

刘本本, 孙清琳, 柳鑫, 易三桂, 郭姣姣, 周继华, 来利明, 郑元润. 基于群决策和层次分析法的雄安新区公园绿地植物综合评价体系构建与物种筛选[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (3): 770-778

Liu BB, Sun QL, Liu X, Yi SG, Guo JJ, Zhou JH, Lai LM, Zheng YR. Construction of a comprehensive evaluation system for park green space plants and species selection in the Xiong'an New Area based on group decision making and the analytic hierarchy process [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2022, 28 (3): 770-778

基于群决策和层次分析法的雄安新区公园绿地植物综合评价体系构建与物种筛选

刘本本^{1,2} 孙清琳^{1,2} 柳鑫^{1,2} 易三桂^{1,2} 郭姣姣^{1,2} 周继华¹ 来利明¹ 郑元润¹✉

¹中国科学院植物研究所北方资源植物重点实验室 北京 100093

²中国科学院大学 北京 100049

摘要 雄安新区的建设是我国千年大计, 将规划建设成为绿色生态宜居城市. 植物为城市绿地的主体, 其种类选择影响着绿地改善城市生态环境等综合功能的充分发挥. 为科学指导公园绿地植物合理选择及资源引种, 从植物的生态适应性、生物学特性、观赏价值、生态效益、经济价值、社会文化价值和环保安全7个方面, 选择33项评价指标, 构建雄安新区公园绿地植物的综合评价体系. 通过文献资料分析, 对筛选的216种植物指标层指标进行赋分. 在专家判断矩阵的基础上, 采用群决策方法计算专家权重, 通过层次分析法计算评价指标个体权重, 进而计算评价指标的群体权重. 最后, 利用线性加权综合法计算每种植物的综合得分, 并进行分级. 根据216种植物的综合评价结果, 可分为3个等级, 其中1级植物51种, 包括乔木植物19种、灌木植物20种、藤本植物4种、草本植物8种; 2级植物116种, 包括乔木植物58种、灌木植物38种、藤本植物5种、草本植物15种; 3级植物49种, 包括乔木植物22种、灌木植物18种、草本植物5种. (表4 参47)

关键词 群决策; 层次分析; 雄安新区; 公园绿地; 植物评价

Construction of a comprehensive evaluation system for park green space plants and species selection in the Xiong'an New Area based on group decision making and the analytic hierarchy process

LIU Benben^{1,2}, SUN Qinglin^{1,2}, LIU Xin^{1,2}, YI Sangui^{1,2}, GUO Jiaojiao^{1,2}, ZHOU Jihua¹, LAI Liming¹ & ZHENG Yuanrun¹✉

¹Key Laboratory of Plant Resources, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The construction of the Xiong'an New Area is a millennium project in our country. This area will be built as a green, ecological, and livable new city. Plants are the main components of urban green space. The selection of plant species affects the comprehensive function of green space as it relates to improvement in the urban environment. Thus, a comprehensive evaluation system for plants is an important scientific guide for the rational selection and introduction of plant species for parks located in the Xiong'an New Area. In this study, 33 evaluation indices were selected, which were based on plant ecological adaptability, biological characteristics, ornamental values, ecological benefits, economic values, social and cultural values, and environmental protection and safety, to construct a comprehensive evaluation system for park green space plants in the Xiong'an New Area. The index layer of initially screened 216 plant species was scored through literature analysis. Thereafter, experts were invited to construct a judgment matrix; the group decision-making method was used to calculate expert weights; the analytic hierarchy process was used to calculate individual weights for the evaluation indices; and the group weights of the evaluation indices were subsequently calculated. Finally, the linear weighted synthesis method was used to calculate the comprehensive score of each plant, and all the plants were graded. The plant species ($N = 216$) were divided into three grades according to the results of the comprehensive evaluation. Fifty-one species were designated as Grade 1 plants; they included 19 tree, 20 shrub, 4 liana, and 8 herb species. One hundred and sixteen species were designated as Grade 2 plants; they included 58 tree, 38 shrub, 5 liana, and 15 herb species. Forty-nine species were designated as Grade 3 plants; they included 22 tree, 18 shrub, and 5 herb species.

Keywords group decision; analytic hierarchy process; Xiong'an New Area; park green space; comprehensive evaluation

收稿日期 Received: 2021-02-01 接受日期 Accepted: 2021-04-06

国家重点研发计划项目(2018YFC0506903)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC0506903)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: zhengyr@ibcas.ac.cn)

城市生态系统是一个开放性、依赖性、脆弱性较强的复杂人工生态系统,易受到人类活动和环境变化的影响。近年来,全球气候变化和城市化快速发展,使城市生态环境受到更加严重的威胁,如空气污染、洪涝、热岛效应等城市生态环境问题,严重干扰着人类生活,威胁人类生命和财产安全^[1-3]。城市绿地作为城市生态系统的子系统,在调节和改善城市生态环境方面发挥着重要作用,对人类身心健康产生积极影响^[4-5]。植物是城市绿地的重要组成部分,其种类选择和群落配置会影响城市绿地综合功能的发挥^[6]。城市绿地植物综合评价可为城市绿地植物的合理选择和植物群落配置提供科学依据^[7]。因而,构建科学、系统的绿地植物评价体系,对城市绿地植物选择和城市绿地功能提升具有重要意义。

早在20世纪90年代,国内外已经出现有关植物评价的报道,最初,为促进植物在城市绿地中的合理应用,开展了植物的定性评价^[8-9]。之后,对城市绿地植物评价的研究主要侧重于对植物单一特性的研究,如植物观赏性、生态适应性、生态效益等^[10-12]。史佑海利用层次分析法对海口市公园绿地的观花植物进行了观赏性状评价^[10]。Yu等、Lin等和王倩等分别对城市绿地植物进行了抗盐性、抗旱性和抗寒性评价^[11, 13-14]。关于城市绿地植物降温增湿、固碳释氧、滞尘抑菌等生态效益方面的评价也有报道^[12, 15-17]。随着近年来生态城市建设的需求,开展植物综合评价,更加科学合理地选择城市绿地植物成为重要的研究主题。唐小清等和孙正芝等从植物的生态适应能力、应用价值、观赏效果等方面对城市绿地乡土植物和引进植物进行了综合评价^[18-19]。也有学者从生态适应性、生物学特性、观赏价值等方面对彩叶植物进行了多功能评价^[20]。尽管已有关于防护绿地、社区绿地、道路绿地和公园绿地植物多功能评价的报道,但评价指标的选择仍不能涵盖生态、社会等多方面需求^[21-24]。因此,选择更加全面的评价指标,构建城市绿地植物综合评级体系十分必要。

植物综合评价研究方法主要包括模糊数学法、灰色关联度分析法、层次分析法,其中层次分析法应用最为广泛,得到许多学者认可^[7, 25-26]。应用层次分析法构建植物综合评价体系,一般通过专家咨询的方法确定评价指标权重,但不同专家给出的评价指标权重可能存在较大差异,会对评价结果造成影响。群决策通过数学方法整合所有专家给出的权重,得到群体权重^[27]。因此,采用群决策和层次分析相结合的方法,可以有效降低个人主观性对评价指标权重的影响。

雄安新区是我国的千年大计,蓝绿比例要达到70%,绿地占比很大。要实现各类绿地的可持续发展,科学合理地评价选择植物十分关键。因此,本研究拟从生态适应性、生物学特性、观赏价值、生态效益、经济价值、社会文化价值及环境安全等方面,采用群决策和层次分析相结合的研究方法,构建评价模型,系统开展雄安新区公园绿地植物的综合评价,为雄安新区绿地建设植物选择提供科学依据,也可城市绿地植物综合评价体系构建提供参考文献。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雄安新区(38°43'39"10"N, 115°38'-116°20'E)位于太行山东麓、冀中平原中部、南拒马河下游南岸,大清河水系冲积扇上,土层深厚,地形开阔。雄安新区属暖温带大陆性季风气候,四季分明,春旱多风,夏热多雨,秋凉气爽,冬寒少雪。全年平均气温11.9℃,最热月平均气温26.1℃,最冷月平

