

DOI: 10.5846/stxb202005121189

王洋洋, 黄锦楼. 基于绿视率的城市生态舒适度评价模型构建. 生态学报, 2021, 41(6): 2170-2179.

Wang Y Y, Huang J L. Construction of evaluation model of urban ecological comfort index based on green view index. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2170-2179.

基于绿视率的城市生态舒适度评价模型构建

王洋洋^{1,2}, 黄锦楼^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 城市生态系统服务指人类从城市生态系统中获取的利益, 城市绿色空间是提供城市生态系统服务的主要载体。而城市化进程的加快对城市绿色空间的存量造成威胁, 城市生态系统服务难以达到居民需求。传统的城市绿色空间评价指标集中于对城市绿地面积的评价, 指标偏向整体性和二维化, 忽视了三维绿量, 也鲜少关注生态系统服务质量。基于以上背景提出了一个城市生态系统服务功能评价指标——城市生态舒适度, 通过人体的主观感受对城市生态系统服务功能做出质量反馈, 并结合灰色关联分析法构建了该指标的评价模型。通过样本的条件对比分析得出, 当绿视率水平低于 30% 时, 城市生态舒适度的主要影响因子为绿视率; 当绿视率水平高于 30% 时, 则是湿度、PM_{2.5} 浓度和风力等级。将评价模型的模拟结果与实测值进行对比验证, 结果显示二者的变化趋势基本相同, 表明评价模型科学有效。

关键词: 城市生态舒适度; 绿视率; 城市绿色空间; 城市生态系统服务; 灰色关联分析模型

Construction of evaluation model of urban ecological comfort index based on green view index

WANG Yangyang^{1,2}, HUANG Jinlou^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract: Urban ecosystem services refer to the benefits that mankind obtains from urban ecosystems. Urban green space is the main carrier for providing urban ecosystem services. The acceleration of the urbanization process poses a threat to the stock of urban green space. It is difficult for urban ecosystem services to meet the residents demand. The traditional urban green space evaluation indicators mainly evaluate the urban green space area. Those indicators are always integrated and two-dimensional, ignoring the three-dimensional green quantity and the quality of ecosystem services. Based on the above background, this paper proposes an evaluation indicator of urban ecosystem service function—urban ecological comfort index, which makes quality feedback on the urban ecosystem service function through the subjective feelings of the human body. Combined with the grey correlation analysis method, the evaluation model of the index is constructed. Through the comparative analysis of the conditions of the samples, it is concluded that when the green view index is lower than 30%, the main influencing factor of urban ecological comfort index is green view index; when the green view index is higher than 30%, the main influencing factors are humidity, PM_{2.5} concentration, and wind power level. Comparing the simulation results of the evaluation model with the measured values, the results show that the change trends of two sets of data are basically the same, indicating that the evaluation model is scientific and effective.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500702)

收稿日期: 2020-05-12; **网络出版日期:** 2021-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlhuang@rcees.ac.cn

Key Words: urban ecological comfort index; green view index; urban green space; urban ecosystem service; grey relation analysis model

城市生态系统服务指人类从城市生态系统中获取的利益^[1-2]。生态系统服务一般分为支持服务、供给服务、调节服务和文化服务四类。在城市生态系统中,支持服务仍是其他服务的基础,供给服务相对较弱,调节服务和文化服务突出^[3]。人是城市的主体,居民福祉是城市生态系统服务的目的,城市绿色空间是提供城市生态系统服务的主要载体。调节服务的主要作用在于改善城市环境质量和居民生理健康,如净化空气,减缓热岛效应,吸收噪音等。文化服务则是居民心理健康的重要保障。城市绿色空间为生活在高密度城市中的居民提供了重要的缓冲地带,使其放松身心,缓解压力,减少负面情绪。已有研究证实城市绿色空间与居民健康水平和生活质量密切相关^[4]。

伴随城市化进程的加快,城市建设与生态系统保护之间的矛盾日益突出^[5]。城市人口密度激增,为满足其生产生活需求,城市工程建设不断扩张,导致可用的城市绿色空间存量不断减少^[6]。在此前提下,如何提高城市绿色空间的质量,提供更多生态系统服务,成为亟待解决的问题^[7]。

城市生态系统高度人工化,完善的评价指标体系是指导其规划和管理的核心和基础^[8]。城市生态系统服务的主要评价方法有指标评价法、价值评估法及模型模拟法,其中指标评价法的应用最为广泛,也是生态系统服务评价的重要前提与基础^[9]。目前我国在指导城市绿色空间规划时常用的评价指标主要是城市绿地面积占比和人均绿地面积这两类,关注数量而忽视了质量^[10]。

