

网络版城市园林植物的生态效益计算系统（v2.0）

一、前言

城市作为政治、经济、科技文化的中心，其环境的优劣直接关系到现代化建设和经济的发展，直接关系到人民物质文化生活水平的提高，在城市环境问题日益受到人们重视的今天，随着城市园林绿化建设的发展，其园林植物在改善碳氧平衡、降温增湿、滞尘减菌等生态效益方面对城市环境的改善作用也日益受到人们的关注。准确的园林植物生态效益定量评估结果已成为城市环境质量优劣的重要参考依据。同时，园林绿化与大量的经济投入密不可分，科学地进行园林植物生态效益的定量经济价值估算，对于推动园林绿化事业的发展，增加建设资金投入的决心，具有重要意义。

为快速准确进行园林植物的生态效益计算，北京市园林绿化科学研究院，在“八五”科技攻关专题“北京城市园林绿化生态效益的研究”（1992 年-1996 年）、园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室开放课题“北京园林绿地生态效益评估模型的深化研究”（2019 年）、“北京城市园林绿地生态环境效益估算方法常态化”（2020 年）、北京市科委项目“北方地区城市背景下多尺度绿化生态效益评价体系的研究及建立”（2018 年-2022 年）、北京市科委项目“北京通州区生态绿化城市建设关键技术集成研究”（2017 年-2019 年）等课题的支持下，基于 Visual studio 下的 C#编程语言，进行了“城市园林植物的生态效益计算”的网络版开发与不断升级，通过该系统，目前可实现城市园林植物固碳、释放氧气、吸热降温等共计 10 项生态效益与春季日致敏花粉浓度的定量计算，还参考目前有关生态效益的定价测算方法，可定量估算其中 7 项生态效益的经济价值。

具体的生态效益计算与经济定价方法、春季日致敏花粉浓度的定量计算方法请参考附录。

二、运行环境

网页浏览器：建议使用 IE9.0、360 安全浏览器 12.0 或更高版本。

其它软件：需安装 Microsoft Excel 2000 或更高版本。

三、功能及使用说明

1、首页简介

从首页上，可以了解本系统可以实现的主要功能，然后，点击首页上顶端的“计算平台”或右侧的“开始计算”（图1）按钮，以计算用户或参数管理用户（用户名与密码需要通过联系 xiejunfei@126.com 获取）登录后，即可以调出本系统的计算平台，从而可完成植物生态效益和由此间接产生的经济价值计算。



图1 首页

2、位置信息输入

在“计算平台”页面上部，输入拟进行计算的样地名称与样地面积，并选择样地类型与所在城市，所在城市默认为北京，城市一旦确定，属于该城市的园林植物类型、植物种类、相关生态功能参数则自动被调用。在该计算平台中，目前北京已包含约 60 余种园林植物的相关参数可供调用去计算生态效益。

3、环境信息输入

在“计算平台”页面中，需要输入样地植物规格调查期间的年平均气温、年降雨量、年平均 PM2.5 浓度，用于调整计算参数。

4、植物规格输入

在“计算平台”页面中，首先在对应下拉框中，选择“植物类型”、“植物名称”、“叶面积计算方式”，并根据“叶面积计算方式”所需要的植物规格要求，在相应的规格输入框中输入数字（也只能输入数字），需要注意的是，灰色的输入框表示不能输入。此处的胸径是指树木离地 1.3 米处主干直径，冠幅则为南北方向宽度和东西方向宽度的平均值。

所有植物规格输入完成后，将形成记录汇总（红色方框圈定处，图 2），如果数据输入有误，还可进行相应的修改或记录删除操作。

城市园林植物的生态效益计算
Calculation of Ecological Benefits of Urban Garden Plants

首页计算平台参数管理帮助

位置

样地名称样地面积(公顷)样地类型公园绿地所在城市北京市

环境

年均气温(摄氏度)13.6年均雨量(毫米)546.6年均PM2.5浓度(微克/立方米)51

植物规格输入

植物类型乔木植物名称旱柳叶面积计算方式一元数量(株)20胸径(厘米)25株高(米)冠幅(米)所占面积(平方米)保存

计算选择(必选一项)