均气温-4.9℃,极端最高气温40.9℃,极端最低气温-21.5℃。年日均气温0℃以上的持续时间273 d。全年无霜期191 d,最长205 d,最短180 d。年日照2 685 h。年均降水量为522.9 mm,年极端最大降水量为1 237.2 mm,年极端最小降水量207.3 mm。全年以偏北风最多,年平均风速2.1 m/s,历史极端最大风速为20 m/s(http://xiongan.gov.cn/2017-12/18/c_129769113.htm)。

1.2 研究材料

通过查阅资料,结合雄安新区地理环境及气候特征,考虑雄安新区与北京、保定、石家庄等地气候及环境的相似性,从华北地区绿地建设常用的600多种乔、灌、草植物中,进一步筛选出216种在北京、保定、石家庄等地常用的、对雄安新区公园绿地建设适宜性较高的植物,包括常绿乔木12种、落叶乔木87种、常绿灌木7种、落叶灌木73种、藤本9种、草本28种^[28-32]。

1.3 雄安新区公园绿地植物综合评价模型

1.3.1 评价指标选择 综合分析前人研究结果,采用频度分析法,即对文献中应用的各种评价指标进行统计分析,选择应用频度较高的城市绿地植物评价指标。结合雄安新区气候环境及城市发展定位,选择雄安新区公园绿地植物综合评价指标。针对选择的评价指标,咨询专家意见,调整评价指标,确定雄安新区公园绿地植物综合评价指标。

1.3.2 综合评价模型构建 采用层次分析法构建雄安新区公园绿地植物综合评价层次结构模型。目标层(O)是雄安新区公园绿地植物综合评价;准则层(C)包括植物生态适应性(C1)、生物学特性(C2)、观赏价值(C3)、生态效益(C4)、经济价值(C5)、社会文化价值(C6)和环境安全(C7),较为全面地反映植物的特性和价值;对准则层进行细化,形成包括33项评价指标的指标层(P)(表1);方案层(S)为雄安新区公园绿地建设物种(216种)。

1.3.3 指标权重确定 (1)判断矩阵构建:根据层次分析法原理,对模型中低层的各个因素进行相对于高层重要性的两两比较,构建判断矩阵。采用1-9标度法进行量化打分^[33]。当*i*因素与*j*因素相比分别为同等重要、稍微重要、重要、非常重要、极端重要时,分值分别为1、3、5、7、9;反之,则分别记为1/3、1/5、1/7、1/9;如介于上述两个等级之间,用2、4、6、8或其倒数来表示^[34]。在提及评价专家人数的相关文献中,专家人数基本为3-10人。本研究请8名知名专家(包含城市生态、景观生态评价、群落生态、生态保护、植物学等方面的专家)对准则层相对于目标层和指标层相对于准则层的相对重要性进行评估赋分,每位专家分别构建7个判断矩阵,共56个判断矩阵。专家评价结果和判断矩阵能够满足本研究可信度要求。

(2)单层次指标个体权重计算及一致性检验:单层次指标的个体权重是指通过计算某位专家构造的判断矩阵,从而得到同一层各个因素相对于上层所属因素的相对重要性。运用和积法计算各个判断矩阵的特征向量,即为每位专家对各个指标的个体权重向量;计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$,进行一致性检验^[35-36]。方法如下:

首先,对判断矩阵的每一列元素进行归一化处理,即矩阵中每个元素除以所在列所有元素之和。设判断矩阵A中各元素的原始值为 a_{ij} ,归一化后的矩阵为B,各元素的值为 b_{ij} ,

$$b_{ij} = a_{ij} / \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.1)$$

其次,对归一化后的矩阵按行进行求和。设归一化后的矩阵B每行元素相加的和为 q_i ,得到向量 $Q = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_n]^T$,

$$q_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.2)$$

然后,对向量 Q 进行归一化,得到特征向量 $W=[w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]^T$,即个体权重向量,

$$w_i = q_i / \sum_{i=1}^n q_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.3)$$

其中, w_i 即为单层次中各指标的权重值。

再后,计算判断矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max}$,

$$\lambda_{\max} = (\sum_{i=1}^n (A \times W) / w_i) / n \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.4)$$

最后,计算判断矩阵 A 的一致性指标C.I.和一致性比率C.R.,

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1.5)$$

$$C.R. = C.I. / R.I. \quad (1.6)$$

其中,当 n 分别为1、2、3、4、5、6、7、8、9时, $R.I.$ 分别为0、0.058、0.90、1.12、1.24、1.32、1.41、1.45。若一致性比率 $C.R. < 0.1$,通过一致性检验^[35]。

(3) 群决策专家权重计算:由于计算出的专家个体权重向量不一定一致,需要将每位专家的个体权重向量归集为群体权重向量^[27]。本研究采用高阳的方法^[27]进行计算。

确定专家间的相容度。设 m 位专家对单层内同属一个上层的 n 个因素相对于上层的相对重要性进行评估,第 k 位专家的判断矩阵为 A_k ,通过和积法求出 A_k 的个体权重向量 $W_k = (w_{k1}, w_{k2}, w_{k3}, \dots, w_{kn})^T$ ($k=1, 2, 3, \dots, m$),且 A_k 通过一致性检验。若 A_k 未通过一致性检验,则采用吴泽宁的方法^[37]对原始判断矩阵进行修正,直至通过一致性检验。

设第 x 名专家的个体权重向量为 W_x ,第 y 名专家的个体权重向量为 W_y ,两者的相容度(相似度)为 $d(x, y)$,采用向量夹角余弦计算个体权重向量 W_x 和 W_y 之间的相容度,计算公式如下:

$$d(x, y) = (\sum_{i=1}^n w_{xi} \times w_{yi}) / (\sum_{i=1}^n w_{xi}^2 \times w_{yi}^2)^{1/2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.7)$$

$d(x, y)$ 越接近于1,表示向量 W_x 和 W_y 之间越相似, $d(x, y)$ 越接近于0,表示 W_x 和 W_y 之间越疏远。根据 m 位专家的 m 个个体权重向量,构建相容度矩阵 $D = [d(x, y)]_{m \times m}$ 。

根据专家间的相容度对专家进行聚类。第一步,根据相容度矩阵 $D = [d(x, y)]_{m \times m}$,找到非对角线元素中最大元素 $d_{\max(1)} = \max d(x, y) (x, y=1, 2, \dots, m, x \neq y)$,然后将相容度最大的两名专家 x, y 合为一个新类,记为 G_r ,此时 $G_r = \{x, y\}$;第二步,去除与 x, y 专家权重向量相关的相容度,加入新类 G_r 与其他专家权重向量之间的相容度 $d(r, k) = \max\{d(x, k), d(y, k)\}$,重新构建相容度矩阵;第三步,找到新矩阵中非对角线上当前最大相容度 $d_{\max(2)}$ 对应的专家,并将其合并为一个新类,然后按照第二步重新构建相容度矩阵;第四步,重复第三步,直到所有专家归为一个大类;第五步,依次记录归类合并时的最大相容度值,根据相容度值绘制聚类谱系图;第六步,分析聚类谱系图,确定合理的阈值 T ,依次比较最大相容度与阈值 T 。当最大相容度小于阈值 T 时,分类结束,保留当前分类结果,并将后面的每位专家各自各成一类。

确定专家类别间权重。设 m 位专家聚类后被分为 F 类,第 k 位专家所属类别为 G_r ,专家 E_k 所在的类中专家数目为 L_r ,该类别专家的类别间权重为 β_r ,则:

$$\beta_r = L_r^2 / (\sum_{f=1}^F L_f^2) \quad (f=1, 2, 3, \dots, F) \quad (1.8)$$

确定专家类别内权重。采用一致性比例C.R.的方法计算类别内各个专家权重,设类别 G_r 内各个专家的类别内权重为 α_k ,则:

$$\alpha_k = (1 + b \times C.R._k) / (\sum_{f=1}^{L_r} L_f^2) \quad (k, j=1, 2, \dots, L_r) \quad (1.9)$$