基于以上背景,本文提出了一个城市生态系统服务功能评价指标——城市生态舒适度,通过人体的主观感受对城市生态系统服务功能做出质量反馈。城市生态系统的调节服务和文化服务直接影响人体感受,所以人在某处感受到的生态舒适程度可以反映此处生态系统服务的良好程度。在目前的评价指标体系偏向宏观性和整体性的前提下,更加关注需求方,即人类个体的感受。以人为本,从需求出发,明确什么样的城市生态系统能为居民更好地提供生态系统服务,有利于改善生态系统服务供需失衡^[11-12]。完善城市生态系统服务评价指标体系,从全新的角度出发,为城市生态系统规划提供科学依据。

1 研究区域

结合 Google Earth pro 软件在北京市城区内选取不同绿化水平的 7 块样地,在每块样地内分不同时间批次随机采集样本,样本数据作为构建数学评价模型的基础数据,表 1 为各样地的基本信息。

表 1 样地信息表
Table 1 The information of sample plots

样地编号 Sample plot No.	地点 Location	绿化覆盖率/% Green coverage ratio	样地面积 Area	样本数量 Number of samples
1	奥森公园南广场	0	30 m×50 m	6
2	万优汇购物中心	5.71	68 m×116 m	4
3	中科院心理研究所	15.63	78 m×47 m	3
4	清华东路西口	25.65	145 m×57 m	7
5	北京林业大学西区食堂	37.27	146 m×33 m	14
6	北京林业大学实验楼北侧	44.58	55 m×25 m	6
7	北京林业大学南门	52.31	100 m×85 m	16

2 研究方法

2.1 城市生态舒适度评价指标体系构建

城市生态舒适度旨在通过一个局部小环境内各生态因子综合作用达到的舒适程度衡量此处的生态系统

服务质量。评价指标体系的选择应满足指标的作用效果对人的主观舒适程度有明显影响,并可以反映生态系统服务效果这两个标准。

(1) 绿视率

当处在一个环境中时,视觉是观察和感受事物最主要的通道,一般可以获得 80% 以上的周围环境信息,生态质量好坏会在第一时间反映在视觉感受上,视觉舒适度在很大程度上影响整体的生态舒适程度^[13]。绿色植被不仅可以调节城市小气候,吸收有害气体,还可以缓解居民的心理压力,改善情绪,对居民的生理和心理健康起积极作用^[14]。绿视率具有时间和空间上的异质性,适用于局部小环境间的生态质量评价和比较^[15]。同时绿视率的使用也能弥补传统二维评价指标的不足,更加精细化、人性化,有利于在高密度城区的用地几乎已经饱和的情况下,发展二次绿化^[16-17]。故选取绿视率作为城市生态舒适度评价的首要指标,从视觉角度反映生态系统质量。

传统的绿视率定义为人眼视野范围内绿色植被所占比例^[18],单指某一方向。在城市生态舒适度研究中,单一方向的绿视率过于片面,不能反映综合效应。故采用的绿视率指标为观测者一周四个方向的绿视率平均值,反映所处环境的整体视觉舒适程度。

在视觉舒适度的基础上,还补充了 4 个指标反映体感舒适度,综合作用做出城市生态舒适度评价。

(2) 气候因素

研究表明,对体感舒适程度影响最为突出的是热环境^[19]。目前国内通用的人居环境气候舒适度评价国家标准采用温湿指数和风效指数衡量气候的适宜程度。其中夏半年使用温湿指数,指数的计算采用温度和湿度两个指标;冬半年使用风速指数,指数的计算采用温度、风速和日照对数 3 个指标。本文借鉴此标准,选取温度、湿度、风力等级 3 个指标加入城市生态舒适度的评价指标体系,从体感角度衡量环境的舒适程度。城市生态系统应具备良好的调节微气候,降温增湿等作用,这 3 个指标的表现水平也是反映此处生态系统服务质量的有效指标^[20]。

(3) 空气质量

近年来,工业化和城市化的快速发展,给全球带来了巨大的环境负荷,特别是 PM_{2.5} 污染,对人体健康造成了极大的负面影响^[21]。有研究指出,PM_{2.5} 平均增大 10 μg/m³ 时,死亡率将增加 0.98%,其引起的呼吸系统疾病死亡率将增加 1.68%^[22]。城市居民暴露在 PM_{2.5} 浓度高的环境中,对身体健康造成损害的同时也直接影响到人体的舒适程度^[23]。城市生态系统具有杀灭空气中的细菌,吸收毒害气体,净化空气等作用,所以空气质量也是衡量生态系统服务质量的一个标准。故本文选取空气 PM_{2.5} 浓度衡量空气质量,作为城市生态舒适度评价指标体系中的一个指标。

