

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.027



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 气候变化下中国城市市树适宜分布区及适生规律

谷婧娴, 杨永川, 牟文博, 靳程

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 市树是城市园林绿化的重要组成部分, 近年来气候变化使市树适生区迁移, 影响城市人居环境可持续发展, 因此, 亟需了解气候变化下市树适宜分布区和适生规律。基于中国 147 个城市 50 种市树分布现状, 使用最大熵 (MaxEnt) 模型研究 2070s 气候下市树适宜分布区变化, 并通过分布区与城市行政区域重合度分析市树未来适生程度, 为中国城市园林规划提供依据。结果表明: 中国常见市树共 50 种, 隶属 24 科 42 属, 其中槐 (*Styphnolobium japonicum*)、樟 (*Cinnamomum camphora*) 和银杏 (*Ginkgo biloba*) 应用最广, 65.6% 的城市选用乡土树种, 89.5% 的城市应用阔叶树; 气候变化下, 市树适生区移动方向复杂, 面积趋于收缩 (68%), 以红树 (*Rhizophora apiculata*) 和欧洲白榆 (*Ulmus laevis*) 变化最大; 未来市树适生性与其来源、城市区位相关, 乡土植物相较于外来种适生性高, 北方城市高适生市树比例较高, 而南方以低适生市树为主。未来应综合考虑, 因地制宜, 引导城市园林绿化高质量发展。

**关键词:** 市树; 气候变化; 最大熵模型; 物种分布区; 适生性

中图分类号:X171.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)02-0197-12

## Distribution and suitability of city trees in China under climate change

GU Jingxian, YANG Yongchuan, MOU Wenbo, JIN Cheng

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** City trees are an important part of urban landscaping and greening. In recent years, climate change has caused the migration of city trees, which affects the sustainable development of urban living environment. Therefore, it is urgent to understand the suitable distribution areas and habitats of city trees under climate change. Based on the distribution status of 50 species of city trees in 147 cities in China, we used the MaxEnt model to study the changes of suitable distribution zones of city trees under the climate of 2070s, and analyzed the future suitability of city trees through the overlap of distribution zones and urban administrative areas, so as to provide a basis for urban landscape planning in China. The results showed that: There are 50 common city

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 重庆英才计划“包干制”项目 (cstc2022ycjh-bgzxm0204); 重庆市技术创新与应用示范专项重点项目 (cstc2018jszx-zdyfxm X0007)

作者简介: 谷婧娴 (1998-), 女, 主要从事城市植物群落结构与动态研究, E-mail: gujingxian521@163.com。

杨永川 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ycyang@cqu.edu.cn。

Received: 2024-03-05

**Foundation items:** the “Lump-sum System” Project of Chongqing Talent Plan (No. cstc2022ycjh-bgzxm0204); Chongqing Technology Innovation and Application Demonstration Major Theme Special Project (No. cstc2018jszx-zdyfxmX0007)

**Author brief:** GU Jingxian (1998-), main research interests: structure and dynamics of urban plant communities, E-mail: gujingxian521@163.com.

YANG Yongchuan (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: ycyang@cqu.edu.cn.

trees in China, belonging to 24 families and 42 genera, among which *Styphnolobium japonicum*, *Cinnamomum camphora* and *Ginkgo biloba* are the most widely used, 65.6% of cities use native species, and 89.5% of cities use broadleaf trees; under climate change, the direction of movement of suitable areas for city trees is complex, and the area tends to contract (68%), with *Rhizophora apiculata* and *Ulmus laevis* showing the greatest changes; the future suitability of city trees is related to the source and urban location, and the suitability of native plants is higher to exotic species; the proportion of high suitability municipal trees is higher in northern cities, while low suitability city trees dominate in the south. In the future, comprehensive considerations should be made to guide the high-quality development of urban landscaping according to local conditions.

**Keywords:** city trees; climate change; MaxEnt model; species range; suitability

市树是城市森林建设和园林绿化的主要树种,象征着城市独特的精神风貌和文化底蕴,在美化城市景观、增加城市活力和提高城市知名度等方面有重要意义。评选市树是一种程序规范的政府行为<sup>[1]</sup>,其地域适应性、观赏性和文化特性等均为重要考虑因素。中国自1982年市树评选热潮兴起后,接连出台相关政策,1986年设立市树的城市数量达到顶峰,目前70%以上的城市已确立市树<sup>[2]</sup>。

在未来,全球气候将持续变暖,温室效应显著<sup>[3-4]</sup>。研究表明,城市树木对气候变化高度敏感<sup>[5-7]</sup>,其适宜分布区会随之移动、收缩、扩展或分裂<sup>[8]</sup>。因此,园林中选用市树等城市树木时必须考虑未来适应性,但中国许多城市在规划管理城市树木时仍基于当前气候,较少考虑气候变化下树种的分布区和适生性,从而导致城市生物多样性降低、热岛效应加剧和生态系统服务价值减弱等一系列更严重的环境问题<sup>[9-10]</sup>。因此,基于生物-气候关系,研究市树在气候变化下的适宜分布区和适生性,可为政府改善气候引起的环境问题及制定物种保护策略提供科学的参考依据,促进中国乃至全球资源可持续利用进程。

目前,对市树的研究主要集中于某个树种或城市的文化历史<sup>[11]</sup>和分布应用现状<sup>[1-2]</sup>等方面,对城市植物响应气候变化的研究也局限于城市某种或某类植物分布区的变化<sup>[12-15]</sup>,宏观尺度上缺乏对全国范围的市树在未来气候条件下适宜分布区的系统研究,对预测城市市树未来适生性以及评估目前市树政策合理性的研究更是少之又少。

通过整合全中国范围内城市市树的分布及气候变化数据,构建物种分布模型,评价未来气候变化下中国市树适宜分布区变化和适生规律。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域为中国的147个城市,这些城市均为

人口达100万且已确立市树的地级市或省级直辖市,包含23个省、5个自治区和4个直辖市,分布于中温带干旱区、中温带半干旱区等10个气候区内<sup>[16]</sup>。根据2022年中国统计年鉴(<http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>),主要城市年平均气温5.5~25.1℃,年平均相对湿度36%~81%,全年日照1 054.5~3 235.7 h,年降水量146.4~2 136.7 mm。同时,获取各气候区部分主要城市年平均气温、年平均相对湿度、全年日照时数和年降水量,见表1。

### 1.2 市树名录的获取

使用“市树”“市树确立”“XX市市树确立”等关键词访问各城市政府官方网站,搜索市树官方文件,以确定准确的城市市树名录。对于改选过市树的城市,以最新确定的市树为准,最终获取到50种市树名录,均属木本植物。罗列每种市树应用的具体城市并统计其数量,由于个别城市同时选用两种市树,因此,应用城市数量总和多于147个。

树种信息包括种名、拉丁学名、科、属、生活型、地理来源等,以Flora of China([www.iplant.cn/foc](http://www.iplant.cn/foc))为准(表2)。据FOC描述,树种来源分为3个类别。1)乡土树种:自然分布于城市所在省份的树种;2)省外树种:自然分布于中国除城市所在省份外的树种;3)国外树种:在中国境内无自然分布的树种。此外,将树种生活型分为4类:常绿阔叶树、常绿针叶树、落叶阔叶树和落叶针叶树。

### 1.3 现有分布数据收集与处理

基于Atlas of woody plants in china<sup>[17]</sup>、全球生物多样性信息平台(<https://www.gbif.org/>)和中国植物志(<http://www.iplant.cn/>)等数据库,获取50个树种在中国的自然分布数据(截至2022年底)。