其中参数 b 为人工设定的比例因子,一般取 $b=10$ 。利用公式(1.9)计算出所有专家的类别内权重值。

确定每位专家综合权重。根据以上计算出的类别间权重

和类别内权重,计算各位专家的综合权重为 E_k ,公式如下:

$$E_k = \alpha_k \times \beta_r \quad (k=1, 2, \dots, m; f=1, 2, \dots, F) \quad (1.10)$$

(4) 计算单层指标的群体权重:设单层指标 i 的群体权重为 GW_i ,则:

$$GW_i = \sum_{k=1}^m E_k \times w_{ki} \quad (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n) \quad (1.11)$$

(5) 计算指标层各个指标的组合权重:指标的组合权重是指同一层次中各个因素相对于最高层(目标层)的相对重要性。通过以上步骤计算得到的指标层各个指标的群体权重分别与相应准则层因素的群体权重相乘,即可得到指标层各个指标最终的组合权重。设准则层的单指标群体权重为 GW^c ,指标层的单指标权重为 GW^p ,最后指标层各因素相对于目标层的组合权重为 GW^o ,则:

$$GW^o = GW^c \times GW^p \quad (1.12)$$

1.3.4 指标层评价指标量化 通过查阅文献资料和雄安新区的气候环境条件,咨询专家意见,确定了雄安新区公园绿地植物指标层的量化标准,按照差、较差、一般、较强、强分别赋值1、2、3、4、5。

1.4 植物综合评价

利用线性加权综合法计算每种植物的综合评价得分,即每种植物各项指标评分与相应指标权重相乘的和^[38]。

2 结果与分析

2.1 评价指标权重

对于雄安新区公园绿地而言,准则层权重从大到小依次为生态适应性、观赏价值、环保安全、生物学特性、生态效益、社会文化价值、经济价值(表1)。在生态适应性方面,权重较大的是抗旱和抗寒能力,其次是抗病虫害和抗污染能力,抗盐碱、抗风、抗涝和抗瘠薄能力权重较小。在观赏价值方面,权重较大的是季相变化和花部的观赏性,其次是树形、叶片和果实的观赏性,茎干观赏性权重较小。在生物学特性方面,权重较大的是植物对动物的吸引力,其次是萌蘖能力,最后是繁殖特性和生长速度。在生态效益方面,权重较大的是植物的降温增湿、滞尘、水土保持和固碳释氧效益,其次是吸收有毒有害气体、负离子释放、杀菌和降噪效益。在社会文化价值方面,权重较大的是植物的文化价值和教育价值,其次是科学价值。在经济价值方面,权重较大的是药用价值和工业价值,食用价值的权重较小。

就指标层33个评价指标的综合权重而言,环保安全、抗旱能力、对动物的吸引力、抗寒能力、抗病虫害能力、抗污染能力、季相变化、花部观赏性、文化价值等9个指标的重要性较大(综合权重 ≥ 0.03);叶片观赏性、株形观赏性、抗盐碱能力、教育价值、萌蘖能力、药用价值、抗涝能力、抗风能力、果实观赏性、工业价值、抗瘠薄能力、繁殖特性等12个指标的重要性一般(综合权重 ≥ 0.02);生长速度、科学价值、滞尘效益、降温增湿效益、水土保持效益、固碳释氧效益、吸收有毒有害气体效益、杀菌效益、负离子释放效益、食用价值、茎干观赏性、降噪效益等12个指标的重要性较小(综合权重 < 0.02)。

2.2 植物综合评价及分级

由于乔木、灌木和草本植物的形态特征差异较大,将其分开进行评价^[39]。根据综合得分排序和分布情况,以上四分位数和下四分位数为等级分割点,分别将乔木、灌木和草本植物分为3个等级。乔木:Ⅰ级 ≥ 3.8 , $3.8 > \text{Ⅱ级} \geq 3.4$, $\text{Ⅲ级} < 3.4$ (表2);灌木(含藤本):Ⅰ级 ≥ 3.4 , $3.4 > \text{Ⅱ级} \geq 3.1$, $\text{Ⅲ级} < 3.1$ (表3);草本:Ⅰ级 ≥ 2.6 , $2.6 > \text{Ⅱ级} \geq 2.4$, $\text{Ⅲ级} < 2.4$ (表4)。

表1 雄安新区公园绿地植物综合评价指标权重

Table 1 Weight of comprehensive evaluation index of species for park of Xiong'an New Area

准则层C Criterion layer C	准则层权重 Weight of criterion layer	指标层P Index layer P	指标层权重 Weight of Index layer	综合权重 Comprehensive weight
生态适应性C1 Ecological adaptability C1	0.32	抗旱能力P1 Drought resistance ability P1	0.21	0.0672
		抗寒能力P2 Cold resistance ability P2	0.19	0.0608
		抗涝能力P3 Anti-waterlogging ability P3	0.08	0.0256
		抗盐碱能力P4 Anti-saline ability P4	0.09	0.0288
		抗病虫害能力P5 Diseases and insects resistance ability P5	0.14	0.0448
		抗风能力P6 Wind resistance ability	0.08	0.0256
		抗污染能力P7 Anti-pollution ability P7	0.14	0.0448
		抗瘠薄能力P8 Barrenness resistance ability P8	0.07	0.0224
生物学特性C2 Biological characteristics C2	0.13	生长速度P9 Growth rate P9	0.15	0.0195
		萌蘖能力P10 Tillering ability P10	0.21	0.0273
		繁殖特性P11 Reproductive characteristics P11	0.16	0.0208
		对动物的吸引力P12 Attraction to animals P12	0.48	0.0624
观赏价值C3 Ornamental values C3	0.17	树形观赏性P13 Ornamental of tree shape P13	0.17	0.0289
		茎干观赏性P14 Ornamental of stems P14	0.06	0.0102
		叶片观赏性P15 Ornamental of leaves P15	0.17	0.0289
		花部观赏性P16 Ornamental of flowers P16	0.22	0.0374
		果实观赏性P17 Ornamental of fruits P17	0.15	0.0255
		季相变化P18 Seasonal change P18	0.23	0.0391
生态效益C4 Ecological benefits C4	0.11	降噪效益P19 Noise reduction benefit P19	0.09	0.0099
		滞尘效益P20 Dust retention benefit P20	0.15	0.0165
		杀菌效益P21 Bactericidal benefit P21	0.10	0.0110
		降温增湿效益P22 Cooling and humidifying benefits P22	0.15	0.0165
		固碳释氧效益P23 Carbon fixation and oxygen release benefits P23	0.14	0.0154
		水土保持效益P24 Soil and water conservation benefits P24	0.15	0.0165
		吸收有毒有害气体效益P25 Absorption of toxic and harmful gases benefits P25	0.12	0.0132
经济价值C5 Economic values C5	0.06	负离子释放效益P26 Negative ion release benefit P26	0.10	0.0110
		工业价值P27 Industrial value P27	0.38	0.0228
		药用价值P28 Medicinal value P28	0.44	0.0264
社会文化价值C6 Socio-cultural values C6	0.08	食用价值P29 Edible value P29	0.18	0.0108
		文化价值P30 Cultural value P30	0.40	0.0320
		科学价值P31 Scientific value P31	0.24	0.0192
环保、安全C7 Environmental protection and security C7	0.13	教育价值P32 Educational value P32	0.36	0.0288
		环保、安全P33 Environmental protection and security P33	1.00	0.1300

综合评价为1级的公园绿地物种共有51种，其中，乔木19种，如国槐（*Styphnolobium japonicum*）、黄连木（*Pistacia chinensis*）、银杏（*Ginkgo biloba*）、五角枫（*Acer pictum* subsp. *mono*）、臭椿（*Ailanthus altissima*）等；灌木20种，如接骨木（*Sambucus williamsii*）、石榴（*Punica granatum*）、紫薇（*Lagerstroemia indica*）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）、连翘（*Forsythia suspensa*）等；藤本植物4种，分别是南蛇藤（*Celastrus orbiculatus*）、紫藤（*Wisteria sinensis*）、忍冬（*Lonicera japonica*）和厚萼凌霄（*Campsis radicans*）；草本植物8种，包括蜀葵（*Alcea rosea*）、马蔺（*Iris lactea*）、千屈菜（*Lythrum salicaria*）、野牛草（*Buchloe dactyloides*）、大花金鸡菊（*Coreopsis grandiflora*）、萱草（*Hemerocallis fulva*）、麦冬（*Ophiopogon japonicus*）和鸢尾（*Iris tectorum*）。1级植物主要包括综合评价较高的植物，即生态适应性强、观赏价值高、环保安全性好、生态效益好，并具有较高的经济价值和文化价值，可以作为雄安新区公园绿地建设时优先选择的植物种类。