2.2 样本采集

7 块样地上空卫星图及各样地内的样本分布情况如图 1。在不同绿化水平的 7 块样地内共采集 56 个样本,记录样本点经纬度、样本采集时间、绿视率、温度、湿度、空气 PM_{2.5} 浓度、风力等级等信息。同时收集观测者对样本点处的生态舒适程度的主观打分,10 分为满分,同一块样地内的样本舒适度打分来自同一名观测者,打分将用于在各绿化水平下各指标对生态舒适度的影响作用的定性分析。

绿视率数据采集方式:使用照相机在观测点处朝向前、后、左、右 4 个方向分别平视拍摄一张照片作为绿视率观测图像^[24-25],如图 2。使用本文自主开发的绿视率计算算法计算每张观测图像的绿视率值,再将每个观测点处四张观测图像的绿视率值求平均,即为此处的绿视率^[26-27]。本文开发的绿视率自动算法原理为:遍历像素矩阵,对每个像素点进行基于 HSV 色彩模式的阈值判断,符合条件视为绿色像素点,再计算绿色像素点数量占像素点总数的比例,即为此图像的绿视率值。经验证此算法基本可靠,可以准确反映观测图像的绿视率水平,且节省人力,大幅提高工作效率。

每张观测图像的绿视率值计算公式为:

$$GVI_i = \frac{n_g}{n_i} \times 100\% \quad (1)$$

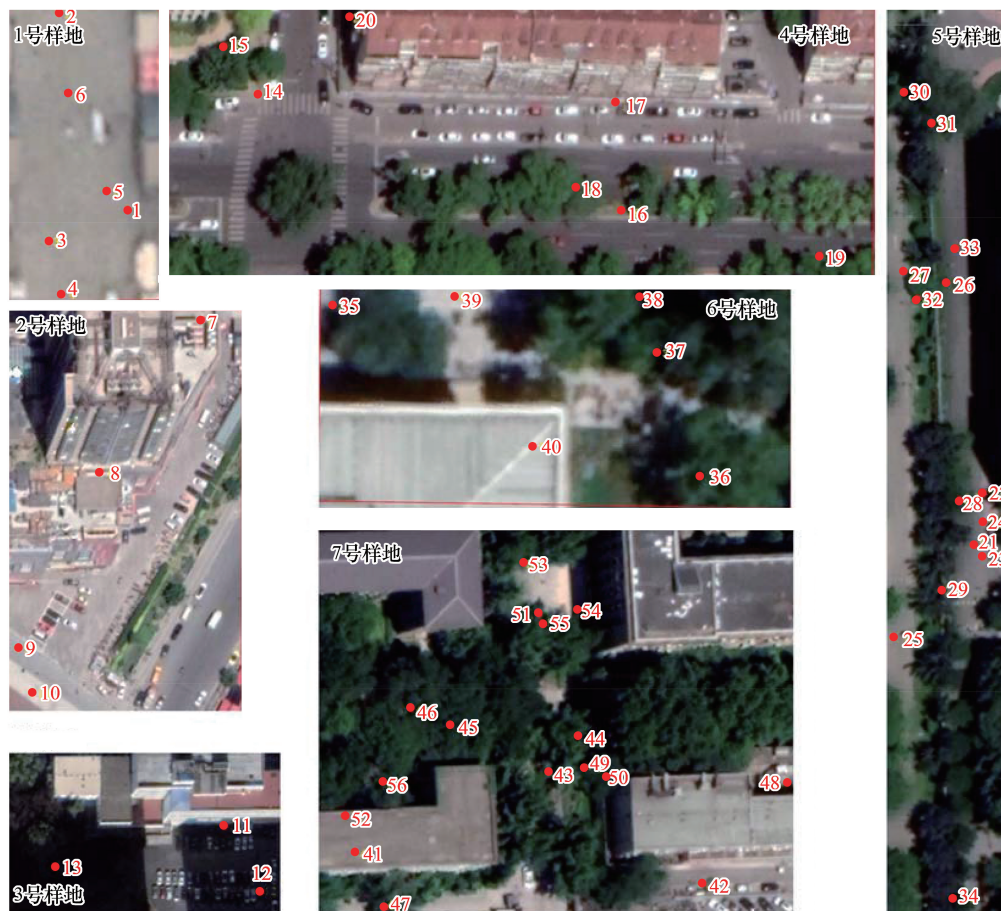


图1 样地卫星图及样本分布

Fig.1 Satellite image of sample plots and distribution of samples

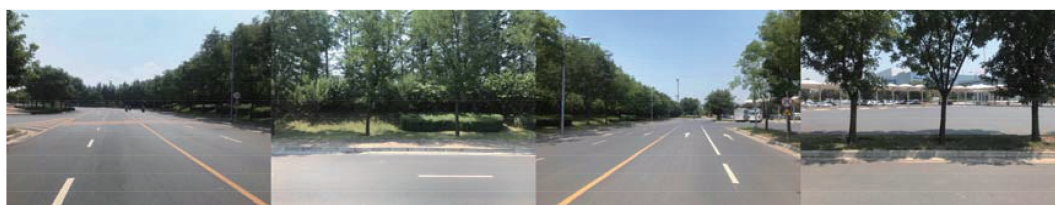


图2 绿视率观测图像示例

Fig.2 Example of green view index observation images

式中, GVI_i 为第 i 个方向下的绿视率值; n_g 为此观测图像内绿色像素点数量; n_t 为此观测图像的像素点总量。

每个观测点处的绿视率计算方式为:

$$GVI = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 GVI_i \quad (2)$$

样本均采集于2019年8月8日至8月31日,各样地内样本的采集日期及样本编号见表2。8月份正值盛夏,植物茂盛,长势处于全年最佳时期,有利于绿视率研究的开展。且夏季植物的蒸腾作用强,降温增湿效果也较其他时节更为显著,生态系统服务质量更高。

2.3 基于灰色关联分析的综合评价模型构建

灰色关联分析法是灰色系统分析法中的一种,是依据各因素数列曲线形状的接近程度做发展态势的分

析^[28]。灰色关联分析法对于数据的数量和样本规律性没有太多要求,仅仅把主观表象的数据模型化、抽象化、简便化,使所灰色系统的结构、因素及运行方式等方面由黑变白,逐渐明确,现已广泛应用于各学科领域^[29]。

表 2 采样信息表

Table 2 Sampling information

样地编号 Sample plot No.	地点 Location	采样月-日 (Mon-Day) Sampling date	样本编号 Samples No.
1	奥森公园南广场	8月14日、8月19日	1—6
2	万优汇购物中心	8月10日、8月31日	7—10
3	中科院心理研究所	8月17日	11—13
4	清华东路西口	8月9日—8月10日、8月16日—8月17日	14—20
5	北京林业大学西区食堂	8月8日—8月10日、8月12日、8月16日—8月20日	21—34
6	北京林业大学实验楼北侧	8月12日、8月14日、8月16日、8月17日	35—40
7	北京林业大学南门	8月9日、8月11日—8月17日	41—56

城市生态舒适度受多个指标影响,这些不确定因素的相互作用,相互牵制,综合影响,使得城市生态舒适度系统成为一个灰色系统。以 56 个样本为基础数据,根据灰色系统的行为特征数据,充分利用数据和信息寻找各指标之间的数学关系,建立相应的数学模型,即城市生态舒适度综合评价模型。

灰色关联分析模型求解的过程如下^[30]:

(1) 收集关联数据,选择参考序列 $R_0 = (r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0n})$, 比较序列 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$, 并得到评价矩阵 R 。

$$R = [r_{ij}] m \times n \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, r_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个指标数据; m 为评价对象个数; n 为指标个数。

(2) 对数据化处理后的矩阵进行数据变换,标准化处理数据得到无量纲标准化矩阵 $X = [x_{ij}] m \times n$, x_{ij} 为标准化处理后的评价矩阵指标数据。本文采用 Z-score 标准化方式,其公式为:

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (4)$$

式中, σ 为标准差

(3) 求差序列 $\Delta_{0j}(j)$ 、两级最大差 $\Delta_{\max}$ 和最小差 $\Delta_{\min}$:

$$\Delta_{0i}(j) = |x_{0j} - x_{ij}| \quad (5)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}| \quad (6)$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}| \quad (7)$$

式中, x_{0j} 为标准化处理后的参考序列数据。

(4) 计算灰色关联系数 $\xi_{0i}(j)$:

$$\xi_{0i}(j) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(j) + \rho \Delta_{\max}} \quad (8)$$

式中, ρ 为取值在 0—1 之间的相关系数,一般取值为 0.5。

(5) 计算关联度 φ_{0i} :

$$\varphi_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{0i}(j) \quad (9)$$

2.4 综合评价模型中的指标赋权与调整

通过灰色关联模型计算得到的各样本相对于参考序列的关联度即为综合评价结果,也就是该样本的城市生态舒适度。但按照公式(9)计算关联度时,各个指标不涉及权重影响,导致各影响因素的个性被平均化而