为提高模型准确性,避免分布数据过于密集,造成冗杂,使用ArcGIS(v10.8.1)将树种分布范围切割为10 km×10 km的网格单元,每个网格仅保留一个数据点,剔除重复、没有位置信息或严重偏离研究区域的数据<sup>[18]</sup>,最终获得5 160个分布点的数据集。

表1 研究城市所处气候区及主要城市环境数据

Table1 Climatic zone of the cities and major urban environmental data

所处气候区	部分主要城市	年平均气温/℃	年平均相对湿度/%	全年日照/h	年降水量/mm
中温带干旱区	乌鲁木齐	8.4	52.0	2 634.0	258.6
	银川	11.3	48.0	2 717.5	146.4
中温带半干旱区	呼和浩特	7.7	49.0	2 734.3	390.7
	兰州	8.3	51.0	2 482.5	163.2
中温带半湿润区	长春	7.2	66.0	2 187.4	858.6
	吉林	7.19	72.0	209.4	784.3
暖温带半干旱区	太原	11.7	58.0	2 214.1	593.3
暖温带半湿润区	北京	13.6	56.0	2 285.0	686.5
	西安	15.5	62.0	1 908.9	1 006.6
高原温带半湿润区	拉萨	10.3	36.0	3 067.9	438.6
	西宁	6.6	53.0	2 426.7	454.3
北亚热带湿润区	武汉	17.9	78.0	1 572.9	1 205.8
	上海	18.1	77.0	2 051.1	1 386.3
中亚热带湿润区	重庆	19.5	76.0	1 054.5	1 216.2
	南昌	19.7	72.0	1 626.2	1 894.3
南亚热带湿润区	南宁	22.6	53.0	1 654.7	958.9
	福州	21.8	74.0	1 756.4	1 686.6
边缘热带湿润区	海口	25.1	81.0	1 942.6	1 909.2

表2 50种市树科、属、生活型、应用城市和树种来源

Table 2 50 city trees families, genera, life types, application cities and tree sources

序号	树种	科	属	生活型	应用城市	树种来源
1	槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	豆科 Fabaceae	槐属 <i>Styphnolobium</i>	落叶阔叶	蚌埠/兰州/邢台/张家口/安阳/西安/北京/太原/漯河/保定/新乡/天水/泰安/济宁/秦皇岛/潍坊/淮北/长治/石家庄/商丘/唐山/大同/淄博/邯郸/焦作/聊城/东营/武威/开封/宿迁/银川	乡土 省外
2	樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科 Lauraceae	樟属 <i>Camphora</i>	常绿阔叶	苏州/宁波/南昌/长沙/自贡/贵阳/金华/台州/绵阳/嘉兴/益阳/鄂州/芜湖/九江/安康/常德/十堰/株洲/龙岩/来宾/河池/安顺/抚州/广安/上饶/永州/达州/南充/杭州	乡土 省外
3	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	银杏科 Ginkgoaceae	银杏属 <i>Ginkgo</i>	落叶阔叶	平顶山/无锡 湖州/毕节 日照/淮北/徐州/临沂/连云港/扬州/泰州/盐城/荆州/信阳/成都/眉山	乡土 省外
4	垂柳 <i>Salix babylonica</i>	杨柳科 Salicaceae	柳属 <i>Salix</i>	落叶阔叶	济南/芜湖/扬州 吉林/西宁	乡土 省外
5	三球悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	悬铃木科 Platanaceae	悬铃木属 <i>Platanus</i>	落叶阔叶	淮南/上海/郑州/淄博/邯郸	国外
6	木樨 <i>Osmanthus fragrans</i>	木樨科 Oleaceae	木樨属 <i>Osmanthus</i>	常绿阔叶	遵义 汉中/宜春/六安	乡土 省外
7	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	落叶针叶	沈阳/呼和浩特/赤峰/秦皇岛	乡土
8	雪松 <i>Cedrus deodara</i>	松科 Pinaceae	雪松属 <i>Cedrus</i>	常绿针叶	南京/蚌埠/漯河/青岛	省外

续表2

序号	树种	科	属	生活型	应用城市	树种来源
9	白兰 <i>Michelia × alba</i>	木兰科 Magnoliaceae	含笑属 <i>Michelia</i>	常绿阔叶	肇庆/佛山/清远	国外
10	凤凰木 <i>Delonix regia</i>	豆科 Fabaceae	凤凰木属 <i>Delonix</i>	落叶针叶	厦门/中山/潮州	国外
11	荷花木兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	木兰科 Magnoliaceae	北美木兰属 <i>Magnolia</i>	常绿阔叶	常州/合肥/镇江	国外
12	黄葛树 <i>Ficus virens</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	落叶阔叶	达州/遂宁 重庆	乡土 省外
13	荔枝 <i>Litchi chinensis</i>	无患子科 Sapindaceae	荔枝属 <i>Litchi</i>	常绿阔叶	深圳/东莞/莆田	乡土
14	柰 <i>Koelreuteria paniculata</i>	无患子科 Sapindaceae	柰属 <i>Koelreuteria</i>	落叶阔叶	十堰/天门/宜宾	乡土
15	榕树 <i>Ficus macrocarpa</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	常绿阔叶	温州/福州	乡土
16	白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	木樨科 Oleaceae	梣属 <i>Fraxinus</i>	落叶阔叶	赣州 滨州/衡水	省外 乡土
17	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	木樨科 Oleaceae	女贞属 <i>Ligustrum</i>	常绿阔叶	襄阳/盐城	乡土
18	雅榕 <i>Ficus concinna</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	落叶阔叶	柳州 乐山	乡土 省外
19	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>	常绿阔叶	拉萨/榆林	乡土
20	枣 <i>Ziziphus jujuba</i>	鼠李科 Rhamnaceae	枣属 <i>Ziziphus</i>	落叶阔叶	枣庄/德州	乡土
21	玉兰 <i>Yulania denudata</i>	木兰科 Magnoliaceae	玉兰属 <i>Yulania</i>	落叶阔叶	潮州/玉林	省外
22	木瓜 <i>Pseudocydonia sinensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	木瓜属 <i>Pseudocydonia</i>	落叶阔叶	菏泽	乡土
23	巴山水青冈 <i>Fagus pashanica</i>	壳斗科 Fagaceae	水青冈属 <i>Fagus</i>	落叶阔叶	巴中	乡土
24	白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	常绿针叶	宝鸡	乡土
25	扁桃 <i>Mangifera persiciforma</i>	漆树科 Anacardiaceae	杧果属 <i>Mangifera</i>	常绿阔叶	南宁	乡土
26	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	柏科 Cupressaceae	侧柏属 <i>Platycladus</i>	常绿针叶	北京	乡土
27	刺桐 <i>Erythrina variegata</i>	豆科 Fabaceae	刺桐属 <i>Erythrina</i>	落叶阔叶	泉州	乡土
28	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 <i>Ilex</i>	常绿阔叶	仙桃	乡土
29	杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i>	杜英科 Elaeocarpaceae	杜英属 <i>Elaeocarpus</i>	常绿阔叶	岳阳	乡土
30	榧 <i>Torreya grandis</i>	红豆杉科 Taxaceae	榧属 <i>Torreya</i>	落叶阔叶	绍兴	乡土
31	合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	豆科 Fabaceae	合欢属 <i>Erythrina</i>	落叶阔叶	威海	乡土
32	榉树 <i>Zelkova serrata</i>	榆科 Ulmaceae	榉属 <i>Zelkova</i>	落叶阔叶	南通	乡土
33	蒲葵 <i>Livistona chinensis</i>	棕榈科 Arecaceae	蒲葵属 <i>Livistona</i>	常绿阔叶	江门	乡土
34	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	落叶阔叶	银川	乡土
35	水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	柏科 Cupressaceae	水杉属 <i>Metasequoia</i>	落叶针叶	武汉	乡土
36	望春玉兰 <i>Yulania biondii</i>	木兰科 Magnoliaceae	玉兰属 <i>Yulania</i>	落叶阔叶	南阳	乡土
37	洋紫荆 <i>Bauhinia variegata</i>	豆科 Fabaceae	羊蹄甲属 <i>Bauhinia</i>	落叶阔叶	珠海	乡土
38	椰子 <i>Cocos nucifera</i>	棕榈科 Arecaceae	椰子属 <i>Cocos</i>	落叶阔叶	海口	乡土