综合评价为2级的公园绿地植物共有116种。其中乔木58种，包括大叶朴（*Celtis koraiensis*）、槲栎（*Quercus aliena*）、合欢（*Albizia julibrissin*）、黄金树（*Catalpa speciosa*）、金叶槐（*Sophora japonica* cv. 'Golden'）、栓皮栎（*Quercus variabilis*）等51种落叶乔木，以及华山松（*Pinus*

armandii）、白皮松（*Pinus bungeana*）、油松（*Pinus tabulaeformis*）、红豆杉（*Taxus wallichiana* var. *chinensis*）、圆柏（*Juniperus chinensis*）、雪松（*Cedrus deodara*）和侧柏（*Platycladus orientalis*）7种常绿乔木；灌木38种，包括山杏（*Armeniaca sibirica*）、桃（*Amygdalus persica*）、鸡爪槭（*Acer palmatum*）、木槿（*Hibiscus syriacus*）、流苏树（*Chionanthus retusus*）等35种落叶灌木和卫矛（*Euonymus alatus*）、黄杨（*Buxus sinica*）、叉子圆柏（*Juniperus sabina*）3种常绿灌木；藤本植物包括爬行卫矛（*Euonymus fortunei* var. *radicans*）、扶芳藤（*Euonymus fortunei*）、地锦（*Parthenocissus tricuspidata*）、藤本月季（*Climbing Roses*）和五叶地锦（*Parthenocissus quinquefolia*）5种；草本15种，如石竹（*Dianthus chinensis*）、桔梗（*Platycodon grandiflorus*）、玉簪（*Hosta plantaginea*）等。2级植物各方面的综合评价中等，可作为雄安新区公园绿地植物选择的一般种类。

综合评价为3级的公园绿地植物共有49种。乔木有22种，包括17种落叶乔木和5种常绿乔木，落叶乔木包括毛白杨（*Populus tomentosa*）、苹果（*Malus pumila*）、香花槐（*Robinia pseudoacacia* cv. 'idaho'）、水曲柳（*Fraxinus mandshurica*）、山桃（*Amygdalus davidiana*）、毛楝（*Cornus walteri*）等，常绿乔木有北美

表2 雄安新区公园绿地乔木植物综合评价得分及等级

Table 2 Comprehensive evaluation scores and grades of trees for parks of Xiong'an New Area

植物种类 Plant species	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade	植物种类 Plant species	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	4.0034	1	槲树 <i>Quercus dentata</i>	3.6140	2
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	3.9317	1	白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	3.6131	2
杜梨 <i>Pyrus betulifolia</i>	3.9191	1	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	3.5970	2
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	3.9190	1	绒毛白蜡 <i>Fraxinus tomentosa</i>	3.5862	2
柿 <i>Diospyros kaki</i>	3.9131	1	大叶榉树 <i>Zelkova schneideriana</i>	3.5820	2
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	3.8953	1	杂交马褂木 <i>Liriodendron × sinoamericanum</i>	3.5795	2
灯台树 <i>Bothrocaryum controversum</i>	3.8866	1	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	3.5608	2
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	3.8866	1	雪松 <i>Cedrus deodara</i>	3.5604	2
杏 <i>Armeniaca vulgaris</i>	3.8714	1	金叶复叶槭 <i>Acer negundo</i> cv. 'Aurea'	3.5496	2
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	3.8692	1	李 <i>Prunus salicina</i>	3.5467	2
皂荚 <i>Gleditsia sinensis</i>	3.8461	1	紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	3.5400	2
七叶树 <i>Aesculus chinensis</i>	3.8371	1	绿柳 <i>Salix matsudana</i> cv. 'Pendula'	3.5394	2
红叶臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> cv. 'Hongye'	3.8315	1	北美红栎 <i>Quercus rubra</i>	3.5325	2
千头椿 <i>Ailanthus altissima</i> cv. 'Qiantou'	3.8211	1	樱桃 <i>Cerasus pseudocerasus</i>	3.5151	2
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	3.8176	1	杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i>	3.5087	2
白杜 <i>Euonymus maackii</i>	3.8152	1	新疆杨 <i>Salix alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	3.4979	2
五角枫 <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i>	3.8088	1	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	3.4725	2
金叶榆 <i>Ulmus pumila</i> cv. 'Jinye'	3.8027	1	黑弹树 <i>Celtis bungeana</i>	3.4722	2
枣 <i>Ziziphus jujuba</i>	3.8004	1	馒头柳 <i>Salix matsudana</i> f. <i>umbraculifera</i>	3.4615	2
桑 <i>Morus alba</i>	3.7962	2	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	3.4591	2
山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i>	3.7903	2	美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	3.4358	2
楸 <i>Catalpa bungei</i>	3.7881	2	胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	3.4298	2
紫叶稠李 <i>Padus virginiana</i> cv. 'Canada Red'	3.7791	2	山荆子 <i>Malus baccata</i>	3.4212	2
楝 <i>Melia azedarach</i>	3.7758	2	悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	3.4210	2
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	3.7747	2	红花刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> f. <i>decaisneana</i>	3.4197	2
豆梨 <i>Pyrus calleryana</i>	3.7712	2	垂柳 <i>Salix babylonica</i> f. <i>babylonica</i>	3.4098	2
桤木 <i>Acer negundo</i>	3.7590	2	刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	3.4032	2
梓 <i>Catalpa ovata</i>	3.7575	2	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	3.3996	3
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	3.7485	2	北美乔松 <i>Pinus strobus</i>	3.3923	3
华山松 <i>Pinus armandii</i>	3.7443	2	苹果 <i>Malus pumila</i>	3.3839	3
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	3.7413	2	黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	3.3751	3
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	3.7352	2	香花槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> cv. 'idaho'	3.3751	3
挪威槭 <i>Acer platanoides</i>	3.7327	2	云杉 <i>Picea asperata</i>	3.3675	3
青檀 <i>Pteroceltis tatarinowii</i>	3.7261	2	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	3.3524	3
暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i> subsp. <i>amurensis</i>	3.7190	2	山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	3.3478	3
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	3.7145	2	毛楸 <i>Cornus walteri</i>	3.3257	3
元宝枫 <i>Acer truncatum</i>	3.7038	2	蒙椴 <i>Tilia mongolica</i>	3.3229	3
大叶朴 <i>Celtis koraiensis</i>	3.6837	2	玉兰 <i>Yulania denudata</i>	3.3226	3
槲栎 <i>Quercus aliena</i>	3.6713	2	胡桃 <i>Juglans regia</i>	3.3110	3
锐齿槲栎 <i>Quercus aliena</i> var. <i>acutiserrata</i>	3.6713	2	北美鹅掌楸 <i>Liriodendron tulipifera</i>	3.2692	3
合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	3.6660	2	冷杉 <i>Abies fabri</i>	3.2655	3
黄金树 <i>Catalpa speciosa</i>	3.6629	2	龙爪柳 <i>Salix matsudana</i> f. <i>tortuosa</i>	3.2641	3
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	3.6571	2	山核桃 <i>Carya cathayensis</i>	3.2541	3
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	3.6568	2	龙柏 <i>Juniperus chinensis</i> cv. 'Kaizuca'	3.2515	3
红豆杉 <i>Taxus wallichiana</i> var. <i>chinensis</i>	3.6482	2	秋子梨 <i>Pyrus ussuriensis</i>	3.2492	3
金叶槐 <i>Sophora japonica</i> cv. 'Golden'	3.6423	2	糠椴 <i>Tilia mandshurica</i>	3.2353	3
君迁子 <i>Diospyros lotus</i>	3.6376	2	望春玉兰 <i>Yulania biondii</i>	3.2126	3
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	3.6338	2	东京樱花 <i>Cerasus × yedoensis</i>	3.1062	3
柘 <i>Maclura tricuspidata</i>	3.6281	2	日本晚樱 <i>Cerasus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i>	2.9672	3
大果榆 <i>Ulmus macrocarpa</i>	3.6152	2			