☒固碳☒释放氧气☒吸收降尘☒滞留PM2.5☒吸收二氧化碳☒雨水截留☒夏季最大雨水吸收能力☒夏季遮荫能力☒夏季UVB屏蔽能力☒春季日均花粉浓度

经济价格

固碳(元/吨)273释放氧气(元/吨)1200吸收降尘用电(元/度)0.5滞留PM2.5(元/吨)150吸收二氧化碳(元/吨)1200雨水截留(元/吨)50

数据计算(关闭页面前,请先导出表格数据,避免数据丢失)

植物类型	植物名称	输入方式	数量(株)	胸径(厘米)	株高(米)	冠幅(米)	所占面积(平方米)	删除
乔木	白蜡	一元	10	20	0	0	0	删除
乔木	白皮松	一元	10	15	0	0	0	删除
乔木	黄樟	一元	10	25	0	0	0	删除
乔木	国槐	一元	20	25	0	0	0	删除
乔木	旱柳	一元	20	25	0	0	0	删除

共5条 上一页1下一页 50条/页 1页 确定

导入导出

计算

友情链接: 北京市园林绿化科学研究院北京市园林绿化局北京市公园管理中心北京市科学技术委员会中国风景园林学会

图3 数据保存

6、数据运算

在进行数据运算前，可在如下图4界面右侧中（红色方框圈定处），选择各项生态效益进行定量计算，默认状态为全选，也可以选择部分项进行计算；另外，其对应的经济价格为系统默认设定，也可根据当地的实际情况，进行价格修改（只能输入数字）。随后点击“计算”即可进行运算。值得补充的是，还可点击网页顶部上的“计算平台”按钮再建立一个新的计算平台。

计算结果

样地名称

计算日期

2023-12-18

所在区域

北京市

样地类型

公园绿地

简要结果:

乔木总叶片面积 (平方米) : 16751.8

详细结果 (xls)

详细结果 (页面)

1、年固定二氧化碳量 (千克/年) : 7554.1407
年固定二氧化碳产生的经济效益 (万元/年) : 0.2062

2、年释放氧气 (千克/年) : 27471.5587
年释放氧气产生的经济效益 (万元/年) : 3.2966

3、年吸热降温量 (千卡/年) : 941501610.0198
年吸热降温产生的经济效益 (万元/年) : 3.0366

4、年滞尘量 (千克/年) : 443.5171
年滞尘产生的经济效益 (万元/年) : 0.0067

5、年滞留PM2.5 (千克/年) : 86.0913
年滞留PM2.5产生的经济效益 (万元/年) : 0.0013

6、年吸收二氧化硫量 (千克/年) : 68.3212
年吸收二氧化硫产生的经济效益 (万元/年) : 0.0082

7、雨水截留量 (千克/年) : 0
雨水截留产生的经济效益 (万元/年) : 0

8、夏季最大雨水吸收能力 (千克) : 521.9067

9、夏季遮荫能力(百分比): 84.01

10、夏季UVB屏蔽能力(百分比): 80.1171

11、春季日致敏花粉浓度(粒/立方米): 0

图 5 计算结果保存

8、参数编辑或删除

在上图 1 所示的主界面中，点击“参数管理”按钮，如已登录的用户具有参数管理权限，则会出现具体的参数管理平台（图 6），在该平台中，可以通过拖动页面底端的浏览条至最右段，可以对植物类型、植物种类、生态效益参数进行编辑或删除操作。