续表2

序号	树种	科	属	生活型	应用城市	树种来源
39	油樟 <i>Cinnamomum longepaniculatum</i>	樟科 Lauraceae	樟属 <i>Camphora</i>	常绿阔叶	宜宾	乡土
40	肉桂 <i>Cinnamomum cassia</i>	樟科 Lauraceae	樟属 <i>Camphora</i>	常绿阔叶	贵港	乡土
41	红树 <i>Rhizophora apiculata</i>	红树科 Rhizophoraceae	红树属 <i>Rhizophora</i>	落叶阔叶	深圳	乡土
42	龙柏 <i>Juniperus chinensis 'Kaizuka'</i>	柏科 Cupressaceae	刺柏属 <i>Juniperus</i>	常绿针叶	大连	省外
43	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	豆科 Fabaceae	紫荆属 <i>Cercis</i>	落叶阔叶	荆州	省外
44	云杉 <i>Picea asperata</i>	松科 Pinaceae	云杉属 <i>Picea</i>	常绿针叶	包头	省外
45	龙眼 <i>Dimocarpus longan</i>	无患子科 Sapindaceae	龙眼属 <i>Dimocarpus</i>	落叶阔叶	泸州	省外
46	黑松 <i>Pinus thunbergia</i>	松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	常绿针叶	长春	国外
47	糖槭 <i>Acer saccharum</i>	槭树科 Aceraceae	槭属 <i>Acer</i>	落叶阔叶	双鸭山	国外
48	欧洲白榆 <i>Ulmus laevis</i>	榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>	落叶阔叶	乌鲁木齐	国外
49	苹果 <i>Malus pumila</i>	蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	落叶阔叶	烟台	国外
50	柠檬 <i>Citrus × limon</i>	芸香科 Rutaceae	柑橘属 <i>Citrus</i>	常绿阔叶	资阳	国外

#### 1.4 气候变量数据的选择和处理

气候变量的数据来自全球气象数据库(<https://www.worldclim.org>)。选择分辨率为30弧秒(1 km×1 km的网格)的19个气候因子作为输入变量<sup>[19]</sup>(包含11个温度相关气候变量:年均温Bio1、平均昼夜温度Bio2、等温性Bio3、温度季节性Bio4、最热月最高温Bio5、最冷月最低温Bio6、年温度范围Bio7、最湿季均温Bio8、最干季均温Bio9、最热季均温Bio10、最冷季均温Bio11;8个降水相关气候变量:年均降水Bio12、最湿月降水Bio13、最干月降水Bio14、降水季节性Bio15、最湿季降水Bio16、最干季降水Bio17、最热季降水Bio18、最冷季降水Bio19)。到2070年大部分植物的适宜分布区和面积均会发生明显改变<sup>[20-22]</sup>,此研究的未来年份选择2070s。气体排放情景选择RCP 4.5,它是一个达到中等标准的预期排放量,预计2100年CO<sub>2</sub>浓度为542 μL/L。相比于其他气体排放情景,RCP 4.5通过对2100年至2150年的排放量进行线性调整,实现了2150年后气体浓度达到稳定水平的平稳过渡,以避免隐含的气体排放产生的不连续性,模拟结果可信度较高<sup>[23-25]</sup>。

#### 1.5 物种分布模型的建立

树种分布区预测基于物种分布模型中的最大熵(MaxEnt)模型完成。MaxEnt被广泛应用于物种分布区预测等领域,只需物种分布数据和环境信息便可提供高度可靠的预测结果<sup>[26-27]</sup>。将19个气候变量的贡献百分率(PC)模拟并排序后,进行Pearson

相关性分析,以避免各环境因子多重共线性使结果过度拟合。在发现两个气候变量间存在强相关性( $|r| \geq 0.8$ )时,仅保留PC值较高的变量<sup>[13]</sup>,以此综合筛选出建立各树种分布模型的最佳气候变量。

对MaxEnt设置随机抽取每组分布数据的25%作为模型测试数据集(Test data),剩余75%作为模型训练数据集(Training data)。设置最大迭代次数和最大背景值为10 000。采用刀切法(Jack-knife Test)建立分布模型,以逻辑斯蒂(Logistic)输出值表示分布率,用于后续可视化分析,其余参数保留默认值<sup>[28]</sup>。对于模拟结果,曲线下面积(AUC)越大,模型精度越高(1.0,精度完美;大于0.9,预测精度高;0.7~0.9,精度良好),10次重复建模后,取平均结果以减小随机误差。

#### 1.6 模型结果可视化

ArcGIS分析得到物种存在概率逻辑值P,其数值范围在0~1之间,数值越接近1,表示物种越有可能存在<sup>[29]</sup>。根据物种实际分布区,将适宜分布区划分为两类:非适宜生境( $P < 0.5$ )和适宜生境( $P \geq 0.5$ )。

为研究市树在2070s气候条件下的适宜分布区变化情况,使用ArcGIS中的平均中心工具(Mean center)确定每个树种当前和2070s适宜分布区质心的经纬度坐标,并使用点距离工具(Point distance)计算质心移动距离。同时,计算树种2070s适生区与各城市行政区域面积重合率<sup>[30]</sup>,以确定市树2070s气候下在各城市的适生性:以四分位数作为节点,将重合度划分为0%~25%、25%~50%、50%~

75% 和 75%~100% 四个类别, 分别表示 2070s 气候下市树在城市中低适生、中适生、较高适生和高适生 4 种程度。地理划分上, 以 800 mm 等降水量线为南北方分界线, 南方降水丰富, 为多水区, 北方降水少, 为少水区<sup>[31]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 中国城市市树应用情况

截至 2022 年底, 中国常见市树共 50 种, 涵盖 24 科 42 属(表 2)。其中, 豆科 Fabaceae、樟科 Lauraceae 和银杏科 Ginkgoaceae 应用最广, 分别占 23.8%、20.6% 和 8.8%; 树种中槐 (*Styphnolobium japonicum*)、樟

(*Cinnamomum camphora*) 和银杏 (*Ginkgo biloba*) 应用最多, 分别为 19.4%、19.4% 和 8.8%。北方城市最喜爱槐, 54.4% 的北方城市应用其为市树, 而南方应用樟最多, 城市占比 34.4%。

如图 1 所示, 数量方面, 树种重复率较高, 物种库较小, 平均 3.2 个城市选用同一树种, 绝大多数城市(87.8%)选用一种木本植物作为市树, 少数城市选用两种木本植物; 来源方面, 大部分城市选择乡土树种, 占比达 65.6%, 来源于省外和国外的市树仅占比 21.5% 和 11.7%; 生活型方面, 绝大多数城市(89.5%)应用阔叶树, 北方倾向落叶阔叶树(92.5%), 南方倾向常绿阔叶树(58.7%)。