乔松 (*Pinus strobus*)、黑松 (*Pinus thunbergii*)、云杉 (*Picea asperata*)、冷杉 (*Abies fabri*) 和龙柏 (*Juniperus chinensis* cv. 'Kaizuca')；灌木共22种，包括糯米条 (*Abelia chinensis*)、皱皮木瓜 (*Chaenomeles speciosa*)、香荚蒾 (*Viburnum farreri*)、三裂绣线菊 (*Spiraea trilobata*)、小花溲疏 (*Deutzia parviflora*) 等落叶灌木18种，以及铺地柏 (*Juniperus procumbens*)、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla*)、铺地龙柏 (*Sabina chinensis* cv. 'Kaizuca Procumbens') 和小叶黄杨 (*Buxus sinica* var. *parvifolia*) 4种常绿灌木；草本植物5种，包括高羊茅 (*Festuca*

elata)、大滨菊 (*Leucanthemum maximum*)、天蓝绣球 (*Phlox paniculata*)、蛇鞭菊 (*Liatris spicata*) 和假龙头花 (*Physostegia virginiana*)。3级植物的综合评价较低，可以在雄安新区公园绿地建设中有选择性地应用，如玉兰 (*Yulania denudata*)、望春玉兰 (*Yulania biondii*)、日本晚樱 (*Cerasus serrulata* var. *lannesiana*)、迎春花 (*Jasminum nudiflorum*)、丰花月季 (*Rosa cultivars*)、美人梅 (*Prunus × blireana* cv. 'Meiren') 等观赏性较高，但在生态适应性方面表现较差，需要更加注意植物的养护管理。

表3 雄安新区公园绿地灌木(含藤本)植物综合评价得分及等级
Table 3 Comprehensive evaluation scores and grades of shrubs (including lianas) for parks of Xiong'an New Area

植物种类 Plant species	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade	植物种类 Plant species	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade
接骨木 <i>Sambucus williamsii</i>	3.8314	1	锦带花 <i>Weigela florida</i>	3.2449	2
石榴 <i>Punica granatum</i>	3.7671	1	红瑞木 <i>Cornus alba</i>	3.2436	2
南蛇藤 <i>Celastrus orbiculatus</i>	3.6545	1	黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	3.2341	2
紫藤 <i>Wisteria sinensis</i>	3.6474	1	紫玉兰 <i>Magnolia liliflora</i>	3.2244	2
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	3.6378	1	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	3.2230	2
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	3.6340	1	金叶莢 <i>Caryopteris × clandonensis</i> cv. 'Worcester Gold'	3.2059	2
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	3.5920	1	叉子圆柏 <i>Juniperus sabina</i>	3.1986	2
火炬树 <i>Rhus typhina</i>	3.5901	1	杏梅 <i>Armeniaca mume</i> var. <i>bungo</i>	3.1915	2
榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i>	3.5852	1	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolium</i>	3.1814	2
紫丁香 <i>Syringa oblate</i>	3.5761	1	小叶巧玲花 <i>Syringa pubescens</i> subsp. <i>microphylla</i>	3.1767	2
枸杞 <i>Lycium chinense</i>	3.5401	1	山梅花 <i>Philadelphus incanus</i>	3.1611	2
楸子 <i>Malus prunifolia</i>	3.5268	1	珍珠绣线菊 <i>Spiraea thunbergii</i>	3.1583	2
鸡树条 <i>Viburnum opulus</i> subsp. <i>calvescens</i>	3.5259	1	紫叶矮樱 <i>Prunus × cistena</i>	3.1549	2
紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	3.5176	1	蜡实 <i>Kolkwitzia amabilis</i>	3.1479	2
山茱萸 <i>Cornus officinalis</i>	3.5110	1	风箱果 <i>Physocarpus amurensis</i>	3.1473	2
郁李 <i>Cerasus japonica</i>	3.5030	1	五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i>	3.1472	2
茶条枫 <i>Acer tataricum</i> subsp. <i>ginnala</i>	3.5023	1	辽梅山杏 <i>Armeniaca sibirica</i> var. <i>pleniflora</i>	3.1451	2
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	3.4968	1	枳 <i>Citrus trifoliata</i>	3.1401	2
西府海棠 <i>Malus × micromalus</i>	3.4786	1	平枝梅子 <i>Cotoneaster horizontalis</i>	3.1304	2
金叶风箱果 <i>Physocarpus opulifolius</i> var. <i>luteus</i>	3.4390	1	华北珍珠梅 <i>Sorbaria kirilowii</i>	3.1257	2
忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	3.4373	1	珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	3.1257	2
厚萼凌霄 <i>Campsis radicans</i>	3.4235	1	白鹃梅 <i>Exochorda racemosa</i>	3.1034	2
六道木 <i>Abelia biflora</i>	3.4151	1	糯米条 <i>Abelia chinensis</i>	3.0905	3
黄栌 <i>Cotinus coggygria</i>	3.4138	1	皱皮木瓜 <i>Chaenomeles speciosa</i>	3.0858	3
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	3.3885	2	香荚蒾 <i>Viburnum farreri</i>	3.0688	3
桃 <i>Amygdalus persica</i>	3.3870	2	三裂绣线菊 <i>Spiraea trilobata</i>	3.0616	3
海州常山 <i>Clerodendrum trichotomum</i>	3.3828	2	裂叶丁香 <i>Syringa persica</i> var. <i>laciniata</i>	3.0533	3
爬行卫矛 <i>Euonymus fortunei</i> var. <i>radicans</i>	3.3808	2	金叶女贞 <i>Ligustrum × vicaryi</i>	3.0506	3
鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	3.3725	2	小花溲疏 <i>Deutzia parviflora</i>	3.0393	3
木槿 <i>Hibiscus syriacus</i>	3.3600	2	棣棠花 <i>Kerria japonica</i>	3.0370	3
扶芳藤 <i>Euonymus fortunei</i>	3.3552	2	铺地柏 <i>Juniperus procumbens</i>	3.0326	3
金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	3.3509	2	迎春花 <i>Jasminum nudiflorum</i>	3.0114	3
流苏树 <i>Chionanthus retusus</i>	3.3475	2	北京黄丁香 <i>Syringa pekinensis</i>	3.0011	3
地锦 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	3.3348	2	大花溲疏 <i>Deutzia grandiflora</i>	2.9904	3
欧洲荚蒾 <i>Viburnum opulus</i>	3.3183	2	鸡麻 <i>Rhodotypos scandens</i>	2.9828	3
垂丝海棠 <i>Malus halliana</i>	3.3134	2	丰花月季 <i>Rosa cultivars</i>	2.9806	3
郁香忍冬 <i>Lonicera fragrantissima</i>	3.3003	2	大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	2.9553	3
藤蔓月季 <i>Climbing Roses</i>	3.2938	2	花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i>	2.9508	3
卫矛 <i>Euonymus alatus</i>	3.2927	2	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	2.9447	3
红丁香 <i>Syringa villosa</i>	3.2792	2	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>	2.9070	3
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> cv. 'Atropurpurea'	3.2670	2	铺地龙柏 <i>Sabina chinensis</i> cv. 'Kaizuca Procumbens'	2.9007	3
美人梅 <i>Prunus × blireana</i> cv. 'Meiren'	3.2612	2	小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>	2.8734	3
二乔玉兰 <i>Yulania × soulangeana</i>	3.2585	2	黑果荚蒾 <i>Viburnum melanocarpum</i>	2.8703	3
碧桃 <i>Amygdalus persica</i> cv. 'Duplex'	3.2569	2	紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> f. <i>atropurpurea</i>	2.8483	3
黄杨 <i>Buxus sinica</i>	3.2491	2			