需要补充说明的是，计算用户只能使用运算功能，不具有参数管理权限，仅参数管理用户才同时具有运算与参数管理权限。参数管理用户的用户名

与密码需要通过联系 xiejunfei@126.com 获取。

城市园林植物的生态效益计算

Calculation of Ecological Benefits of Urban Garden Plants

首页

计算平台

参数管理

帮助

admin

北京市

添加植物类型

添加种类

数据列表

菜单树	测定年份	二元胸径系数	二元株高系数	二元冠幅系数	二元常数	一元胸径系数	一元株高系数	一元冠幅系数	一元常数	草本常数	年吸收二氧化碳	年释放氧气能	小时吸收二氧化碳	年蒸腾能力(kg)
1 乔木														
2 白蜡	2018	1.26	74	0	-212.6	23.89	0	0	-197.6	0	1447.96	1053.06	1.21	327.51
3 白皮松	2018	10.46	49.58	0	-173.91	17.23	0	0	-51.51	0	1482.17	1077.94	1.24	310.64
4 侧柏	2018	5.14	1.28	0	-2.1	5.58	0	0	-20.11	0	2092.88	1522.09	1.76	256.92
5 臭椿	2018	9.98	18.89	0	-113.74	14.57	0	0	-101.43	0	1854.15	1348.47	1.56	259.19
6 垂柳	2018	7.43	21.97	0	-72.38	12.07	0	0	-65.21	0	1596.86	1161.35	1.34	321.69
7 刺槐	2018	20.48	50.79	0	-267.88	25.61	0	0	-102.42	0	2265.09	1647.34	1.9	342.21
8 杜仲	2022	9.77	23.15	0	-82.31	13.56	0	0	-61.87	0	1830.18	1331.04	1.54	309.84
9 国槐	2018	9.77	23.15	0	-82.31	13.56	0	0	-61.87	0	1830.18	1331.04	1.54	309.84
10 旱柳	2022	9.12	-14.03	0	24.26	7.32	0	0	2.48	0	1554.19	1130.32	1.3	267.52
11 华山松	2018	10.46	49.58	0	-173.91	17.23	0	0	-51.51	0	1482.17	1077.94	1.24	310.64
12 桧柏	2018	11.65	-7.5	0	-18.73	10.37	0	0	-52.28	0	2092.88	1522.09	1.76	256.92
13 栎树	2018	4.88	44.89	0	-94.26	13.6	0	0	-62.87	0	2031.87	1477.72	1.7	258.86
14 马褂木	2022	3.46	40.38	0	-36.18	11.57	0	0	5.1	0	2092.87	1522.08	1.76	292.92
15 馒头柳	2018	9.12	-14.03	0	24.26	7.32	0	0	2.48	0	1554.19	1130.32	1.3	267.52
16 毛白杨	2018	10.01	0	0	-64.18	10.01	0	0	-64.18	0	1266.12	920.82	1.06	114.38
17 泡桐	2018	3.46	40.38	0	-36.18	11.57	0	0	5.1	0	2092.87	1522.08	1.76	292.92
18 榉树	2022	9.98	18.89	0	-113.74	14.57	0	0	-101.43	0	1854.15	1348.47	1.56	259.19
19 桑树	2022	9.55	-7.93	0	5.83	5.91	0	0	-16.58	0	2215.71	1528.63	1.86	80.97
20 榉树	2022	9.98	18.89	0	-113.74	14.57	0	0	-101.43	0	1854.15	1348.47	1.56	259.19
21 悬铃木	2018	14.12	45.26	0	-160.19	22.48	0	0	-38.48	0	874.71	636.15	0.73	187.11
22 雪松	2018	11.65	-7.5	0	-18.73	10.37	0	0	-52.28	0	1730.92	1258.84	1.45	253.86
23 银杏	2018	8.8	18.93	0	-123.02	11.42	0	0	-79.84	0	703.37	511.54	0.59	183.82
24 油松	2018	-0.42	37.17	0	-34.74	3	0	0	57.5	0	1730.92	1258.84	1.45	253.86
25 榆树	2022	9.77	23.15	0	-82.31	13.56	0	0	-61.87	0	1830.18	1331.04	1.54	309.84
26 玉兰	2018	28.47	-16.27	0	-182.96	22.84	0	0	-195.18	0	641.05	466.22	0.54	172.96
27 元宝枫	2018	9.55	-7.93	0	5.83	5.91	0	0	-16.58	0	2215.71	1528.63	1.86	80.97
28 紫叶李	2018	18.28	9.15	0	-176.07	20.29	0	0	-153.21	0	2023.09	1471.34	1.7	247.96
29 灌木														
50 草本														

友情链接：[北京市园林绿化科学研究院](#) [北京市园林绿化局](#) [北京市公园管理中心](#) [北京市科学技术委员会](#) [中国风景园林学会](#)