掩盖,故在做综合评价时应对各指标加权。

首先对模型中的各个指标进行初步赋权,将权重代入模型再次计算各样本的关联度。将所有样本得到的关联度与最初观测者的舒适程度主观打分做线性回归拟合,查看拟合优度,以验证此权重的合理性。再不断调整各指标的权重,重复这个过程,直到拟合优度达到最优,选取此时的权重为最终权重。代入权重后的关联度计算公式为:

$$\varphi_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_j \times \xi_{0i}(j) \quad (8)$$

式中, W_j 为各指标权重。

3 结果与分析

3.1 不同绿化水平下各指标对舒适程度主观打分的影响作用

使用比较归纳法对每块样地内的样本进行对比分析,比较在不同绿化水平下各指标对观测者的舒适程度打分的影响作用。

首先以 5 号样地中午时段样本为例,样本信息见表 3。23、24、28 号样本采集于 8 月 9 日和 16 日的中午时段,其中 23 号和 24 号样本除绿视率外其他指标水平相近。相较于其他两个样本,28 号样本的温度和湿度更低,空气质量更好,且有风,但在观测者的主观打分上并未呈现优势。而 23 号样本即使其他指标表现一般,但绿视率最高,舒适程度打分也最高。可初步说明,在此绿化水平下,绿视率对舒适程度主观打分的影响作用较其他指标更为突出。

表 3 5 号样地中午时段样本对比

Table 3 Sample comparison of the noon time of the sample plot 5#

样本编号 Sample No.	温度/℃ Temperature	湿度/% Humidity	PM _{2.5} 浓度/(μg/m ³) PM _{2.5} concentration	风力等级 Wind scale	绿视率/% Green view index	舒适程度打分 Comfort score	采集时间 Sampling time
23	31	65	74	西北风微风	40.99	9	08-09 12:31
24	31	65	69	西北风微风	24.45	8	08-09 12:43
28	30	40	21	北风 4—5 级	21.22	8	08-16 12:51

再以 7 号样本中午时段样本为例,样本信息见表 4。41、45、54 号样本采集于 8 月 9 日、12 日、17 日中午时段,3 个样本温度相同。其中 54 号样本的湿度最低,空气质量最好,且有风,尽管绿视率水平不高,依旧获得最高的舒适程度主观打分。而 45 号样本的湿度较 54 号明显更高,即使绿视率水平最高,舒适程度主观打分也并不高。可初步说明,在此绿化水平下,绿视率不再是影响舒适程度主观打分的最主要的指标,此时湿度的影响作用更为突出,同时 PM_{2.5}浓度和风力等级也较强的影响作用。

表 4 7 号样地中午时段样本对比

Table 4 Sample comparison of the noon time of the sample plot 7#

样本编号 Sample No.	温度/℃ Temperature	湿度/% Humidity	PM _{2.5} 浓度/(μg/m ³) PM _{2.5} concentration	风力等级 Wind scale	绿视率/% Green view index	舒适程度打分 Comfort score	采集时间 Sampling time
41	30	66	74	西北风微风	24.75	4	08-09 12:04
45	30	51	26	北风 4—5 级	50.66	4	08-12 12:06
54	30	29	22	北风 3—4 级	27.34	6	08-17 13:00

按上述方法对 7 块样地内所有时段的样本一一进行对比分析和归纳,得到在每个绿化水平下对观测者的舒适程度打分的影响作用较强的一个或几个指标,结果如表 5 所示。

由表 5 当绿化水平在 40%以下时,主要影响指标以绿视率为主;当绿化水平高于 40%时,绿视率的影响作用减弱,湿度成为主要的影响因子,同时 PM_{2.5}浓度和风力等级的影响作用也较为突出。根据绿化覆盖率与

绿视率水平对应关系规律可以知道,绿化覆盖率为 40%时对应的绿视率水平一般为 30%左右。也就是说,当绿视率水平较低时,绿视率对观测者舒适程度主观打分的影响作用最大;当绿视率水平达到 30%左右时,绿视率影响强度减弱,湿度、风力等级和 PM_{2.5}浓度的影响作用增强,成为主要影响因子。

表 5 各绿化水平下观测者舒适程度主观打分的主要影响指标

Table 5 Main influencing indicators of subjective scoring of comfort level under various greening levels			
样地编号 Sample plot No.	地点 Location	绿化覆盖率/% Green coverage	主要影响指标 Main influencing indicators
1	奥森公园南广场	0	绿视率,PM _{2.5} 浓度
2	万优汇购物中心	5.17	绿视率,湿度,风力等级
3	中科院心理研究所	15.63	绿视率
4	清华东路西口	25.65	绿视率
5	北京林业大学西区食堂	37.27	绿视率
6	北京林业大学实验楼北侧	44.58	湿度,PM _{2.5} 浓度,风力等级
7	北京林业大学南门	52.31	湿度,风力等级,PM _{2.5} 浓度