3 讨论

3.1 雄安新区公园绿地植物评价指标选择

城市绿地植物评价的目标是构建能够全面、客观、准确反映植物综合特性的评价指标体系,许多学者从单个或多个方面提出了评价指标。史佑海和祝晓航提出以花型、花色、花香、花期、叶色、叶型、株型和果实特性等作为植物观赏性评价指标^[10]。为兼顾评价体系的简洁,本文将花型、花色、花冠大小、花香归结为花部观赏性一个指标,把叶型、叶色、叶大小等归结为叶片观赏性一个指标,这与童丽丽等的研究^[40]相似。童丽丽等以生态适应性、抗逆性、观赏价值、生态效益4个

方面为准则层^[40]。通过专家咨询,认为植物的抗逆性和生态适应性均反映植物对环境条件的适应能力,本研究将这3项指标归入生态适应性,与马多等的结果^[41]类似。与已有研究相比,本文以生态适应性、生物学特性、观赏价值、生态效益、经济价值、社会文化价值和环保安全7个方面为准则层,包含33项评价指标,能够更加全面客观地反映植物的综合特性^[24, 42]。

3.2 雄安新区公园绿地植物综合评价指标权重

本文将群决策和层次分析法相结合,整合多位专家观点,使得评价指标权重更加客观,从而构建出更加合理的雄安新区公园绿地植物综合评价体系^[43]。从7个准则层权重来看,生态适应性和观赏价值所占权重较大,说明在雄安新区公园绿

表4 雄安新区公园绿地草本植物综合评价得分及等级

Table 4 Comprehensive evaluation scores and grades of herbaceous plants for parks of Xiong'an New Area

植物种类 Plant species	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade	植物种类 Plant species	综合得分 Comprehensive score	等级 Grade
蜀葵 <i>Alcea rosea</i>	3.0215	1	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>	2.4832	2
马蔺 <i>Iris lactea</i>	2.9508	1	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	2.4776	2
千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i>	2.7936	1	剪秋罗 <i>Lychnis fulgens</i>	2.4648	2
野牛草 <i>Buchloe dactyloides</i>	2.7501	1	金光菊 <i>Rudbeckia laciniata</i>	2.4490	2
大花金鸡菊 <i>Coreopsis grandiflora</i>	2.7212	1	玉竹 <i>Polygonatum odoratum</i>	2.4236	2
萱草 <i>Hemerocallis fulva</i>	2.7185	1	八宝 <i>Hylotelephium erythrostictum</i>	2.4207	2
鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	2.6211	1	黑心金光菊 <i>Rudbeckia hirta</i>	2.4200	2
麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	2.6106	1	大苞萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i>	2.4131	2
石竹 <i>Dianthus chinensis</i>	2.5849	2	天人菊 <i>Gaillardia pulchella</i>	2.4008	2
白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	2.5321	2	高羊茅 <i>Festuca elata</i>	2.3237	3
桔梗 <i>Platycodon grandiflorus</i>	2.5208	2	大滨菊 <i>Leucanthemum maximum</i>	2.3153	3
玉簪 <i>Hosta plantaginea</i>	2.4978	2	天蓝绣球 <i>Phlox paniculata</i>	2.2574	3
母菊 <i>Matricaria chamomilla</i>	2.4883	2	蛇鞭菊 <i>Liatris spicata</i>	2.2361	3
紫羊茅 <i>Festuca rubra</i>	2.4837	2	假龙头花 <i>Physostegia virginiana</i>	2.0585	3

地植物选择时应优先考虑植物的生态适应性和观赏价值,这与钱兰华等关于苏州公园绿地树种综合评价的研究结果^[44]相似。但本文中生态适应性权重较观赏价值权重更大,可能是由于两地气候不同,专家对评价指标权重的取向不同。苏州属于亚热带季风海洋性气候,气候温和,雨量充沛,对植物的生态适应性要求不高;雄安新区属于暖温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雪,对生态适应性要求较高。同时,也表明不同城市由于地理、气候等方面的差异,虽然可以相互借鉴植物评价方面的经验,但不能全部照搬其他城市的评价体系,突显因地制宜进行植物综合评价的必要性^[45]。其次,根据国家对于雄安新区蓝绿空间建设的总体要求,生态优先,近自然经营得到高度重视,因此,在本评价体系中,专家在赋分时更重视生态适应性,生态适应性权重较高。

就33项指标层评价指标的综合权重而言,环保安全、抗旱能力、对动物的吸引力、抗寒能力、抗病虫害能力、抗污染能力、季相变化、花部观赏性、文化价值等9项指标的重要性较高。其中,环保安全相对于其他评价指标权重较大,主要原因在于未将该指标进行更细致的划分,比如植物是否有刺、异味、毒液、飞絮和花粉等。在绿地物种运用实践中,本研究所依据的600多种华北地区常用绿地植物已初步排除了具有入侵风险、火灾风险、有害生物和病虫害寄主等较大危害因素的物种,本研究在从中进一步筛选216种植物时,再次剔除有疑似较大上述风险的物种。因此,本研究未在环保安全指标中考虑上述因素。除环保安全之外的8项指标中,有4项指标属于生态适应性,2项指标属于观赏价值,这也与准则层中生态适应性和观赏价值权重较大相一致。

3.3 雄安新区公园绿地植物选择和配置

本研究结果显示,乡土植物的综合得分较高,如国槐、臭椿、杜梨(*Pyrus betulifolia*)、五角枫、白杜(*Euonymus maackii*)、桑(*Morus alba*)、榆树(*Ulmus pumila*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、白蜡树(*Fraxinus chinensis*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、元宝枫(*Acer truncatum*)、暴马丁香(*Syringa reticulata* subsp. *amurensis*)等,表明乡土植物对当地环境适应性更高。因此,在雄安新区公园绿地建设时,应优先选用乡土植物,不仅可以节约管理成本,同时还可以保护乡土植物资源^[46]。为提高公园绿地植物群落的多样性,可以选择一些综合特性评价较高的植物,如银杏、盐肤木(*Rhus chinensis*)、七叶树(*Aesculus chinensis*)、麻栎

(*Quercus acutissima*)、楸(*Catalpa bungei*)、黄金树、紫薇、连翘、榆叶梅(*Amygdalus triloba*)等。在配置公园绿地植物时,应以速生和慢生植物相结合,可以快速成景,保持园林景观的稳定性^[47]。可选速生物种如楸、黄金树、臭椿、杜梨、国槐、金叶槐、旱柳(*Salix matsudana*)等,可选慢生物种如油松、白皮松、黑松、侧柏、圆柏、银杏、黄连木、白杜、枣(*Ziziphus jujuba*)、柘(*Maclura tricuspidata*)等。公园植物景观应具有较大的季相变化,植物配置应注意一年三季或四季有景^[47]。可选春季景观植物如迎春花、连翘、山桃、玉兰、二乔玉兰(*Yulania × soulangeana*)、日本晚樱、东京樱花(*Cerasus × yedoensis*)、美人梅、榆叶梅等春季开花植物,辅以垂柳(*Salix babylonica* f. *babylonica*)、旱柳等春季发芽早的植物,形成嫩绿与红白相间的植物景观。夏季在整体绿色景观中配置紫荆(*Cercis chinensis*)、紫薇、忍冬、欧洲荚蒾(*Viburnum opulus*)、丰花月季(*Rosa cultivars*)、蜀葵、马蔺、萱草、鸢尾、石竹等夏季开花植物,加强景观效果。可选秋季景观植物有银杏、白蜡树、黄连木、黄栌(*Cotinus coggygria*)、杂交马褂木(*Liriodendron × sinoamericanum*)、北美红栎(*Quercus rubra*)、五角枫、元宝枫、美国红栎(*Fraxinus pennsylvanica*)等彩叶植物。冬季配置雪松、白皮松、楸、黄金树、银杏、望春玉兰、棣棠花(*Kerria japonica*)、红瑞木(*Cornus alba*)等株形或茎干观赏价值较高的植物,提升景观效果。

3.4 植物综合评价展望

目前植物评价标准的制定基本上是基于植物的形态特征及生长表现进行量化,缺乏具体测量数据标准,尤其是植物综合评价中的生态效益^[40-41]。在植物各项指标赋分过程中一般是根据前人的研究资料或野外观察进行赋分,结果可能存在一定的局限性和主观性^[41, 44]。今后宜在植物生态效益评价方面进行详细研究,使得评价结果更加准确、客观。