图 6 参数管理平台

9、添加新的植物种类与生态效益参数

该估算系统为共享开放平台，除系统开发者外，其他用户也可以通过联系 xiejunfei@126.com 获取参数管理权限，从而进入参数管理平台（图 6，

红色方框圈定处)，通过“添加植物类型”、“添加种类”按钮，可加入各城市中新的园林植物种类（含新的生态效益参数）参与计算，添加完后，如果不出现新的植物种类等信息，可通过刷新页面解决。

附录

1. 基于叶面积的园林植物固碳、释放氧气、吸热降温等 6 种生态效益的定量计算方法

考虑到城市园林植物的生态效益定量计算结果，既是客观阐明绿化在改善城市生态环境中的作用，同时还是进行准确经济价值计算的关键数据，通常，生态效益定量计算主要通过园林植物个体的叶面积回归模型和叶片生态功能两部分耦合完成^[1-5]。另外，为全面了解园林植物对社会的经济贡献，本研究采用等效途径所需的经济投入，进行园林植物生态效益的经济价值估算。

1.1 建立园林植物个体的叶面积回归方程

园林植物个体是园林绿地生态效益的“生产者”，而园林植物个体发挥其生态效益的主要器官是其叶片，因此准确获取其叶片的总叶面积——即绿量，是定量计算园林植物个体生态效益的基础。鉴于绿量在研究绿化生态效益方面的重要性，本项目对北京常见种园林植物株个体绿量和相应的胸径等规格进行了大量的实地测定，并根据统计学方法，建立了计算不同植株个体的叶面积回归方程，即输入植物的胸径规格，就可以计算得到单株树总的叶片面积，需要补充的是，对于常见园林草本（含地被）植物，则通过其叶面积指数与占地面积的乘积得到总叶面积。

1.2 单位叶面积（ m^2 ）日固定 CO_2 、释放 O_2 量计算

单位叶面积（ m^2 ）日固定 CO_2 量可以通过植物的净同化量（指昼光合量减去夜呼吸量的差数，在此，仅考虑叶片自养呼吸消耗）计算得到。在各测试树种的光合作用曲线图中，其净同化量则是由光合作用速率曲线和时间横轴围合的面积，如图 1 所示。

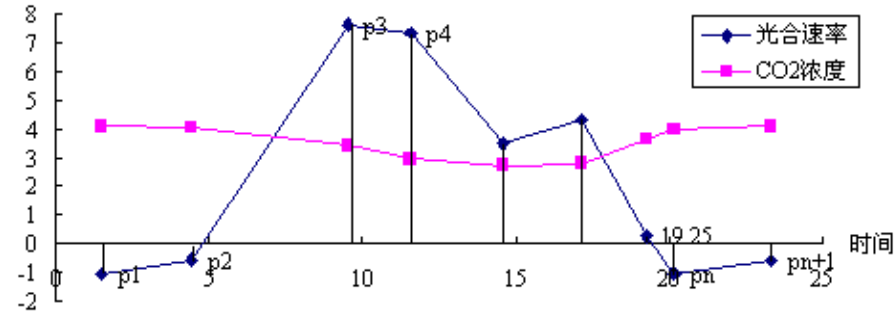


图 1 光合作用日同化量计算示意

利用简单积分法，各种园林植物在测定日的净同化量的公式为：

$$P = \sum_{i=1}^j [(p_{i+1} + p_i) / 2 * (t_{i+1} - t_i) * 3.6] \quad 【1】$$

式中：P 为该植物在该测定日的净同化量 (m mol)； p_i 为初测点的叶片瞬时净光合速率， p_{i+1} 为下一测点的叶片瞬时净光合速率 ($\mu \text{ mol/s.m}^2$)； t_i 为初测点的测试时间， t_{i+1} 为下一测点的时间 (hr)；j 为测试次数。其中，瞬时光合作用速率可通过便携式光合仪测定得到，每隔 2 小时测定一次，在每次测定过程中，各植物均随机选择 7 株，然后对每株植物，在不同位置选择 7 个叶片进行测定，最后取平均值。最终，在获得日固定值的基础上，通过累加，可以得到季节或年的 CO_2 固定值，另外，通过 C 元素在 CO_2 中的质量分数，还可以换算成固碳值。