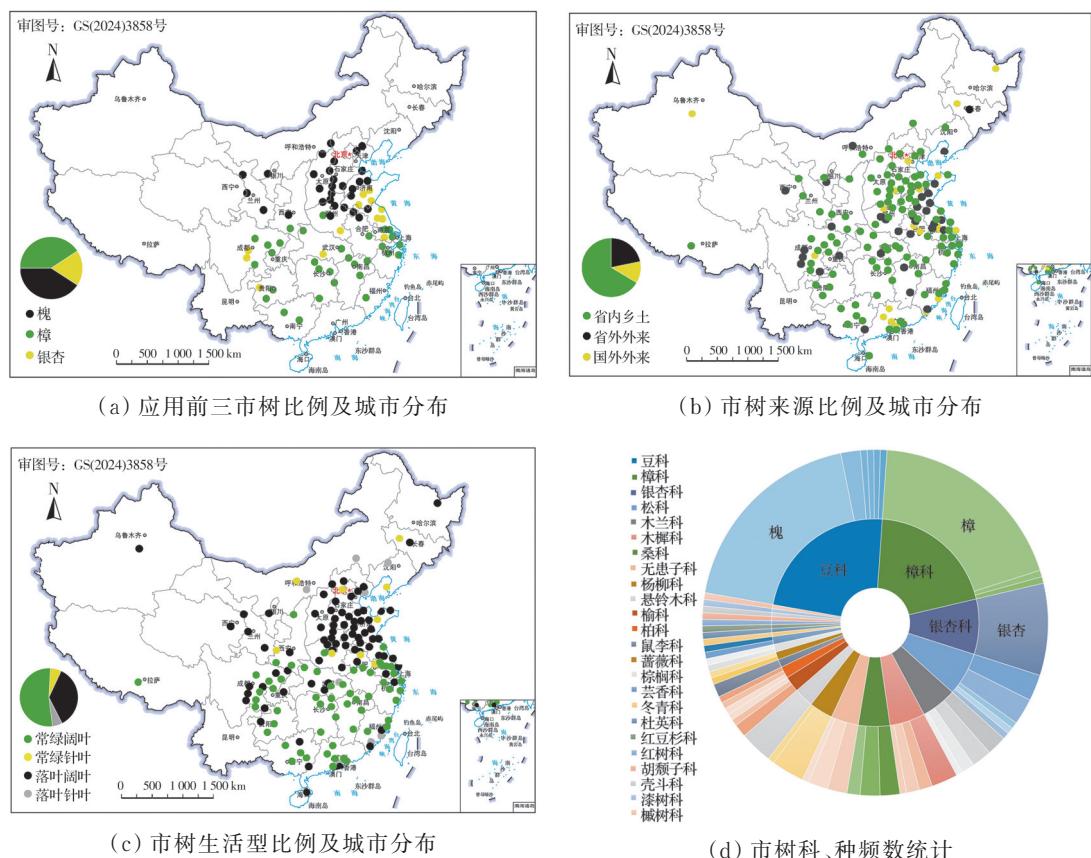


图 1 市树统计及城市分布

Fig. 1 Statistics of city trees and city distribution

### 2.2 树种适生区空间格局变化

2070s 气候条件下树种适生区的分布质心和面积均发生了变化, 且 AUC 值均大于 0.8, 具有高度可信性。

树种质心移动分为东北、东南、西北和西南 4 个方向, 距离差异较大: 15 个树种向东北移动 7.5~321.0 km, 11 个树种向西北移动 23.1~1 325.9 km, 12 个树种向东南移动 31.7~547.1 km, 12 个树种向西南移动 13.5~485.0 km, 分别占 30%、24%、22% 和 24%(表 3)。总体来看, 向高纬度方向的迁移占比偏多(52%), 欧洲白榆 (*U. laevis*) 和红树 (*R. apiculata*) 移动距离最长, 分别为 1 325.9、

547.1 km; 梓 (*K. paniculata*) 和榆树 (*U. pumila*) 移动距离最短, 分别为 7.5、13.5 km。

生活型比例图显示, 向高纬度方向移动的常绿种占比略高(53.8%), 向低纬度方向移动的落叶种占比略高(58.3%); 针叶树种均向西移动(图 2)。

此外, 各树种未来适生区面积也会发生不同程度的变化(图 3): 32% 的树种扩张 0.9%~57.9%, 68% 的树种收缩 1.4%~95.7%。其中红树 (*R. apiculata*) 和欧洲白榆 (*U. laevis*) 面积变化最大(收缩 95.7% 和 80.0%), 木樨 (*O. fragrans*) 和油松 (*P. tabuliformis*) 变化最小(扩张 0.9% 和 1.0%)。

表3 2070s气候下树种分布区质心移动方向和距离(与图2当前质心位置从上到下对应)

Table 3 Direction and distance of centroid movement under the 2070s climate (corresponding to the current centroid position in Fig. 2 from top to bottom)

树种	移动方向	移动距离/km	树种	移动方向	移动距离/km
白皮松 <i>P. bungeana</i>	东北	40.8	柠檬 <i>Citrus × limon</i>	西北	55.0
柰 <i>K. paniculata</i>	东北	7.5	沙枣 <i>E. angustifolia</i>	东南	164.4
云杉 <i>P. asperata</i>	东北	58.0	榉树 <i>Z. serrata</i>	东南	221.8
望春玉兰 <i>Y. biondii</i>	东北	59.3	糖槭 <i>A. saccharum</i>	东南	76.5
枣 <i>Z. jujuba</i>	东北	245.5	玉兰 <i>Y. denudata</i>	东南	87.4
银杏 <i>G. biloba</i>	东北	184.9	杜英 <i>E. decipiens</i>	东南	154.6
黑松 <i>P. thunbergia</i>	东北	218.2	黄葛树 <i>F. virens</i>	东南	125.4
女贞 <i>L. lucidum</i>	东北	188.1	雅榕 <i>F. concinna</i>	东南	275.6
巴山水青冈 <i>F. pashanica</i>	东北	40.8	红树 <i>R. apiculata</i>	东南	547.1
冬青 <i>I. chinensis</i>	东北	64.7	扁桃 <i>M. persiciforma</i>	东南	298.1
木樨 <i>O. fragrans</i>	东北	57.0	榕树 <i>F. macrocarpa</i>	东南	31.7
肉桂 <i>C. cassia</i>	东北	79.7	龙眼 <i>D. longan</i>	东南	41.2
洋紫荆 <i>B. variegata</i>	东北	117.4	荔枝 <i>L. chinensis</i>	东南	129.0
白兰 <i>Michelia × alba</i>	东北	321.0	榆树 <i>U. pumila</i>	西南	13.5
椰子 <i>C. nucifera</i>	东北	26.0	侧柏 <i>P. orientalis</i>	西南	52.2
欧洲白榆 <i>U. laevis</i>	西北	1 325.9	合欢 <i>A. julibrissin</i>	西南	52.0
油松 <i>P. tabuliformis</i>	西北	103.0	紫荆 <i>C. chinensis</i>	西南	26.5
白蜡树 <i>F. chinensis</i>	西北	50.7	木瓜 <i>P. sinensis</i>	西南	33.7
槐 <i>S. japonicum</i>	西北	81.9	榧 <i>T. grandis</i>	西南	98.1
垂柳 <i>S. babylonica</i>	西北	36.2	龙柏 <i>J. chinensis 'Kaizuca'</i>	西南	485.0
苹果 <i>M. pumila</i>	西北	348.7	樟 <i>C. camphora</i>	西南	87.2
油樟 <i>C. longepaniculatum</i>	西北	129.8	荷花木兰 <i>M. grandiflora</i>	西南	173.4
三球悬铃木 <i>P. orientalis</i>	西北	96.4	蒲葵 <i>L. chinensis</i>	西南	202.4
雪松 <i>C. deodara</i>	西北	160.7	凤凰木 <i>D. regia</i>	西南	114.9
水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	西北	23.1	刺桐 <i>E. variegata</i>	西南	144.2