采用群决策方法,根据专家在构建判断矩阵时逻辑思维一致性强弱,能够客观地计算专家权重,保证综合评价体系构建过程各环节的客观性。但是利用群决策计算专家权重的方法较多,且未取得一致结论^[27],需进一步加强研究,获得更加客观的评价指标权重。

4 结论

本研究采用群决策和层次分析相结合的方法,从植物的

生态适应性、生物学特性、观赏价值、生态效益、经济价值、社会文化价值和环保安全方面,构建了雄安新区公园绿地植物综合评价体系,并对216种植物进行了综合性评价和分级。群决策方法能够较好整合专家权重,层次分析法给出的结果能够较好地反映植物的综合特性。根据综合评价结果将216种

植物分为3个等级,1级植物51种,2级植物116种,3级植物49种。研究结果可作为雄安新区公园绿地植物选择的重要依据。由于植物评价与应用地域性较强,本研究结果适用于雄安新区,也可应用于京津冀平原地区。由于物种量化评价指标的缺乏,将来应加强物种量化指标的观测和研究。

参考文献 [References]

- 1 Xiong YZ, Huang SP, Chen F, Ye H, Wang CP, Zhu CB. The impacts of rapid urbanization on the thermal environment: A remote sensing study of Guangzhou, South China [J]. *Remote Sens*, 2012, **4** (12): 2033-2056
- 2 邱国玉, 张晓楠. 21世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战[J]. 地球科学进展, 2019, **34** (6): 640-649 [Qiu GY, Zhang XN. China's urbanization and its ecological environment challenges in the 21st century [J]. *Adv Earth Sci*, 2019, **34** (6): 640-649]
- 3 Dang TN, Van DQ, Kusaka H, Seposo, XT, Honda Y. Green space and deaths attributable to the urban heat island effect in Ho Chi Minh City [J]. *Am J Public Health*, 2017, **108** (S2): 137-143
- 4 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山. 城市绿地的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2011, **31** (23): 7287-7300 [Su YX, Huang GQ, Chen XZ, Chen SS, Li ZS. Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (23): 7287-7300]
- 5 Vujcic M, Tomicevic-Dubljevic J, Zivojinovic I, Toskovic O. Connection between urban green areas and visitors' physical and mental well-being [J]. *Urban For Urban Green*, 2019, **40** (1): 299-307
- 6 Hasan R, Othman N, Ismail F. Choosing tree for urban fabric: role of landscape architect [J]. *Environ-Behav Proc J*, 2018, **3** (7): 199-207
- 7 闫晓云, 张秋良, 韩鹏, 王欣然. 呼和浩特市绿化树种综合评价及树种选择[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25** (3): 135-140 [Yan XY, Zhang QL, Han P, Wang XR. Comprehensive assessment and selection for urban tree species in Hohhot [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2011, **25** (3): 135-140]
- 8 刘扬, 谭梓峰. 湖南珍稀植物观赏特性评价[J]. 湖南林业科技, 1996, **23** (4): 59-63 [Liu Y, Tan ZF. Evaluation on ornamental characteristics of rare plants in Hunan [J]. *Hunan For Sci Technol*, 1996, **23** (4): 59-63]
- 9 Dunwell WC, Fare D, Arnold MA, Tilt K, Knox G, Witte W, Knight P, Pooler M, Klingeman W, Niemiera A, Ruter J, Yeager T, Ranney T, Beeson R, Lindstrom J, Bush E, Owings A, Schnelle M. Plant evaluation program for nursery crops and landscape systems by the southern extension and research activities/information exchange Group-27 [J]. *Hort Technol*, 2001, **11** (3): 373-375
- 10 史佑海, 祝晓航. 海口市城市公园主要观花树种资源及观赏特性评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, **38** (S1): 118-124 [Shi YH, Zhu XH. Resources of flowering trees & shrubs and quantitative evaluation of ornamental characters in urban parks of Haikou [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2014, **38** (S1): 118-124]
- 11 Yu X, Kikuchi A, Matsunaga E, Morishita Y, Nanto K, Sakurai N, Suzuki H, Shibata D, Shimada T, Watanabe KN. Establishment of the evaluation system of salt tolerance on transgenic woody plants in the special netted-house [J]. *Plant Biotechnol*, 2009, **26** (5): 135-141
- 12 Lin WH, Hofmann RW, Stilwell SA. Physiological responses of five species of Trifolium to drought stress [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, **17** (4): 580-584
- 13 Shin CS, Li H. Drought resistance assessment of four shrub species including nandina domestica for extensive green roof [J]. *Korean J Agric For Meteorol*, 2014, **16** (4): 267-273
- 14 王倩, 关雪莲, 胡增辉, 卢存福, 冷平生. 3种景天植物叶片结构特征与抗寒性的关系 [J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (2): 280-285 [Wang Q, Guan XL, Hu ZH, Lu CF, Leng PS. Relationship between cold tolerance and leaf structure of the three species of Sedum [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (2): 280-285]
- 15 张艳丽, 费世民, 李智勇, 孟长来, 徐嘉. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报, 2013, **33** (12): 3878-3887 [Zhang YL, Fei SM, Li ZY, Meng CL, Xu J. Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (12): 3878-3887]
- 16 Li Y, Wang S, Chen Q. Potential of thirteen urban greening plants to capture particulate matter on leaf surfaces across three levels of ambient atmospheric pollution [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, **16** (3): 402-413
- 17 沈鑫, 柳新红, 蒋冬月, 李因刚. 枫香等22种常见园林植物滞尘与抑菌能力评价[J]. 东北林业大学学报, 2019, **47** (1): 65-70 [Shen X, Liu XH, Jiang DY, Lin YG. Evaluation of dust retention and antimicrobial effect of 22 common landscape plants including *Liquidambar formosana* [J]. *J NE For Univ*, 2019, **47** (1): 65-70]
- 18 唐小清, 李许文, 张莎, 陈红锋. 广州市生态景观林带建设树种筛选评价[J]. 中国园林, 2015, **31** (3): 76-80 [Tang XQ, Li XW, Zhang S, Chen HF. Screening and evaluation of plants for ecological landscape forest belt construction in Guangzhou [J]. *Chin Landscape Archit*, 2015, **31** (3): 76-80]
- 19 孙正芝, 王荃, 肖振山, 薛秋华. 福州引种10种唇形科芳香植物综合评价及其适应性研究[J]. 亚热带植物科学, 2019, **48** (3): 274-279 [Sun ZZ, Wang Q, Xiao ZS, Xue QH. Comprehensive evaluation and adaptability of 10 Labiatae aromatic plants introduced in Fuzhou [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2019, **48** (3): 274-279]
- 20 朱倩玉, 姜新强, 刘庆超, 王奎玲, 刘庆华. 青岛地区彩叶树种的综合评价研究[J]. 中国农学通报, 2016, **32** (31): 13-19 [Zhu QY, Jiang XQ, Liu QC, Wang KL, Liu QH. Comprehensive evaluation of colored-leaf trees in Qingdao [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, **32** (31): 13-19]
- 21 杨东, 万福绪. 上海海岸防护林树种选择综合评价体系的构建和应用[J]. 广东农业科学, 2014, **41** (4): 223-226 [Yang D, Wan FX. Construction and application of comprehensive evaluation system in tree species selection for Shanghai coastal protection forest [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2014, **41** (4): 223-226]
- 22 鲁敏, 孔亚菲, 徐杨, 王云龙. 济南市居住区绿化植物生态效能综合评价研究[J]. 山东建筑大学学报, 2015, **30** (5): 409-415 [Lu M, Kong YF, Xu Y, Wang YL. Comprehensive evaluation of ecological effect of Jinan residential area greening plants [J]. *J Shandong Jianzhu Univ*, 2015, **30** (5): 409-415]