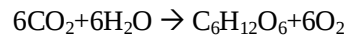
需要补充的是，该研究也可用昼间各测定参数和夜间的参数，分别计算该植物在测定日的昼光合量 P_d 、暗呼吸量 P_n 。则

$$P = P_d - P_n \quad 【2】$$

换算为测试全天吸收二氧化碳的重量为：

$$W_{\text{CO}_2} = P * 44 \quad 【3】$$

式中的 44 为二氧化碳的摩尔质量， W_{CO_2} 为单位面积的叶片一昼夜吸收 CO_2 的重量 ($\text{mg/m}^2.\text{d}$)。同理，根据光合作用的反应方程：



可计算出该测定日该植物释放氧气的重量为:

$$W_{O_2}=P*32$$

1.3 单位叶面积 (m²) 日蒸腾水分和吸热量计算

各测试植物单位叶面积 (m²) 的日蒸腾总量即是由蒸腾作用速率曲线和时间横轴围合的面积, 设蒸腾总量为 E:

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_{i+1} + e_i) / 2 * (t_{i+1} - t_i) * 3.6] \quad 【1】$$

式中: E 为该植物在该测定日的蒸腾总量 (m mol); e_i 为初测点的瞬时蒸腾作用速率, e_{i+1} 为下一测点的瞬时蒸腾作用速率, 单位每平方米每秒.微摩尔(u mol/s.m²); t_i 为初测点的测试时间, t_{i+1} 为下一测点的时间 (hr); j 为测试次数。其中, 瞬时蒸腾作用速率可通过便携式光合仪测定得到, 建议每隔 2 小时测定一次, 在每次测定过程中, 各植物均应随机选择 7 株, 然后对每株植物, 在不同位置选择 7 个叶片进行测定, 最后取平均值。

换算为测试全天释放水的重量为

$$W_{H_2O}=E*18 \quad 【2】$$

式中的 18 为水的摩尔质量。

液态的水经过植物的蒸腾作用以气态形式散发到环境空气中, 从环境中吸收热量。设植物每平方米叶片在一天中因蒸腾作用散失水分而吸收的热量为 Q, 则:

$$Q=W*L \quad 【3】$$

式中 Q 为单位叶面积每日吸收的热量, 单位是:每平方米.每日.卡(K/m².d); W 为植物日蒸腾总量,单位每平方米.克; L 为蒸发耗热系数(L=597-0.57*t, t 为温度)。由此可计算出各测试植物在测定日吸收热量的值。

1.4 单位叶面积 (m^2) 日滞尘 (滞留 $\text{PM}_{2.5}$) 量计算

由于植物叶片表面特性和本身的湿润性, 园林植物可以起到一定的滞尘作用。一般认为, 15 mm 的降雨量就可以冲掉植物叶片的降尘, 然后重新滞尘。根据北京市的降雨特点, 选择多个雨后, 对选好的树种依据其自身特点从上、下不同高度各采集叶片 5 片, 每种植物选择生长状况良好的 7 株个体作为重复, 乔木的下层采样高度约为 150 cm (低矮枝条), 乔木的上层采样高度距下层纵向高度差距在 150 cm 以上, 灌木的下层采样高度约为 10 cm, 灌木的上层采样高度距下层纵向高度差距在 40 cm 以上, 叶片采集时选择叶面朝上生长的成熟健康叶片, 采集植物面向道路一侧的叶片, 并同时立即将叶片封存于干净保鲜盒中以防挤压或叶毛被破坏。

然后在实验室, 对叶片用蒸馏水浸泡 2 小时以浸洗掉附着物, 并用不掉毛的软毛刷刷掉叶片上残留的附着物, 最后用镊子将叶片小心夹出; 浸洗液用已烘干称重(W_1)的滤纸抽滤, 将滤纸于 80°C 下烘 24 小时, 再以万分之一天平称重(W_2), 两次重量之差即为采集样品上所附着的降尘颗粒物重量。

随后, 将夹出的叶片晾干后用叶面积仪求算叶面积 A , 通过 $(W_2 - W_1)/A$ 的计算即可得到滞尘树种的单位叶面积的滞尘能力 (g m^{-2})。最终根据滞尘时间, 推导出单位叶面积日滞尘量。