3.2 灰色关联模型构建

由表 5,将 7 块样地的 56 个样本分为两组进行数学模型计算。1—5 号样地绿化水平低于 40%,平均绿视率水平低于 30%,为第一组,共 34 个样本,此时的主要影响指标为绿视率。第一组模型选定参考序列为 $R_{0a} = (47.21, 21, 15, 21, 3)$,其中 47.21 为样本中绿视率最高值,21 和 15 为温度和湿度的最适值,21 为样本中 PM_{2.5}浓度最低值,3 为风力等级最大值。6 号和 7 号样地绿化水平高于 40%,平均绿视率水平高于 30%,为第二组,共 22 个样本,此时的主要影响指标为湿度、空气质量和风力等级。第二组模型选定参考序列为 $R_{0b} = (62.76, 21, 15, 17, 3)$,选取标准同第一组。

3.3 各指标的赋权与调整

首先根据表 5 的定性分析结果分别对两组模型中的各个指标初步赋权,再不断对权重进行调整与验证,各赋权方式与对应的拟合优度见表 6 和表 7。

表 6 第一组模型中各指标权重与对应的拟合优度

Table 6 The weight of each indicator and the goodness of fit in the 1st mathematical model	
指标权重(绿视率:温度:湿度:PM _{2.5} 浓度:风力等级) Indicator weight (Green view index :Temperature :Humidity :PM _{2.5} concentration :Wind scale)	R^2
5 : 1 : 1 : 1 : 1	0.619
9 : 1 : 1 : 1 : 1	0.661
11 : 1 : 1 : 1 : 1	0.664
10 : 1 : 1 : 1 : 3	0.670
10 : 1 : 1 : 1 : 2	0.672

表 7 第二组模型中各指标权重与对应的拟合优度

Table 7 The weight of each indicator and the goodness of fit in the 2nd mathematical model	
各指标权重(绿视率:温度:湿度:PM _{2.5} 浓度:风力等级) Indicator weight (Green view index :Temperature :Humidity :PM _{2.5} concentration :Wind scale)	R^2
1 : 1 : 2 : 2 : 2	0.505
1 : 1 : 5 : 5 : 5	0.523
1 : 1 : 5 : 9 : 5	0.595
1 : 1 : 5 : 11 : 5	0.590
1 : 1 : 5 : 10 : 5	0.595

由表 6 和表 7 可得,经过多次调整和检验,第一组的最终权重确定为 10:1:1:1:2,第二组的权重确定为 1:1:5:10:5,此时模型计算出的城市生态舒适度与舒适程度主观打分拟合程度最高,可以互相解释。也就是说,此时通过模型做出的城市生态舒适度综合评价水平与观测者的主观感受最为相近。

3.4 模型评价结果的验证

将通过灰色关联模型结合各指标权重计算得到的评价结果与采样时记录的舒适程度主观打分做对比,以验证评价模型的准确性。

由表 5,绿视率水平低于 30%的第一组模型中,各指标权重确定为 10:1:1:1:2,此时模型的评价结果与舒适程度主观打分间的线性拟合优度为 $R^2=0.672$,共 34 个样本的城市生态舒适度模型评价结果与舒适程度主观打分的对比图如图 3。由表 6,绿视率水平高于 30%的第二组模型中各指标权重确定为 1:1:5:10:5,此时模型的评价结果与舒适程度主观打分间的线性拟合优度为 $R^2=0.595$,共 22 个样本的城市生态舒适度模型评价结果与舒适程度主观打分的对比图如图 4。

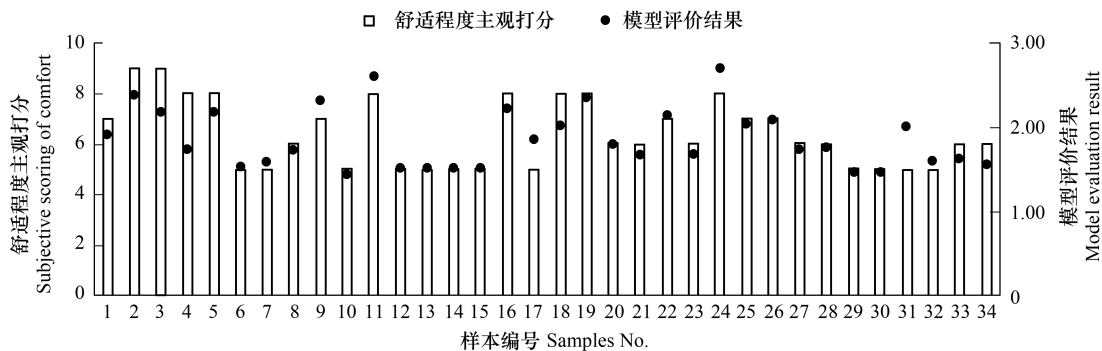


图 3 第一组模型评价结果与舒适程度主观打分对比

Fig.3 Comparison between the evaluation results and the subjective scoring of comfort of the first model