- 23 李旭冉, 李瑾奕, 龙辉, 咎玉宏. 徐州市行道树树种调查及综合评价[J]. 中国城市林业, 2015, **13** (4): 29-33 [Li XR, Li JY, Long H, Zan YH. Investigation and comprehensive evaluation of street tree species in Xuzhou [J]. *J Chin Urban For*, 2015, **13** (4): 29-33]
- 24 谭广文, 黄玉, 魏蓉. 深圳滨海公园植物综合评价与应用[J]. 中国园林, 2019, **35** (1): 118-122 [Tan GW, Huang Y, Wei R. Comprehensive evaluation and application of plants in Shenzhen coastal park [J]. *Chin Landscape Archit*, 2019, **35** (1): 118-122]
- 25 林绍生, 李华芬, 陈义增. 应用模糊数学评价观叶植物的观赏性[J]. 亚热带植物通讯, 2000, **29** (2): 43-47 [Lin SS, Li HF, Chen YZ. The evaluation of ornamental value of foliage plants using fuzzy mathematics [J]. *Subtrop Plant Res Commun*, 2000, **29** (2): 43-47]
- 26 张春锋, 殷鸣放, 刘海荣, 滕德奖, 王金英. 灰色关联度分析在树种综合评价中的应用[J]. 西北林学院学报, 2007, **22** (1): 70-73 [Zhang CF, Yin MF, Liu HR, Teng DJ, Wang JY. Grey relational analysis in the comprehensive appraisal to tree species [J]. *J Northwest For Univ*, 2007, **22** (1): 70-73]
- 27 高阳, 罗贤新, 胡颖. 基于判断矩阵的专家聚类赋权研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, **31** (3): 593-596 [Gao Y, Luo XX, Hu Y. Research on methods for deriving experts' weights based on judgment matrix and cluster analysis [J]. *Syst Eng Electron*, 2009, **31** (3): 593-596]
- 28 艾春晓, 刘圣维, 胡依然. 北京市居住区植物景观现状调查研究[J]. 中国农学通报, 2013, **29** (7): 215-220 [Ai CX, Liu SW, Hu YR. Research and analysis of plant landscape in residential areas in Beijing [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, **29** (7): 215-220]
- 29 王四清, 贾佳, 王毅. 北京市太阳宫公园植物调查与配置分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32** (S1): 156-162 [Wang SQ, Jia J, Wang Y. Investigation and analysis of plant arrangement in Taiyanggong Park, Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, **32** (S1): 156-162]
- 30 薄伟, 秦国杰, 刘琛彬, 康红梅, 武敏, 王松. 山西大同城市园林植物资源应用调查与分析[J]. 北方园艺, 2019, **13** (21): 56-63 [Bo W, Qin GJ, Liu CB, Kang HM, Wu M, Wang S. Investigation and analysis on the landscape plants applied in Datong city [J]. *Northern Hortic*, 2019, **13** (21): 56-63]
- 31 刘美珍. 山西忻州市园林绿化树种调查[J]. 中国园艺文摘, 2012, **28** (8): 59-60 [Liu MZ. Investigation of garden greening tree species in Xinzhou city, Shanxi [J]. *Chin Hortic Abstr*, 2012, **28** (8): 59-60]
- 32 冀亚伟. 河北省城市园林绿化树种调查及规划[D]. 河北: 河北农业大学, 2011 [Ji YW. Investigation and panning of urban landscaping greening tees species of Hebei province [D]. Hebei: Hebei Agricultural University, 2011]
- 33 Saaty TL. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. *J Math Psychol*, 1977, **15** (1): 234-281
- 34 王金枝, 颜亮, 吴海东, 康晓明. 基于层次分析法研究藏北高寒草地退化的影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26** (1): 17-24 [Wang JZ, Yan L, Wu HD, Kang XM. Study of alpine grassland degradation in northern Tibet based on an analytical hierarchy process [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, **26** (1): 17-24]
- 35 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988 [Xu SB. Practical decision making method - analytic hierarchy process principle [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988]
- 36 王元云, 何奕忻, 鞠佩君, 朱求安, 刘建亮, 陈槐. 层次分析法在若尔盖湿地退化研究中的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (1): 46-52 [Wang YY, He YX, Ju PJ, Zhu QA, Liu JL, Chen H. Application of analytic hierarchy process in wetland degradation research [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (1): 46-52]
- 37 吴泽宁, 张文鸽, 管新建. AHP中判断矩阵一致性检验和修正的统计方法[J]. 系统工程, 2002, **20** (3): 67-71 [Wu ZN, Zhang WG, Guan XJ. A statistical method to check and rectify the consistency of a judgment matrix [J]. *Syst Eng*, 2002, **20** (3): 67-71]
- 38 陈乔婧, 彭祚登. 层次分析法在北京西山风景游憩林树种选择中的应用[J]. 河北林果研究, 2010, **25** (2): 185-189 [Chen QJ, Peng ZD. The appliance of analytic hierarchy in tree species selection for scenic & recreational forest of Beijing Xishan Mountain [J]. *Hebei J For Orchard Res*, 2010, **25** (2): 185-189]
- 39 孙海滨, 刘佳胜. 哈尔滨乡土树种综合评价[J]. 吉林农业, 2012, **17** (2): 182+145 [Sun HB, Liu JS. Comprehensive evaluation of native tree species in Harbin [J]. *Jilin Agric*, 2012, **17** (2): 182+145]
- 40 童丽丽, 吴祝慧, 王哲宇, 许晓岗, 汤庚国. 层次分析法与熵技术评价在南京城市绿化生态树种选择中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38** (9): 58-61 [Tong LL, Wu ZH, Wang ZY, Xu XG, Tang GG. Application of entropy technology and AHP to comprehensive evaluation and selection of urban afforestation trees in Nanjing city [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38** (9): 58-61]
- 41 马多, 林建勇, 郑焱, 陈心明. 南宁市公园滨水绿地树种应用评价[J]. 广西林业科学, 2015, **44** (1): 71-75 [Ma D, Lin JY, Zheng X, Chen XM. Evaluation on the tree species of park waterfront green space in Nanning [J]. *Guangxi For Sci*, 2015, **44** (1): 71-75]
- 42 Reubens B, Moeremans C, Poesen J, Nyssen J, Tewoldeberhan S, Franzel S, Deckers J, Orwa C, Muys B. Tree species selection for land rehabilitation in Ethiopia: from fragmented knowledge to an integrated multi-criteria decision approach [J]. *Agrofor Syst*, 2011, **82** (3): 303-330
- 43 李慧敏, 丰远平, 黄德英, 王家齐, 康妮. 基于层次分析法和群决策的湿地植物评价筛选[J]. 环境科学与技术, 2019, **42** (11): 232-236 [Li HM, Feng YP, Huang DY, Wang JQ, Kang T. Evaluation and selection of wetland plants based on analytic hierarchy process and group decision [J]. *Environ Sci Technol*, 2019, **42** (11): 232-236]
- 44 钱兰华, 戴培培, 刘备, 盛晴. 苏州市公园绿地优良乡土树种的综合评价[J]. 安徽农业科学, 2014, **42** (11): 3319-3321+3406 [Qian LH, Dai PP, Liu B, Sheng Q. Comprehensive evaluation of excellent native tree species in green space of parks in Suzhou city [J]. *J Anhui Agri Sci*, 2014, **42** (11): 3319-3321+3406]
- 45 卞阿娜, 王文卿. 城市园林植物评价的研究进展[J]. 漳州师范学院学报(自然科学版), 2005, **20** (4): 67-72 [Bian AN, Wang WQ. The research progress of the urban park plant evaluation [J]. *J Zhangzhou Teach Coll, Nat Sci*, 2005, **20** (4): 67-72]
- 46 孙卫邦. 乡土植物与现代城市园林景观建设[J]. 中国园林, 2003, **13** (7): 63-65 [Sun WB. Importance of indigenous plants in their application to the modern urban landscape architecture [J]. *Chin Landscape Archit*, 2003, **13** (7): 63-65]
- 47 李淑凤. 北京公园绿地中的植物配置[J]. 中国园林, 1995, **9** (3): 34-39 [Li SF. Plant configuration in Beijing park green space [J]. *Chin Landscape Archit*, 1995, **9** (3): 34-39]