在此基础上, 利用 Arc GIS 等地理信息系统软件对电镜图像进行处理, 提取出叶面颗粒物的体积-粒度分布, 可以推算出单位叶面积日滞留细颗粒物 (空气动力学直径小于 $2.5 \mu\text{m}$) $\text{PM}_{2.5}$ 量。

1.5 单位叶面积 (m^2) 日吸收 SO_2 量计算

通过不同时期园林植物个体叶片的硫含量差异测定, 推导出单位叶面积的日吸收二氧化硫 (SO_2) 量。

1.6 针对生态效益的经济评价方法

■ 固定 CO_2 效益与经济价值

园林通过光合作用吸收 CO_2 , 在一定时间尺度上, 可以实现 CO_2 的固定。在本软件中, 主要参照造林成本法^[6], 以每固定一吨二氧化碳成本约为 273 元/吨进行计算。

■ 释放 O₂ 效益与经济价值

园林植物与大气的物质交换，主要是 CO₂ 和 O₂ 的交换，确切地说，是固定并减少大气中的 CO₂ 和提供并增加大气中的 O₂，这对维持地球大气中的 CO₂ 和 O₂ 的动态平衡，减少温室效应及提供人类生存基础，有巨大而不可替代的作用。在本软件中，植物释放氧气所产生的经济价值默认通过 2018 年北京医用氧气 **1200 元/吨** 的价格来等效反映。

■ 吸热降温效益与经济价值

绿地对环境的降温作用，一方面是由于树木的遮荫有降温效能，当阳光辐射到树干时，有 20%-50% 的热量反射到天空，还有 35% 被树干吸收。另一主要方面是由于植物叶片的蒸腾作用，可以吸收周围热量。在本软件中，目前只考虑夏季每天最高气温大于 32℃ 的天数（2018 年为 60 天）内植物蒸腾作用消耗的能量，若通过空调器来调节所需消耗的电费来等效反映其经济价值。每度电价默认按 2018 年北京居民用电价格 **0.50 元** 设定。

■ 滞尘（滞留 PM_{2.5}）效益与经济价值

由于植物叶片表面特性和本身的湿润性，园林植物可以起到一定的滞尘作用。在本软件中，默认参考中华人民共和国林业行业标准“森林生态系统服务功能评估规范”（LY/T 1721-2008）中尘土清理费用（不区分细颗粒物和粗颗粒物）**150 元/吨** 来等效反映植物滞尘（滞留 PM_{2.5}）的经济价值。

■ 吸收 SO₂ 效益与经济价值

园林植物叶片在其生长过程中，可以不同程度地吸收大气中 SO₂，从而起到净化空气的作用。在本软件中，默认参考中华人民共和国林业行业标准“森林生态系统服务功能评估规范”（LY/T 1721-2008）中有关 SO₂ 的治理费用 **1200 元/吨** 的价格来等效反映。

2. 园林植物夏季最大雨水吸收能力、夏季遮荫能力、夏季 UVB 屏蔽能力等 4 种生态效益的定量计算方法

2.1 单位叶面积（m²）夏季最大雨水吸收能力

采用简易吸水法，研究计算植物单位叶面积的最大雨水吸收能力^[7]：夏季雨后 3 天，每种植物选择 3 株长势良好的成年健壮植株，共采集 20 片标准叶片，叶片采集通过枝条剪下放入自封袋内，然后带回实验室进行叶面积测定与吸水实验。

植物叶面积使用 LI-3000C 叶面积仪进行测定，将每种植物叶片以 5 片为一组，分成 4 组，分组记录植物叶面积。然后用镊子将每组叶片放置在精度为 0.0001 的电子天平上进行称量，获得叶片浸水前的重量（M₁），之后将叶片浸入水中 10 分钟，用镊子将叶片轻轻取出，等叶片不再滴水后，称量叶片的重量（M₂）。根据测得的数据，通过下列公式计算：

（1）雨水吸收量

$$I = M_2 - M_1$$

其中， I 为叶片浸水 10min 的水分吸收量（g），在此 I 值等同于叶片的最大雨水吸收量； M_1 为浸水前的重量（g）； M_2 为浸水 10min 的重量（g）。

