基于 ARBOTOM 断层仪的校园树木健康程度检测*

于 博 谢璐迪 胡一博 阿依祖克兰木·阿吾提江 杨雅琴
赛菲娅·阿德尔 玉米提·哈力克

新疆大学生态与环境学院/绿洲生态教育部重点实验室 乌鲁木齐 830017

摘要：园林树木作为城市绿地系统的重要组分，其健康程度直接反映城市环境质量。文章利用 ARBOTOM 树木断层仪对新疆大学红湖校园内 76 株乔木进行树干空腐检测，分析不同种类、不同生长区域和不同径级树木的健康状况及影响因素，旨在为城市园林树木健康程度评估和保护提供理论依据与方法支撑。结果表明：1）被检测的 76 株树木分别属于 4 科、5 属、7 种，其树干平均空腐比例为 8.18%、疏松比例为 57.71%、健康比例为 34.11%；2）不同种类树木空腐比例差异较大，其中垂枝榆和旱柳树干空腐比例较高，分别高达 13.09%和 12.42%，不同生长区域树木空腐比例为 3.14%～11.25%；3）树干空腐比例与胸径之间呈显著负相关关系（$P<0.01$），且与树高、冠幅和枝下高之间几乎无明显相关关系。总体而言，校园树木空腐程度整体较轻，但边缘疏松、腐朽问题严峻。最后，针对树木的健康状况提出对应的措施。

关键词：校园树木；树木健康评价；ARBOTOM 树木断层检测仪；树干空腐
DOI：10.12169/zgcsly.2022.08.28.0003

Detection of Campus Tree Health with ARBOTOM Tree Tomography

Yu Bo Xie Ludi Hu Yibo Ayzukra·Awutjan Yang Yaqin Safiya·Adil Ümut·Halik
(College of Ecology and Environment, Key Laboratory of Ministry of Education for Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: Landscaping trees are the important component of urban green spaces, and their health status directly reflects the quality of urban environment. In this paper, the ARBOTOM tree tomography is used to detect the cavity and decay of 76 trees in the Honghu campus of Xinjiang University and analyze the health status of trees in different species groups, habitats and diameter classes and their influencing factors, with the aim to provide a theoretical basis and methodological support for the assessment and protection of the health of landscaping trees. The results show that: 1) The tested 76 trees belong to 7 species in 5 genera of 4 families. The average proportion of trees with trunk cavity, trees with rotten trunk and health trees is 8.18%, 57.71% and 34.11%, respectively; 2) There are significant differences in the proportion of trees with trunk cavity among different species. The trunk cavity rates of *Ulmus pumila* cv. *pendula* and *Salix matsudana* are among the highest, reaching 13.09 % and 12.42%, respectively. The proportion of trees with trunk cavity at different habitats on the campus ranges from 3.14% to 11.25%; and 3) There is a significant negative correlation between trunk cavity rate and DBH value ($P<0.01$), and there is no significant correlation between trunk cavity rate and tree height, crown diameter and under branches heights. Trunk cavity and decay of campus trees are relatively less, but the sapwood part suffers serious cavity and decay. It is therefore suggested that the targeted measures should be taken to strengthen the

收稿日期：2022-08-28
* 基金项目：新疆维吾尔自治区区域协同创新专项上合组织科技伙伴计划及国际科技合作项目（2023E01026）；新疆大学 2021 年大学生创新训练计划项目（S202110755071）；国家自然科学基金面上项目（31770750）
第一作者：于博（2001-），男，硕士生，研究方向为城市生态学。E-mail：yubo209@163.com
通信作者：玉米提·哈力克（1966-），男，博士，教授，研究方向为生态系统生态学。Email：halik@xju.edu.cn

daily management and protection of campus trees in the future.

Keywords: campus tree; tree health assessment; ARBOTOM tree tomography; trunk cavity and decay

城市森林是城市生态系统重要组成部分，在改善城市人居环境和提高居民福祉方面发挥重要作用[1]。园林树木不仅提供降温、净化空气、固碳释氧、水源涵养等生态系统调节服务，其文化服务扩展到精神休养和生态文明领域[2]。然而，伴随城市化进程加快，人为干扰加剧并缺乏合理养护，阻碍城市树木正常生长，甚至导致衰退或死亡[3]。校园树木作为校园绿地的载体，具有很高的景观、生态、人文和科研价值，查清树木健康状况有利于校园绿化策略的优化以及生态景观格局的构建。