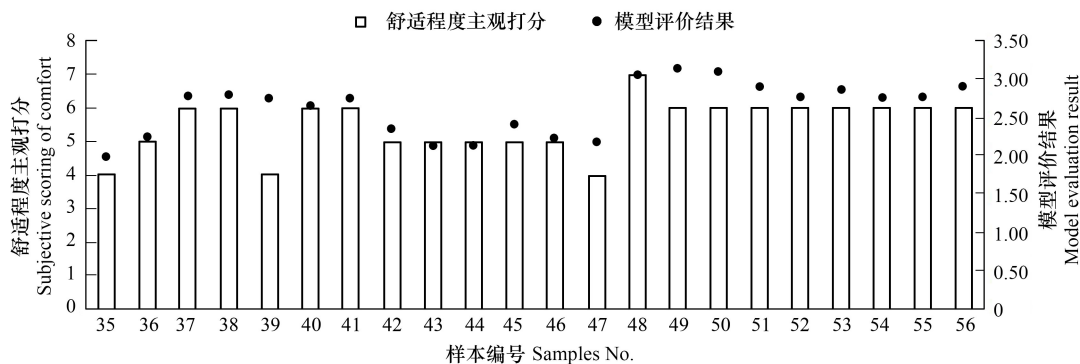


图 4 第二组模型评价结果与舒适程度主观打分对比

Fig.4 Comparison between the evaluation results and the subjective scoring of comfort of the second model

由图 3 和图 4 可以看出,除少数样本的模拟值与实测值间有较大误差外,城市生态舒适度模型评价结果与舒适程度主观打分的变化趋势基本相同,吻合程度较理想。表明模型可以对人体的生态舒适程度做出有效模拟,评价结果基本可靠。

4 讨论

本文提出了一个城市生态系统服务质量评价指标——城市生态舒适度,并结合灰色关联分析法构建了综合评价模型。在模型构建过程中,通过对样本的条件对比分析和总结归纳得出,当绿视率水平低于 30%时,

绿视率是影响城市生态舒适度的主要因子;当绿视率水平高于 30%时,湿度、空气质量和风力等级成为突出的影响因子。这可能说明当人们对周围环境的生态舒适程度做出判断时,绿色植被的数量和密度是首要的考虑因素,绿视率水平首先影响人们的主观感受。当整体绿化水平较低时,绿视率是唯一的决定性因素。当绿化水平升高到一定程度后,绿视率的影响作用不再突出,此时人们对绿量已经达到满意,关注点转移到湿度、空气质量和风力等级等其他影响因子上。所以,在城市绿色空间规划时,不需要一味地提高绿化水平,提升绿视率至 30%左右即可使居民达到满意程度。

在模型的验证中,两组样本的验证结果相比,第一组的线性拟合效果优于第二组。因为在绿视率水平较低时,绿视率是唯一的主要影响因子,生态舒适度的变化趋势相对容易预测。而当绿视率水平高于 30%时,湿度、PM_{2.5}浓度和风力等级都对评价结果有着突出的影响作用,几个主要影响指标间相互作用关系的不明确使模拟增加了难度。两组样本中均有个别样本的模型评价结果与舒适程度主观打分相差较大。首先,评价指标体系的完善可使模型的准确度更高,比如在道路附近,噪音也是一个重要的影响指标。同时,作为实测值的舒适程度打分是主观判断,个人偏好对打分结果有一定影响,但模型计算仅考虑各指标的客观水平,可能导致在某些情况下二者的差异较大。

整体来看,验证结果可以表明此模型做出的城市生态舒适度评价基本可以反映样本点处的生态舒适程度,也就是生态系统服务质量。此模型的构建过程中主观与客观相结合,计算模型科学合理且具有实际意义。城市生态舒适度评价指标的提出和评价模型的构建可为城市生态系统管理和规划提供新的角度和方法,进而提高居民福祉。

参考文献(References):