（2）单位叶面积雨水吸收量

单位叶面积吸收量 H 指每平方米叶面积的雨水吸收量，公式为：

$$H = \frac{I}{S}$$

其中， H 为 10min 单位叶面积雨水吸收量（g/m²）； I 为浸水 10min 的吸收量（g）； S 为叶片面积（m²）。

2.2 夏季遮荫能力

植物冠层可通过阻挡夏季强烈的阳光直射，起到遮荫作用。夏季 6-8 月，每月选 3 个晴天，在光照最强的 11:00-14:00，采用 ST-85 照度计对所选树种（3 个重复）进行树荫下和全光下的照度测定，并根据测得的数据，通过下列公式计算遮光率 LSP^[8]：

$$LSP = \left(1 - \frac{I_S}{I}\right) \times 100\%$$

其中， LSP 为遮光率（%），遮光率值越高，则表示该植物的遮阴能力越强； I_S 为树荫下光照强度（lux）； I 为全光下光照强度（lux）。

2.3 夏季紫外线 UVB 屏蔽能力

紫外线中 UVB（ultraviolet radiation b, 275~320nm）对人类健康影响较大。目前的研究表明植物冠层可屏蔽大部分 UVB 辐射。夏季 6-8 月，每月选 3 个晴天，在光照最强的 11:00-14:00，利用 UV-B 紫外辐照计记录每株植物树荫下和全光下的紫外线辐射强度，每种植物各记录 3 组数据，并通过下列公式计算 UVB 屏蔽率 S ^[9]：

$$S = \left(1 - \frac{L_S}{L}\right) \times 100\%$$

其中， S 为 UVB 屏蔽率（%），UVB 屏蔽率值越高，则表示该植物的 UVB 屏蔽能力越强； L_S 为树荫下 UVB 辐照值（ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ）； L 为全光下 UVB 辐照值（ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ）。

2.4 雨水截留效益与经济价值

绿地具有天然的海绵功能，是城市建设的重要载体，其植物在雨水滞留、下渗和净化等方面具有重要作用。植物对降雨的再分配过程包括，林冠截留、穿透雨量和树干径流，林冠雨水截留在削减地表径流，调节地表水量平衡方面发挥重要作用。本软件中，采用水量平衡法计算林冠截留量（ I_C , mm），一般是通过测定不同规格不同树种的林外降雨量（ P_G , mm）、林内穿透雨量（ P_T , mm）及树干茎流量（ F_S , mm）3 个变量的监测记录，利用水量平衡公式得出林冠截留量，大量研究表明，乔木树干茎流量仅占林外降雨量的 1%-5%，考虑到监测的困难、选取的乔木特征和实际降雨中现场观察情况，本次乔木截留监测试验中树干茎流量忽略不计。

在雨季 5-10 月份，在选定植物冠层下，依据冠幅的大小，分别在树干距离冠幅边缘的 1/2 处、东南西北四个方向设置 4 个雨量计，测量林冠下的林内穿透雨量 P_T ，同时设置一空白对照测定林外降雨量 P_G 。其中，林冠截留量（ I_C , mm）和截留率 F （%）的计算公式为^[10-11]：

$$I_C = P_G - P_T$$

$$F = I_C / P_G$$

式中, I_C 为林冠截留量 (mm); P_G 为林外降雨量 (mm); P_T 为林内穿透雨量 (mm); F 为截留率 (%)。

不同植物冠层年雨水截留量通过截留率、年降雨量以及植物冠幅大小计算获得, 其中, 年降雨量 P 利用生态观测站内多年监测获取的气象数据平均年降雨量作为参考。不同植物冠层年雨水截留量计算公式为:

$$I = F \times P \times S$$

式中, I 为不同植物冠层年雨水截留量; F 为截留率 (%); P 为年降雨量 (mm); S 为植物冠幅面积 (mm^2)。

年度雨水截留经济效益由植物冠层年雨水截留量与雨水截留量单位金额相乘的方式来获得, 而雨水截留量单位金额由不同地区不同气候类型决定, 本软件中, 参考 i-tree 软件中有关雨水截留量单位金额的费用, 通过在 i-tree 模块中输入地区北京, 选择与北京相似的气候类型 Midwest, 得出雨水截留量单位金额为 0.03 (美元/加仑), 折合成人民币为 50 元/吨。