无损检测最初应用于树木力学性能检测和古建筑木结构的维修[4-5]，因其非损坏性和互容性等优势，部分学者利用无损检测技术评估活立木健康，并取得了重要成果[6-7]。然而，树木无损检测技术多用于城市古树名木、公园及道路绿化树木清查工作中[8-9]，校园树木的研究主要集中在资源保护、景观评价及物种多样性领域[10-12]，树干空腐方面少见报道。新疆大学红湖校区位于乌鲁木齐市南部，极端干旱与水资源短缺导致树木生境恶劣、树势衰弱、存活率低等问题[13]，加之人为干扰强烈、管护不当，树木生长良莠不齐，树枝损伤、树瘤、寄生、树干损伤、树冠缺失等现象频发。校园树木健康状况，不同种类、地点及径级树木的树干材质状况，校园树木养护方法等科学问题未见报道。因此，本文利用 ARBOTOM 应力波无损检测技术，对新疆大学红湖校区内 76 株树木展开树干空腐检测，评估其健康状况，以期为新疆大学校园树木健康保护及乌鲁木齐城市生态文明建设提供理论依据和数据支撑。

1　研究区概况

乌鲁木齐市（86°37′—88°58′ E，42°45′—45°00′ N）位于我国西北干旱区，属中温带大陆性干旱气候，四季分明，气候干燥，蒸发强烈，年均气温 6.4 ℃，年均降水量 280 mm，潜在蒸发量高达 2 830 mm。建城区绿地面积 3.32×10^4 hm^2，绿化覆盖率达 41.97%，2013 年荣获“国家园林城市”称号[14]。新疆大学红湖校区位于乌鲁木齐市天山区，校园面积 5.75×10^5 m^2。校园内共有植物 42 科 97 属 121 种，主要有白榆、复叶槭、白蜡树、柳树、箭杆杨等。灌溉用水短缺是制约园林树木健康的主要因素。

2　研究方法

2.1　样木选择

在红湖校区不同地点共选取不同种类和径级的 76 株园林树木进行树干空腐检测，同时用测高仪、胸径尺和皮尺，测量每株树木的树高、胸径、冠幅和枝下高（表 1）。76 株树木属于 4 科、5 属、7 种，分别为白蜡树、白榆、垂柳、垂枝榆、复叶槭、旱柳和箭杆杨，调查区域有教学区、生活区和休闲区。由于 ARBOTOM 树木断层仪两个相邻传感探头的距离要求不少于 15 cm，胸径过小会降低结果的准确度，76 株样木基本为中龄或老龄树木，胸径都大于 20 cm（对胸径偏小的幼龄树木没有进行树干空腐检测）。样木径级分类为：胸径≤20 cm 为 1 级，胸径 21~40 cm 为 2 级，胸径 41~60 cm 为 3 级，胸径>60 cm 为 4 级[15]。

表 1　新疆大学红湖校区 7 种树木基本信息

树种	生长地点	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	平均枝下高/m
白蜡树（*Fraxinus chinensis*）	行道树	16.1±1.67	28.3±1.26	7.5±0.40	3.8±1.79
白榆（*Ulmus pumila*）	散生	17.4±2.82	40.6±6.84	9.6±2.27	2.6±0.86
垂柳（*Salix babylonica*）	湖边、路旁	18.6±1.69	40±3	5.2±0.15	4.8±0.61
垂枝榆（*Ulmus pumila* cv. Pendula）	行道树、散生	8.9±1.19	23.6±2.21	4.8±0.45	2.7±0.53
复叶槭（*Acer negundo*）	行道树	16.3±2.67	36.2±7.39	8.3±2.25	3±1.24
旱柳（*Salix matsudana*）	湖边、散生	14.6±3.66	35.7±8.5	7.3±1.82	3.2±0.76
箭杆杨（*Populus nigra* var. *thevestina*）	湖边、路旁	23.8±3.42	60±10.05	8.7±2.39	5.9±1.52

2.2 树干空腐检测

利用 ARBOTOM 树木断层仪检测树干内部空腐程度的原理是：通过脉冲锤敲击样木在树干内生成应力波，在疏松或空腐部位，应力波传播速度将变缓，因此根据应力波通过树干内部的时间判定木材的腐朽程度，生成二维图像，并选择不同颜色标识木材内部健康状况。本文选择红色、黄色和绿色分别表示树干空腐、疏松和健康部分。