## 2.3 市树未来适生性预测

147个城市中,市树未来适生性低和高的城市数量最多(43.8%和40.6%),市树为较高适生和中适生的城市数量较少(10.6%和5.0%)(图4(a))。

地理区位方面,在北方,市树为高适生的城市占比最多(50%),而南方高适生和低适生城市数量均衡,低适生城市数量占比稍大,分别为40%和43%(图4(b))。

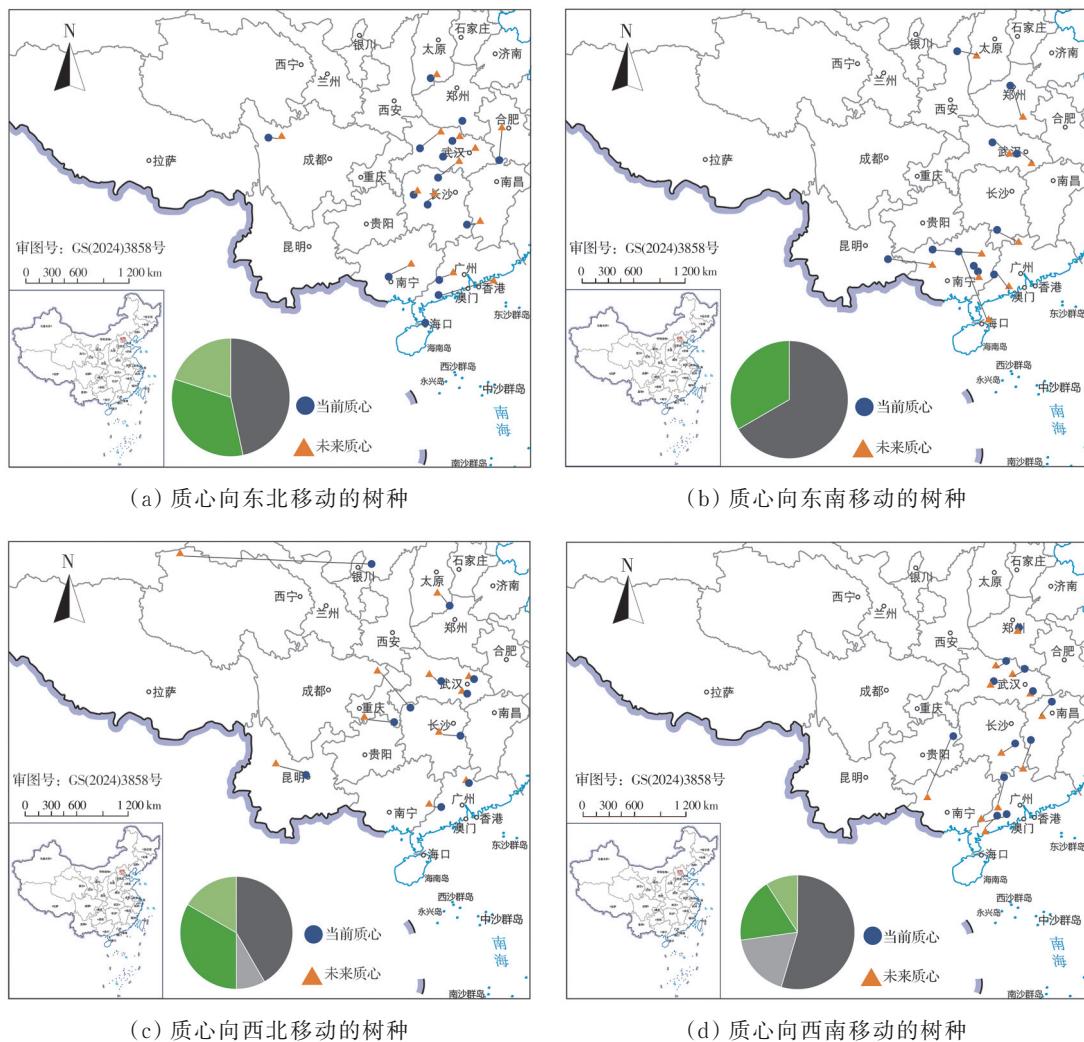
市树来自省内、省外和国外的比例在低适生城市中分别为46%、32%和22%;中适生城市中为75%、13%和12%;较高适生城市中分别为76%、12%和12%;高适生城市中为83%、14%和3%(图4(c))。

生活型方面,市树为低适生的城市中,市树为常绿阔叶、常绿针叶、落叶阔叶和落叶针叶分别占比36%、11%、47%和6%;中适生和较高适生城市市树只有阔叶种,常绿种和落叶种数量均衡;高适生城市市树中,常绿阔叶、常绿针叶、落叶阔叶和落叶针叶的比例分别为31%、3%、63%和4%(图4(d))。趋势为市树适生高的城市倾向选择落叶阔叶树,市树适生低的城市倾向选择常绿针叶树。

## 3 讨论和展望

### 3.1 中国城市市树应用和分布

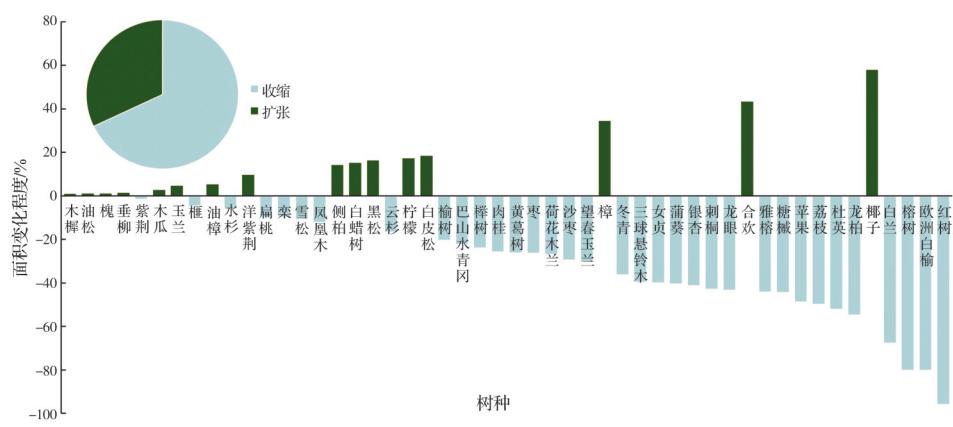
自中国开展市树评选以来,各城市高度重视绿化建设。尽管如此,到2022年底中国常见市树种类却仅有50种,这可能是园林树种规划滞后、城市特色挖掘不足或市民喜好相似等原因造成的。最常见市树为槐(*S. japonicum*)和樟(*C. camphora*),地域性较强。由于北方水文气候条件苛刻,可选种类相对较少,大多数城市选择适应性较强的落叶种。槐(*S. japonicum*)原产中国,外观美丽、花朵芳香、抗烟毒性能强<sup>[32]</sup>,成为北方城市的首选市树;南方温暖湿润,适合大部分树种生长,普遍选择常绿种,而樟(*C. camphora*)为广泛分布于长江以南地区的常绿树种,抗污染能力强,成为许多南方城市的首选,与郄光发等<sup>[1]</sup>的结论一致。此外,城市更偏爱地域特色树种,如巴中市选择巴中特有的珍稀树种巴山水青冈(*F. pashanica*);海口市选择在高温湿润、阳光充足的海边生长良好的椰子(*C. nucifera*)等,致