3、夏季日致敏花粉浓度的定量计算方法

关于单位面积绿地的夏季日致敏花粉浓度, 目前主要基于实验观测获得的回归方程进行计算:

(1) 柏树的回归方程为 $Y=3.41+10.46X$ ($P<0.05$), 当其种植密度超过 8 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 90 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到高污染风险等级; 当其种植密度超过 143 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 1500 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到极高污染风险等级。

(2) 榆科树木的回归方程为 $Y=5.84X$ ($P<0.05$), 当其种植密度超过 15 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 90 粒 $\cdot\text{hm}^{-3}$, 达到高污染风险等级; 当其种植密度超过 256 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 1500 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到极高污染风险等级。

(3) 杨树的回归方程为 $Y=12.63X$ ($P<0.05$), 当其种植密度超过 7 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 90 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到高污染风险等级; 当其种植密度超过 118 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 1500 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到极高污染风险等级。

(4) 柳树的回归方程为 $Y=33.42X$ ($P<0.05$), 当其种植密度超过 2 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 90 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到高污染风险等级; 当其种植密度超过 44 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 1500 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到极高污染风险等级。

(5) 白蜡的回归方程为 $Y=104.14X$ ($P<0.05$), 当其种植密度超过 1 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 最大日花粉浓度就可能超过 90 粒 $\cdot\text{m}^{-3}$, 达到高污染风险等级; 当其

种植密度超过 14 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度可能超过 1500 粒·m⁻³，达到极高污染风险等级。

(6) 银杏的回归方程为 $Y=8.68X$ ($P<0.01$)，当其种植密度超过 9 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度就可能超过 90 粒·hm⁻³，达到高污染风险等级；当其种植密度超过 172 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度可能超过 1500 粒·m⁻³，达到极高污染风险等级。

(7) 松树的回归方程为 $Y=2.12X$ ($P<0.05$)，当其种植密度超过 41 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度就可能超过 90 粒·m⁻³，达到高污染风险等级；当其种植密度达到 706 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度才可能超过 1500 粒·m⁻³，达到极高污染风险等级。

(8) 桑科树木的回归方程为 $Y=317.14X$ ($P<0.01$)，当其种植密度超过 1 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度就可能超过 90 粒·m⁻³，达到高污染风险等级；当其种植密度达到 4 株·hm⁻²时，最大日花粉浓度就可能超过 1500 粒·m⁻³，达到极高污染风险等级。

参考文献

- [1] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 古润泽. 北京城市园林绿化生态效益的研究. 中国园林, 1998, 14(55): 57.
- [2] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 古润泽, 李延明. 北京城市园林绿化生态效益的研究 (2). 中国园林. 1998, 14 (56): 51-54.
- [3] 王沙生. 植物生理学. 中国林业出版社. 1994.
- [4] 熊向艳, 韩永伟, 高馨婷, 等. 北京市城乡结合部 17 种常用绿化植物固碳释氧功能研究[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4 (03): 248-255.
- [5] Xu Yansen, Xu Wen, Mo Li, et al.. Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(13): 12545-12556.
- [6] 黄宰胜, 陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38 (3): 0485-0492.
- [7] 王思思, 龙佳, 丁涵. 北京市21种植物的叶片吸水性能与冠层雨水截留能力研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(09): 100-110.
- [8] 陈耀华. 关于行道树遮荫效果的研究[J]. 园艺学报, 1988(02): 135-138.
- [9] Brown M. J., Parker G., Posner N. E.. A survey of ultraviolet-B radiation in forests [J]. Journal of Ecology, 1994, 82(4): 843-854.
- [10] 袁秀锦, 肖文发, 雷静品, 王晓荣, 胡文杰, 崔鸿侠, 庞宏东, 潘磊. 马尾松林分结构对冠层水文效应的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(02): 451-459.
- [11] 高柳威, 冀晓东, 韩朝, 吴春冰. 人工模拟林冠降雨截留试验[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18 (1): 68-78.

完成单位: 北京市园林绿化科学研究所 生态环境研究所 xiejunfei@126.com 2023.2.12