具体测量步骤为：首先在离地面 1.3 m 处树干正北方向敲入第一枚钢钉，用皮尺测量样木胸围，确定所需传感器个数；然后顺时针方向每 15 cm 间距均匀固定若干个传感器，用数据线将传感器互连，并与应力波测试仪和笔记本电脑相连接；最后启动测试仪和 ARBOTOM 软件，设置相应参数，用脉冲锤从 1 号开始分别轻敲每一个传感器，为减少人为误差，每个传感器轻敲 8~10 次后，将数据存盘[16]。

将 ARBOTOM V2 软件生成的原始二维图像加载至 Matlab 2018b 中，并对其进行树干空腐、疏松和健康比例分类，并将树干空腐划分为 4 个等级（表 2）[17]。

表 2 树干空腐划分等级标准

等级	空腐率/%	空腐状态	主要表现
1	[0，1)	无空腐	树干截面木质部健康，密度大且坚硬，没有树干断裂风险
2	[1，25)	轻度空腐	树干截面区域基本健康，几乎没有树干断裂风险
3	[25，50)	中度空腐	树干有较大腐烂或空腐、有倒伏、断裂可能
4	[50，100)	重度空腐	树干腐朽区域面积大，极易发生倒伏或者断裂

2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行统计整理，使用 IBM SPSS 25 软件进行相关性分析，野外检测、数理分析及制图均在 ARBOTOM V2、Matlab 2018b 和 Origin 2018 软件支持下完成。

3 结果与分析

3.1 树干空腐状况

根据 76 株样木分析结果：大部分树木健康状况良好，有 39 株空腐比例<1%，有 14 株空腐比例为 1%~10%，树干空腐比例在 20%以上的树木仅有 13 株；分布在教学区和生活区的部分树木树干空腐比例高达 53.01%、50.24%和 48.48%等；箭杆杨的树干健康状况明显优于其他树种。76 株样木平均空腐比例为 8.18%，平均疏松比例为 57.71%，平均健康比例为 34.11%。

根据被测样木的空腐比例对其进行定级：89.48%的树木其树干空腐比例在 25%以下，属无空腐（51.32%）和轻度空腐（38.16%）；10.52%的树木空腐等级为中度（7.89%）和重度（2.63%），它们的空腐比例在 25 %以上，最高达 53.01%。

3.2 树干空腐树种的生长区域差异

不同树种树干空腐检测数据如表 3 所示：不同树种树干空腐、疏松和健康比例均差别不大；同一树种树干空腐比例，垂枝榆、旱柳、白蜡树和复叶槭的空腐比例较高，而箭杆杨、白榆和垂柳的空腐比例较低且基本无差别。其中垂枝榆空腐比例最高，为 13.09%；旱柳次之，为 12.42%；白蜡树、复叶槭的空腐比例>10%，分别为 11.59%和 10.53%；箭杆杨、白榆和垂柳的空腐比例<5%，分别为 3.98%、3.66%和 2.03%。树

表 3 不同树种树干空腐、疏松、健康比例

树种	树干空腐比例/%	树干疏松比例/%	树干健康比例/%	株树	株树占比/%
白蜡树	11.59	50.78	37.63	5	6.58
白榆	3.66	61.27	35.07	10	13.16
垂柳	2.03	60.29	37.68	4	5.26
垂枝榆	13.09	59.80	27.11	5	6.58
复叶槭	10.53	65.50	23.97	15	19.74
旱柳	12.42	54.88	32.70	21	27.63
箭杆杨	3.98	51.43	44.59	16	21.05

干疏松比例较高的树种有复叶槭和白榆，分别为 65.50%和 61.27%。15 株复叶槭中，13 株疏松比例>50%，最高达 90.73%；10 株白榆中，8 株疏松比例>50%，最高达 89.67%。箭杆杨、垂柳和白蜡树的健康比例最高，分别为 44.59%、37.68%和 37.63%，16 株箭杆杨中，8 株健康比例>50%，最高达 89.91%；5 株垂枝榆健康比例>40%。复叶槭的健康比例最低，为 23.97%，15 株复叶槭中，有 8 株健康比例<20%。