注:深绿、浅绿、深灰和浅灰分别表示生活型为常绿阔叶、常绿针叶、落叶阔叶和落叶针叶的树种。

图 2 2070s 气候下树种分布区质心变化方向和生活型比例

Fig.2 Direction of centroid change and proportion of life-types in the distribution area of city trees under the 2070s climates



注:正值为扩张,负值为收缩。

图 3 树种未来适生区面积变化频率和程度

Fig.3 Frequency and extent of change in the area of future habitat of city trees

力于打造城市专属名片,同时展现独有的城市文化自信。

生活型方面,由于自然环境限制和地域认同感,绝大部分城市仍选择乡土植物,这对保护当地

生物多样性及彰显地域植物景观特色具有重要意义<sup>[2]</sup>。城市区位方面,选择国外树种的城市通常分布在沿海地区,易引入外来种。

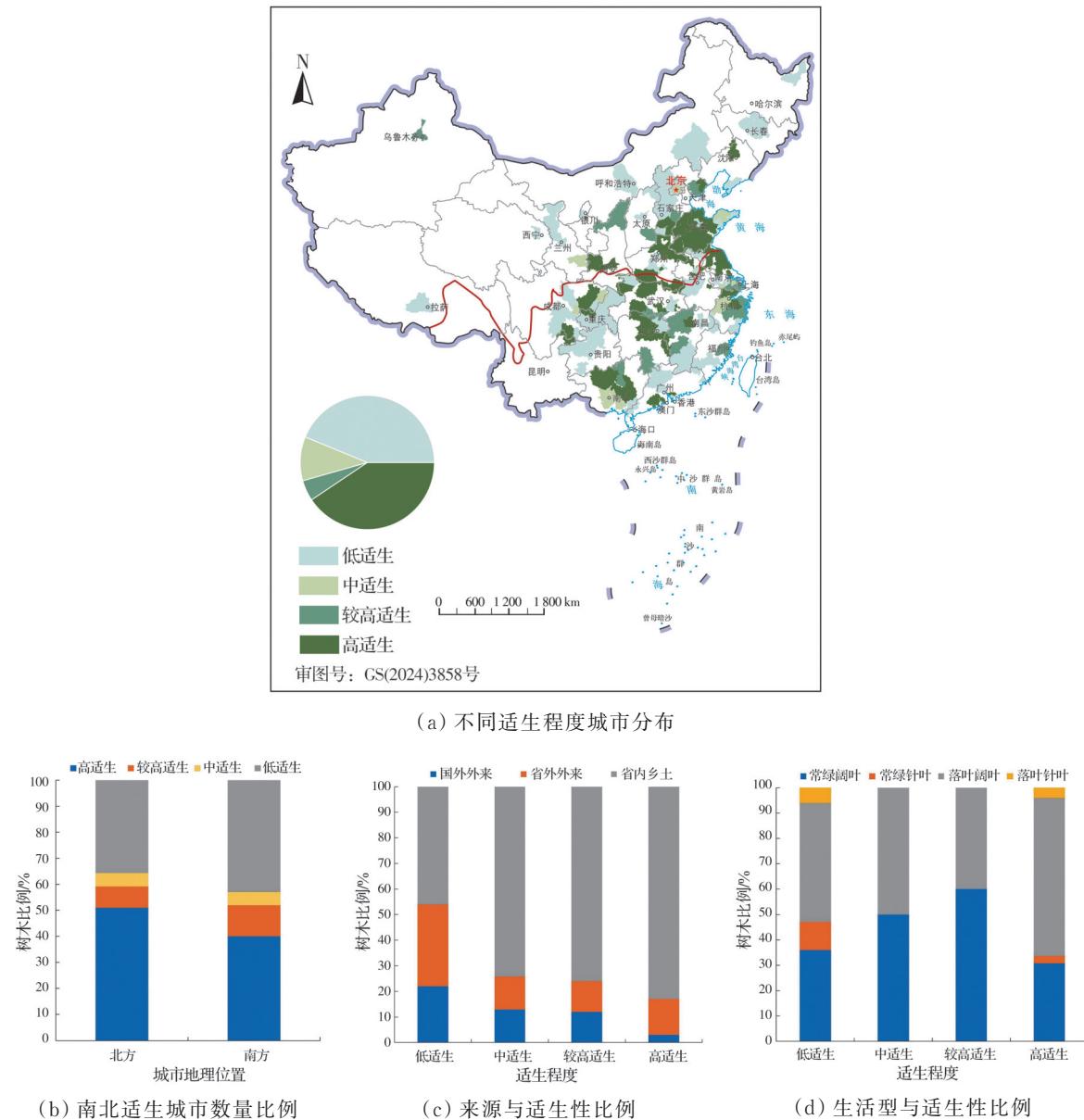


图4 未来气候下城市市树适生性及因素比例(红线为800 mm等降水量线)

Fig. 4 Comparison of city tree suitability and factors under future climate (red line is the 800 mm equivalent precipitation line)

### 3.2 未来气候下市树适生区变化

物种的地理分布与环境密切联系。一般来说,质心移动距离和方向会随时间而改变,并与MaxEnt模型预测的适生区空间格局变化一致<sup>[33]</sup>。气候是宏观尺度上决定植物地理分布最主要的因素<sup>[34]</sup>,有研究<sup>[35-37]</sup>提到,许多乔木和灌木类群未来潜在分布区可能发生巨大变化,分布区向高纬度地区迁移已在全球范围内被证实。在此基础上,笔者发现,树种分布区可能向所有方向移动,虽与Shafer等<sup>[38]</sup>的结论一致,但这一现象颇为少见。由于质心移动的相对性,树种分布区质心呈南迁迹象,可能是由于全球变暖加剧了北方干旱胁迫效应。意味着一些北方适宜区域可能无法提供新的适宜生境和生态位,从而促使树种向南移动,大多数情况下,

南向移动往往归因于地理异常<sup>[39]</sup>。当然,不同气候情景模拟可能会产生不同结果,甚至出现相反结论<sup>[15,22]</sup>。笔者基于RCP 4.5模拟,可能在其他情景下产生不同结果,这是值得注意的。此外,向高纬度方向移动的树种以常绿种为主,而向低纬度方向移动的树种通常为落叶种,这可能与不同生活型树种的适应性有关<sup>[40]</sup>。这些复杂的关系表明,物种分布与气候变化间并非单一性关系,除气候因素外,树种分布可能还会受人为干扰、土壤地理条件及树种本身系统发育特征等多方面因素影响<sup>[41]</sup>。

气候变化对物种分布的影响取决于变暖程度及物种敏感性和适应能力<sup>[42]</sup>,结果显示,红树(*R. apiculata*)和欧洲白榆(*U. laevis*)对气候变化最敏感,不仅面积衰退程度最严重,分布区质心移动距

