬树的生理生态功能的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 54(1): 78-85.
- 郑好, 高吉喜, 谢高地, 等, 2019. 生态廊道[J]. 生态与农村环境学报, 35(2): 137-144.
- 周婷, 彭少麟, 林真光, 2009. 鼎湖山森林道路边缘效应[J]. 生态学杂志, 28(3): 433-437.
- AHAMMED S, Mohammed, AZIZ T, et al, 2023. Forest roads regulate native and exotic species diversity and adjacent soil properties in Lawachara National Park, Bangladesh[J]. Eur J For Res, 142(3): 691-705.
- COFFIN A W, 2007. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads[J]. J Transp Geogr, 15(5): 396-406.
- de PAUW K, MEEUSSEN C, GOVAERT S, et al, 2021. Taxonomic, phylogenetic and functional diversity of understorey plants respond differently to environmental conditions in European forest edges[J]. J Ecol, 109(7): 2629-2648.
- FLORY S L, CLAY K, 2006. Invasive shrub distribution varies with distance to roads and stand age in eastern deciduous forests in Indiana, USA[J]. Plant Ecol, 184(1): 131-141.
- FORMAN R T T, ALEXANDER L E, 1998. Roads and their major ecological effects[J]. Annu Rev Ecol Syst, 29: 207-231.
- FORSYTH A R, BUBB K A, COX M E, 2006. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a south-east Queensland coastal plain *Pinus* plantation[J]. For Ecol Manag, 221(1/2/3): 194-206.
- TELEWSKI F W, 2012. Is windswept tree growth negative thigmotropism?[J]. Plant Sci, 184: 20-28.
- ZEMKE J, 2016. Runoff and soil erosion assessment on forest roads using a small scale rainfall simulator[J]. Hydrology, 3(3): 25.
- ZHOU T, LUO X, HOU Y, et al, 2020. Quantifying the effects of road width on roadside vegetation and soil conditions in forests[J]. Landsc Ecol, 35(1): 69-81.

(责任编辑 张冰)