依据不同立地条件、人为干扰程度、水源条件等影响因素，结合校园内树木生长状况，探究不同生长区域的树木树干空腐差异，结果如图 1A 所示：不同生长地点树木空腐比例差异较大，生活区的家属院树木空腐比例最高，为 11.25%；教学区的研究生院树木空腐比例次之为 10.62%；最低为休闲区的红湖边和操场旁的树木，分别为 3.78%和 3.14%。调查的 20 株休闲区树木中，有 16 株空腐比例<1%，整体差异性不大；生活区（新源市场）树干的疏松比例最高，为 65.82%，调查的 12 株树木中，10 株疏松比例>50%，最高达 89.67%。休闲区红湖边的树木疏松比例最低，为 50.32%，调查 14 株树木中，有 6 株疏松比例<50%，最低为 10.08%；其他区域树木疏松比例为 50%～60%。红湖边树木的健康比例最高，为 45.89 %，调查 14 株树木中，8 株健康比例>40%，最高达 89.91%；其次为操场（36.93%），有 2/3 的操场树木健康比例>40%，最高达 79.49%；新源市场树木健康比例最低，为 23.61%；仅有 1/6 的树木健康比例>40%，最小至 2.84%；其余区域树木健康比例在 30%左右。

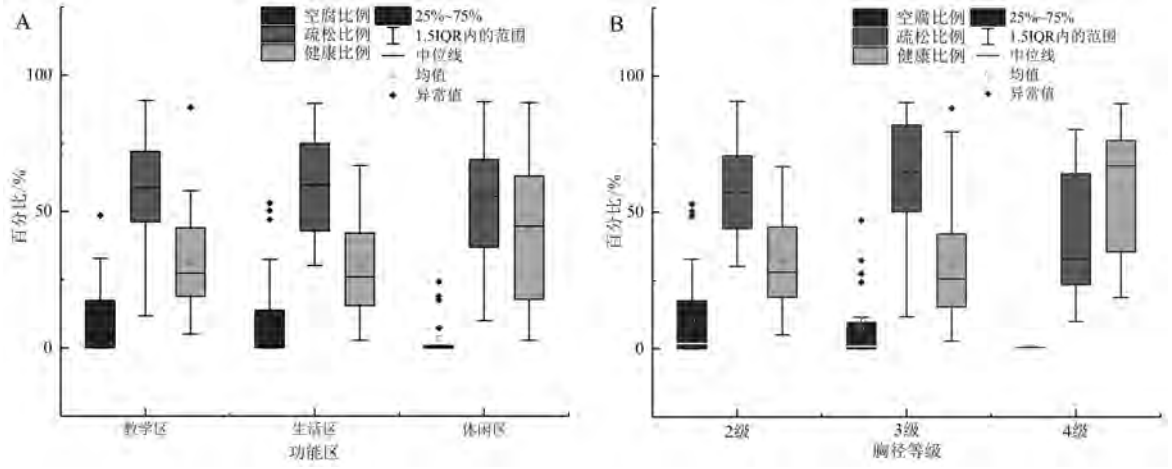


图 1　不同功能区（A）和不同胸径等级（B）树干空腐、疏松及健康面积的占比差异

3.3　树干空腐的胸径差异及影响因素

由于树龄难以直接测量，而胸径与树龄之间存在正相关关系，通常用胸径级表征树木的大致年龄。因此，我们选择不同径级树木，探究其树干空腐差异，结果如图 1B 所示：2 级树木的树干空腐比例最高，为 10.55%，调查的 44 株 2 级树木，17 株空腐比例>20%，最高达 53.01%；4 级树木的空腐比例最低，为 0.19%，所调查的 7 株空腐比例均<1 %。3 级树木树干疏松比例最高，为 62.13%，所调查的 25 株 3 级树木中，有 19 株疏松比例>50%，最高达 89.67%；4 级树木树干疏松比例最低，为 40.79%，其中有 5 株疏松比例<50%，最小为 10.08%。4 级树木的健康比例最高，为 59.02%，其中有 5 株健康比例>50%，最高达 89.91%；2、3 级树木的健康比例分别为 32.05%和 30.45%。

根据 Matlab 2018b 软件分析结果，使用 SPSS 软件对树木空腐、疏松和健康比例与树高、胸径、冠幅、枝下高之间做相关性分析，结果如表 4 所示：树木空腐比例与胸径关系密切；树干疏松比例与树高、胸径、冠幅、枝下高之间的相关性均不强；树木健康比例与树高和枝下高相关性较强。因此，与树干空腐比例相关性最强的是胸径。

图 2 显示：胸径为 30～40 cm 或冠幅为 4～8 m 的树木，树干空腐现象更为突出，达 53.01%；而胸径>50 cm 或冠幅>10 m 树木空腐比例普遍偏低，说明其树干木质部健康，密度较大，树干断裂风险较低。