离也最长。两者均有很强的地域特征,对环境要求严格。红树(*R. apiculata*)不耐阴不耐寒,通常生长在广东海滩和沼泽边<sup>[43]</sup>;欧洲白榆(*U. laevis*)原产地欧洲,在新疆生长良好。此外,研究结论与多数研究<sup>[44-45]</sup>一致的是,大部分市树未来适生区面积都将减少,呈现明显的生境丧失迹象,未来环境变化、人为影响及两者的相互作用都会加速木本植物灭绝<sup>[46]</sup>。研究明确了未来气候条件对市树分布区的负面影响,这是气候变化所带来的值得人们关注和重视的问题。

### 3.3 市树未来适生性及建议

全球变暖使市树适宜分布区发生变化,进而使其在各城市适生性产生相应改变。市树选定为主观决策,不同城市市树适生性因地理位置和气候条件的差异而各不相同。高适生市树所在城市应继续大力种植,有效改善当地生态环境。相反,适生性较低的市树则不宜广泛种植,以免造成城市园林规划的重大失误。

从来源看,市树未来适生性越高的城市乡土植物比例越高,省外和国外种比例则依次降低,表明选择本土植物可以让现存园林资源更顽强地应对未来气候变化所带来的风险<sup>[2]</sup>。因此,建议城市因地制宜,更多地考虑本土植物。这是一个浩大的工程,需要所有市民的配合,从苗圃产业将更多精力放在培育地方特有品种开始,园林景观设计人员更多使用本地树种,到公众接受更多关于本地树种的科普教育,以此逐渐提升大众对地方种的了解和认可度<sup>[47]</sup>。

从地理位置看,北方城市能选择的树种相对有限,优先选择乡土树种或在当地生长良好的树种,所以,高适生树主要在北方城市;而南方城市具有更丰富的水文气候条件,适合大多数树种生长,选择更加多样,不受限于乡土树种,南方的低适生城市数量偏多。因此,建议南方城市更应考虑适生性的问题,选择市树时充分展现城市生态文化多样性,考虑以确立双市树的方式,在保留原市树等城市标志性植物的基础上,增加可以应用于园林绿化的“适树”,既能丰富树种多样性,又能使园林资源最大化,有效应对气候变暖所带来的环境问题。

从树种生活型看,与未来低适生和中适生城市的落叶树种相比,较高适生和高适生城市中的落叶树种所占比例更高。因此,落叶种适应未来气候变化的能力强于常绿种,建议未来多考虑引种落叶阔叶树。根据中国植物志的描述,目前中国已经采取了相应的措施,例如槐(*S. japonicum*)现已在中国南北各省区广泛栽培等。

在城市树种选择上,未来落叶阔叶树和常绿阔

叶树分布区中心多向北移动,目前北方城市应用落叶阔叶树较多,因此建议处于温带的城市在继续栽植落叶阔叶树的同时,适当引入常绿阔叶树。根据中国植物志描述,近年来许多北方温带城市,如兰州、北京等已广泛栽植了荷花木兰(*M. grandiflora*)等常绿阔叶树,可见这些城市已为应对气候变化做出了科学的栽植决策。同时,未来向南移动的树种中落叶阔叶树占比超过 60%,建议亚热带和热带城市多栽培落叶阔叶树,以适应气候变化,如贵州、云南西部(腾冲)海拔 2 000 m 以下地带广泛栽培银杏(*G. biloba*)等。

## 4 结论

基于 MaxEnt 模型,模拟了当前和未来(2070s)在 RCP 4.5 浓度路径下市树的适宜分布区,并分析了市树在各城市的未来适生程度。

1) 中国常见市树共 50 种,隶属 24 科 42 属,槐、樟和银杏应用最广。大多数城市仍选用乡土树种,绝大部分城市应用阔叶树,南方通常选择常绿阔叶树,北方更倾向于落叶阔叶树。

2) 未来气候下,市树适生区质心会向各个方向移动,向高纬度移动的以常绿树种为主,向低纬度移动的以落叶树种为主;适生区面积主要趋于收缩,呈现明显的生境丧失现象,气候变化带来的环境问题需要高度重视。其中,红树(*R. apiculata*)和欧洲白榆(*U. laevis*)适生区受气候影响最大。

3) 市树未来适生性越高的城市乡土植物比例越高,省外和国外种比例依次降低。确立市树时,乡土树种是最佳选择,应在园林绿化产业中大力推广;市树适生高的城市倾向选择落叶阔叶树,市树适生低的城市倾向选择常绿针叶树;北方城市高适生市树比例较高,而南方以低适生市树为主,因此,在未来确立市树时,南方城市更需考虑适生性的问题。在树种的选择上,建议温带城市在种植落叶阔叶树的同时,适当引入常绿阔叶树,亚热带和热带城市多栽培落叶阔叶树。

## 参考文献

- [1] 郑光发,曹丽雯,刘宏明,等.我国城市市树选择应用现状及区域分布特征[J].林业科学,2019,55(10): 76-87.  
QIE G F, CAO L W, LIU H M, et al. Current situation and regional distribution of city-trees in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(10): 76-87. (in Chinese)
- [2] 罗以歆,南歆格,晏海,等.中国城市市树设立现状及发展沿革研究[J].中国园林,2023,39(12): 132-137.  
LUO Y X, NAN X G, YAN H, et al. Research on the current situation and historical evolution of city tree es-