表 4 树干空腐、疏松和健康比例与树高、胸径、冠幅、枝下高之间皮尔逊相关系数

项目	树高	胸径	冠幅	枝下高	空腐比例	疏松比例	健康比例
树高	1	0.596**	0.352**	0.464**	−0.307**	−0.139	0.330**
胸径		1	0.402**	0.253*	−0.344**	−0.071	0.291*
冠幅			1	−0.003	−0.280*	0.003	0.180
枝下高				1	−0.123	−0.250*	0.314*
空腐比例					1	−0.247*	−0.420**
疏松比例						1	−0.775**
健康比例							1

注：** 在 0.01 级别（双尾），相关性显著；* 在 0.05 级别（双尾），相关性显著。

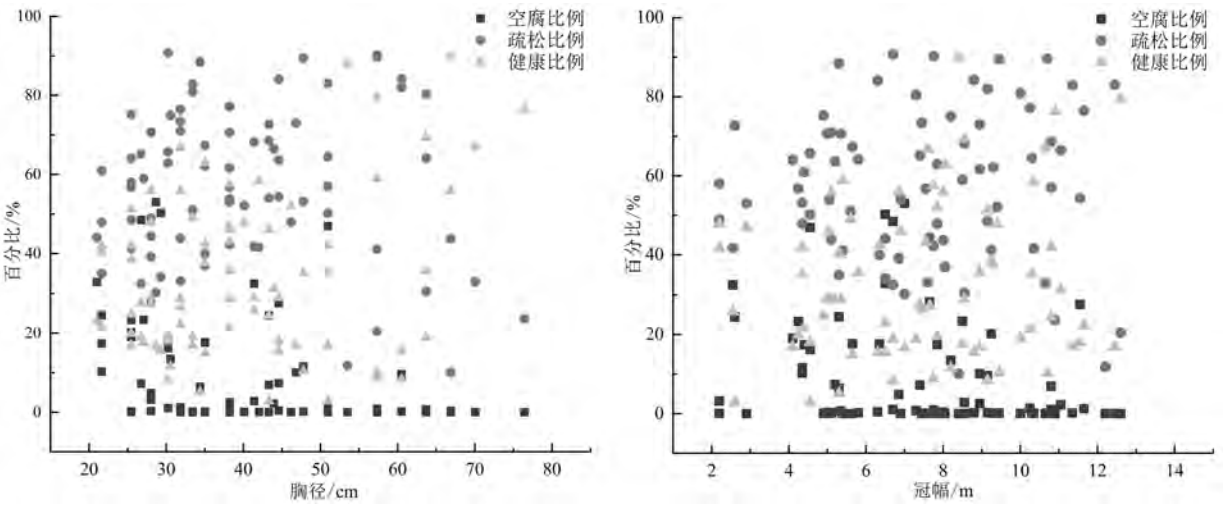


图 2 树木空腐、疏松、健康比例与胸径、冠幅散点示意

4 讨论

本文研究结果显示：1）在调查的 76 株树木中，39 株空腐比例<1%，14 株空腐比例为 1%～10%，空腐比例在 20%以上仅有 13 株；2）树干平均空腐比例为 8.18%，平均疏松比例 57.71%，平均健康比例 34.11%，不同树种及生长区域树木空腐比例差异不大，其中垂枝榆和旱柳空腐比例最高；不同生长区域树木空腐比例为 3.14%～11.25%；3）树干空腐比例与胸径之间呈现显著负相关关系（$P<0.01$），且与树高、冠幅和枝下高之间几乎无明显相关性。

不同树种空腐比例差异不大，可能是由于校园中土壤理化性质、生境条件以及人工管护措施基本相似，导致其差异较小。而部分相同树种空腐比例出现明显差异，主要是其处于不同的功能区所导致的，如分布在教学区生地楼和研究生院等人流量较高区域的部分白蜡树、垂枝榆和复叶槭已出现明显空腐，且生活区的家属院有 2 株旱柳的空腐比例>50%，导致均值变大。这可能是高频次的踩踏导致土壤紧实，根系对于水分、养分吸收受限；同时密集的人为干扰对树干、枝叶、根系生长影响剧烈，加之因树种差异导致的病虫害问题，致使部分树木出现肉眼可见的明显空腐，且树干倾斜严重，枝叶密度低，树势衰弱濒临死亡，亟待学校园林部门采取相应管护措施。此外，与树干空腐比例相关性最强的是胸径，这一结果与严斌[18]、陈水莲等[19]研究结果相似，究其原因是由于胸径的大小与树龄密切相关，树木胸径越大，心材发生腐烂的可能性越高。但同时树木胸径与树干空腐率成反比，这又与前人研究结果不符[17,20]，主要是由于此次野外检测工作受疫情管控的影响，调查范围有限，样本量较少，代表性不高，且此次调查所选择的高径级树木均为生长在休闲区的箭杆杨，那里水源充沛、管护条件良好，病虫害较少，可能是其空腐比例较低的主要原因。