- tabishment in China [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(12): 132-137. (in Chinese)
- [3] GALIZIA L F, BARBERO R, RODRIGUES M, et al. Global warming reshapes European pyroregions [J]. Earth's Future, 2023, 11(5): e2022EF003182.
- [4] SHIN S J, YEH S W, AN S I, et al. Southern ocean control of 2 °C global warming in climate models [J]. Earth's Future, 2023, 11(1): e2022EF003212.
- [5] KANE K, DEBINSKI D M, ANDERSON C, et al. Using regional climate projections to guide grassland community restoration in the face of climate change [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 730.
- [6] ESPERON-RODRIGUEZ M, TJOELKER M G, LENOIR J, et al. Climate change increases global risk to urban forests [J]. Nature Climate Change, 2022, 12: 950-955.
- [7] TANG L N, SHAO G F, GROFFMAN P M. Urban trees: How to maximize their benefits for humans and the environment [J]. Nature, 2024, 626: 261.
- [8] TAO Z X. Predicting the changes in suitable habitats for six common woody species in central Asia [J]. International Journal of Biometeorology, 2023, 67(1): 107-119.
- [9] HARRISON P A. Climate change and the suitability of local and non-local species for ecosystem restoration [J]. Ecological Management & Restoration, 2021, 22 (Sup2): 75-91.
- [10] LOCKE D H, HALL B, GROVE J M, et al. Residential housing segregation and urban tree canopy in 37 US Cities [J]. NPJ Urban Sustainability, 2021, 1: 15.
- [11] 王永. 郑州市市树法桐浅议[J]. 北方园艺, 2009(7): 208-210. WANG Y. Discussion about the city tree of Zhengzhou "platanus acerifolia" [J]. Northern Horticulture, 2009(7): 208-210. (in Chinese)
- [12] YAN X Y, WANG S C, DUAN Y, et al. Current and future distribution of the deciduous shrub *Hydrangea macrophylla* in China estimated by MaxEnt [J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(22): 16099-16112.
- [13] BHANDARI M S, MEENA R K, SHANKHWAR R, et al. Prediction mapping through MaxEnt modeling paves the way for the conservation of *Rhododendron arboreum* in Uttarakhand Himalayas [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48(3): 411-422.
- [14] LI Y C, LI M Y, LI C, et al. Optimized MaxEnt model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China [J]. Forests, 2020, 11(3): 302.
- [15] 杜倩, 魏晨辉, 梁陈涛, 等. 中国东北地区12个建群树种对气候变化响应的MaxEnt模型分析[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9712-9725.
- DU Q, WEI C H, LIANG C T, et al. Future climatic adaption of 12 dominant tree species in Northeast China under 3 climatic scenarios by using MaxEnt modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9712-9725. (in Chinese)
- [16] 丁一汇. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- DING Y H. Climate in China [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [17] FANG J Y, WANG Z H, TANG Z Y. Atlas of woody plants in China: Distribution and climate [M]. Springer Science & Business Media, 2011.
- [18] HUANG J H, LI G Q, LI J, et al. Projecting the range shifts in climatically suitable habitat for Chinese Sea buckthorn under climate change scenarios [J]. Forests, 2017, 9(1): 9.
- [19] NIX H A. A biogeographic analysis of Australian elapid snakes [J]. Atlas of elapid snakes of Australia, 1986, 7: 4-15.
- [20] BAI Y J, WEI X P, LI X Q. Distributional dynamics of a vulnerable species in response to past and future climate change: A window for conservation prospects [J]. PeerJ, 2018, 6: e4287.
- [21] 沈阳, 于晶, 郭水良. 不同气候变化情境下中国木灵藓属和蓑藓属植物的潜在分布格局[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6449-6459.
- SHEN Y, YU J, GUO S L. *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6449-6459. (in Chinese)
- [22] 张喜娟, 陈琛, 郁飞飞, 等. 中国东北兴安落叶松林空间分布及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1041-1049.
- ZHANG X J, CHEN C, GAO F F, et al. Spatial distribution of *Larix gmelinii* forests in Northeast China and its response to climate change [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(6): 1041-1049. (in Chinese)
- [23] DUFRESNE J L, FOUJOLS M A, DENIVIL S, et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5 [J]. Climate Dynamics, 2013, 40(9): 2123-2165.
- [24] MEINSHAUSEN M, SMITH S J, CALVIN K, et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 [J]. Climatic Change, 2011, 109(1): 213.
- [25] BUENO M L, PENNINGTON R T, DEXTER K G, et al. Effects of Quaternary climatic fluctuations on the distribution of Neotropical savanna tree species [J]. Ecography, 2017, 40(3): 403-414.
- [26] SANTANA P A Jr, KUMAR L, SILVA R SDA, et al. Assessing the impact of climate change on the worldwide distribution of *Dalbulus maidis* (DeLong) using MaxEnt [J]. Pest Management Science, 2019, 75 (10): 2706-2715.
- [27] NEWMAN J C, RIDDELL E A, WILLIAMS L A, et al. Integrating physiology into correlative models can al-

- ter projections of habitat suitability under climate change for a threatened amphibian [J]. *Ecography*, 2022, 2022(8): e06082.
- [28] TANG C Q, MATSUI T, OHASHI H, et al. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4488.
- [29] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测 [J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8556-8566.
- WANG R L, LI Q, FENG C H, et al. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8556-8566. (in Chinese)
- [30] 胡娟, 谢培根, 梅祎芸, 等. 浙江清凉峰国家级自然保护区黑麂和小麂潜在适宜栖息地预测及重叠性分析 [J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 2210-2219.
- HU J, XIE P G, MEI Y Y, et al. Potential suitable habitats prediction and overlap analysis of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) and small muntjac (*M. reevesi*) in Qingliangfeng National Nature Reserve, Zhejiang Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2210-2219. (in Chinese)
- [31] 陈志刚. 我国重要的等降水线 [J]. *中学地理教学参考*, 1987(5): 11.
- CHEN Z G. Important isoprecipitation line in China [J]. *Teaching Reference of Middle School Geography*, 1987(5): 11. (in Chinese)
- [32] HE X R, BAI Y J, ZHAO Z F, et al. Local and traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of *Sophora japonica L.*: A review [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2016, 187: 160-182.
- [33] 李艳红, 张立娟, 朱文博, 等. 全球变化背景下南方红豆杉地域分布变化 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 783-792.
- LI Y H, ZHANG L J, ZHU W B, et al. Changes of *Taxus chinensis var. mairei* habitat distribution under global climate change [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 783-792. (in Chinese)
- [34] 李贺, 张维康, 王国宏. 中国云杉林的地理分布与气候因子间的关系 [J]. *植物生态学报*, 2012, 36(5): 372-381.
- LI H, ZHANG W K, WANG G H. Relationship between climatic factors and geographical distribution of spruce forests in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(5): 372-381. (in Chinese)
- [35] LIU D T, CHEN J Y, SUN W B. Distributional responses to climate change of two maple species in Southern China [J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(9): e10490.
- [36] COLWELL R K, BREHM G, CARDELUS C L, et al. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics [J]. *Science*, 2008, 322(5899): 258-261.
- [37] RANA S K, RANA H K, STÖCKLIN J, et al. Global warming pushes the distribution range of the two alpine 'glasshouse' *Rheum* species north- and upwards in the Eastern Himalayas and the Hengduan Mountains [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 925296.
- [38] SHAFER S L, BARTLEIN P J, THOMPSON R S. Potential changes in the distributions of western North America tree and shrub taxa under future climate scenarios [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(3): 200-215.
- [39] SOJA A J, TCHEBAKOVA N M, FRENCH N H F, et al. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(3/4): 274-296.
- [40] PIPER F I, FAJARDO A. Foliar habit, tolerance to defoliation and their link to carbon and nitrogen storage [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(5): 1101-1111.
- [41] BOULANGEAT I, LAVERGNE S, VAN ES J, et al. Niche breadth, rarity and ecological characteristics within a regional flora spanning large environmental gradients [J]. *Journal of Biogeography*, 2012, 39(1): 204-214.
- [42] WILLIAMS S E, SHOO L P, ISAAC J L, et al. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change [J]. *PLoS Biology*, 2008, 6(12): 2621-2626.
- [43] PENG S, LIU Y, LYU T, et al. Towards an understanding of the latitudinal patterns in thermal tolerance and vulnerability of woody plants under climate warming [J]. *Ecography*, 2021, 44(12): 1797-1807.
- [44] ALIPOUR S, WALAS Ł. The influence of climate and population density on *Buxus hyrcana* potential distribution and habitat connectivity [J]. *Journal of Plant Research*, 2023, 136(4): 501-514.
- [45] 李慧, 滕皎, 殷晓洁, 等. 不同气候环境的中国珍稀濒危樟属乔木适生分布区模拟预测 [J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(2): 43-53.
- LI H, TENG J, YIN X J, et al. Simulation prediction of suitable distribution area of rare and endangered species of *Cinnamomum* in China under different climatic environment [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(2): 43-53. (in Chinese)
- [46] ZHANG M G, ZHOU Z K, CHEN W Y, et al. Major declines of woody plant species ranges under climate change in Yunnan, China [J]. *Diversity and Distributions*, 2014, 20(4): 405-415.
- [47] 靳程, 胡四维, 胡远东, 等. 不同地理尺度下中国城市绿化树种多样性的均质化特征 [J]. *风景园林*, 2022, 29(1): 53-58.
- JIN C, HU S W, HU Y D, et al. Homogeneous characteristics of urban landscape woody plants species biodiversity in China under different geographical scales [J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(1): 53-58. (in Chinese)