5　结论和建议

针对新疆大学红湖校区内不同种类、不同生长地点和不同径级/龄级的 76 株树木进行树干空腐程度的定量监测发现，校园园林树木空腐程度整体较轻，但边缘疏松、腐朽问题严峻，树木胸径与树干空腐比例有明显的相关性。九成树木呈现无空腐及轻度空腐状态，树干空腐等级多为 1 和 2 级，其木质部健康，密度较大且坚硬，基本没有树干断裂的风险；仅 1/10 的树木为中度和重度空腐，其等级为 3 和 4，树干出现明显空腐，需采取不同养护措施。

因此，在今后的校园树木日常管护中，对于出现明显空腐、倾斜或树势衰弱的树木应建立长期监管机制，实时监测其健康状况；对于树干明显疏松的树木应加强预防措施，尽量避免树干折断，树木倒伏；对于无空腐或轻度空腐树木应加强日常养护，防治病虫害及人为干扰，合理添加水肥，及时疏松土壤，修剪树冠，预防树干腐朽的发生或加剧；对于中度空腐树木，应做好树体支撑，保证树木基本形态，防止树木因中空而倒伏折断，及时修剪枯枝、病枝，并做好消毒和防腐处理，避免雨水或真菌造成树木腐烂；对于重度空腐的树木需建档监测其生长状况和健康风险，对于肉眼可见的明显空腐树木，应采取人工填充、药物修复、树干支撑等方法及时修复，延缓其腐朽速率。

参考文献

[1]王成.中国城市森林建设范围与研究尺度[J].中国城市林业，2021,19(4):1-5.

[2]JIAO M,XUE H R,YAN J L,et al.Tree abundance,diversity and their driving and indicative factors in Beijing's residential areas[J].Ecological Indicators,2021,125:107462.

[3]孙雅辉,梦莉,侯冰飞.城市森林生态风险及应对策略[J].中国城市林业,2018,16(5):72-75.

[4]QIN R Y,QIU Q W,LAM J H M,et al.Health assessment oftree trunk by using acoustic-laser technique and sonic tomography[J].Wood Science and Technology,2018,52(4):1113-1132.

[5]刘丰禄,张厚江,姜芳,等.人工林活立木材质应力波无损检测研究进展[J].林业机械与木工设备,2015,43(3):8-12.

[6]安源.基于应力波的木材缺陷二维成像技术研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013.

[7]郭旺.永陵树木生长状况无损检测与评估方法研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[8]陈赛赛,李祉宣,张明娟.国内外古树研究进展[J].中国城市林业,2022,20(3):147-152.

[9]康越程.基于 TRU 树木雷达对黄陵古侧柏空腐规律研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.

[10]张凤麟.浙江西天目山古树健康状况及其随海拔梯度变化规律[D].上海:华东师范大学,2019.

[11]曾拓.基于 AHP 法与 SBE 法的湖南大学校园植物景观评价研究[D].长沙:湖南大学,2019.

[12]贺迎春.晋中市城区绿化树木健康评价[J].中国城市林业,2020,18(6):136-140.

[13]王成.全域森林城市建设的基本内涵、必要性、可行性和实施路径[J].中国城市林业,2023,21(5):1-8.

[14]乌鲁木齐统计年鉴委员会.乌鲁木齐统计年鉴 2019[M].北京:中国统计出版社,2019.

[15]邵鹏.北京城市核心区国槐行道树健康评价研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[16]林文树,杨慧敏,王立海.超声波与应力波在木材内部缺陷检测中的对比研究[J].林业科技,2005,30(2):39-41.

[17]孙明巡.上海主要古树树干腐烂状况检测研究[J].安徽农业科学,2012,40(17):9367-9369,9502.

[18]严斌.陕西关中古国槐空腐现状及其根系分布调查[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.

[19]陈水莲,梁远楠,周莹,等.降香黄檀心材与树龄关系研究[J].南方农业,2016,10(4):43-45.

[20]田凌鸿.天水市伏羲庙古侧柏健康无损伤诊断与评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.