- [1] 毛齐正, 黄甘霖, 邬建国. 城市生态系统服务研究综述. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1023-1033.
- [2] Collins CMT, Cook-Monie I, Raum S. What do people know? Ecosystem services, public perception and sustainable management of urban park trees in London, U.K. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 43: 126362.
- [3] Haase D, Larondelle N, Andersson E, Artmann M, Borgström S, Breuste J, Gomez-Baggethun E, Gren Å, Hamstead Z, Hansen R, Kabisch N, Kremer P, Langemeyer J, Rall E L, McPhearson T, Pauleit S, Qureshi S, Schwarz N, Voigt A, Wurster D, Elmqvist T. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. Ambio, 2014, 43(4): 413-433.
- [4] Bricker K S, Hendricks W W, Greenwood J B, Aschenbrenner C A. Californians' perceptions of the influence of parks and recreation on quality of life. Journal of Park and Recreation Administration, 2016, 34(3): 64-82.
- [5] 陈晓红, 周宏浩. 城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析. 地理科学进展, 2018, 37(9): 1171-1185.
- [6] Wu J G. Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 209-221.
- [7] Das M, Das A. Dynamics of urbanization and its impact on Urban Ecosystem Services (UESs): a study of a medium size town of west Bengal, eastern India. Journal of Urban Management, 2019, 8(3): 420-434.
- [8] 巫涛. 长沙城市绿地景观格局及其生态服务功能价值研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [9] James P, Tzoulas K, Adams M D, Barber A, Box J, Breuste J, Elmqvist T, Frith M, Gordon C, Greening K L, Handley J, Haworth S, Kazmierczak A E, Johnston M, Korpela K, Moretti M, Niemelä J, Pauleit S, Roe M H, Sadler J P, Thompson C W. Towards an integrated understanding of green space in the European built environment. Urban Forestry & Urban Greening, 2009, 8(2): 65-75.
- [10] 毛齐正, 罗上华, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 宝乐, 张田. 城市绿地生态评价研究进展. 生态学报, 2012, 32(17): 5589-5600.
- [11] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [12] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. 生态学报, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [13] 范榕, 徐灏文. 基于生态多样性的太湖绿道景观空间视觉质量研究. 西部人居环境学刊, 2019, 34(3): 19-25.
- [14] 屠星月, 黄甘霖, 邬建国. 城市绿地可达性和居民福祉关系研究综述. 生态学报, 2019, 39(2): 421-431.
- [15] Li X J, Zhang C R, Li W D, Ricard R, Meng Q Y, Zhang W X. Assessing street-level urban greenery using Google Street View and a modified green view index. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 675-685.
- [16] 王敏, 彭唤雨. 绿视率引导下的城市绿色空间发展探析——日本的经验与借鉴. 住宅科技, 2018, (9): 51-57.
- [17] 肖希, 韦怡凯, 李敏. 日本城市绿视率计量方法与评价应用. 国际城市规划, 2018, 33(2): 98-103.

- [18] Yu S Y, Yu B L, Song W, Wu B, Zhou J H, Huang Y, Wu J P, Zhao F, Mao W Q. View-based greenery: a three-dimensional assessment of city buildings' green visibility using Floor Green View Index. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 152: 13-26.
- [19] 皇甫昊. 室外热环境因素对人体热舒适的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [20] 车通, 杨旸, 罗云建. 城市绿地降温效应及其研究进展. *林业建设*, 2019, (3): 52-56.
- [21] 张莹. 我国典型城市空气污染特征及其健康影响和预报研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [22] 陈卫红, 曹丽敏, 刘跃伟, 史廷明. 空气细颗粒物与呼吸系统的健康损害. *公共卫生与预防医学*, 2016, 27(3): 1-4.
- [23] Hamanaka R B, Mutlu G M. Particulate matter air pollution: effects on the cardiovascular system. *Frontiers in Endocrinology*, 2018, 9: 680.
- [24] Dong R C, Zhang Y L, Zhao J Z. How green are the streets within the sixth ring road of Beijing? An analysis based on tencent street view pictures and the green view index. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(7): 1367.
- [25] 韦怡凯. 澳门半岛高密度城区绿视率评价指标研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [26] 彭锐, 刘海霞. 城市道路绿视率自动化计算方法研究. *北京规划建设*, 2018, (4): 61-64.
- [27] Shen Q M, Zeng W, Ye Y, Arisona S M, Schubiger S, Burkhard R, Qu H M. StreetVizor: visual exploration of human-scale urban forms based on street views. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(1): 1004-1013.
- [28] 胡坤侠, 张立亭. 基于灰色关联模型的区域生态安全综合评价——以赣州市为例. *广东土地科学*, 2019, 18(3): 15-21.
- [29] Feng J C, Huang H A, Yin Y, Zhang K. Comprehensive security risk factor identification for small reservoirs with heterogeneous data based on grey relational analysis model. *Water Science and Engineering*, 2019, 12(4): 330-338.
- [30] 赵国彦, 吴攀, 朱幸福, 赵源, 李洋, 邱菊. 基于灰色关联分析的三山岛金矿绿色开采技术优先级评价. *黄金科学技术*, 2019, 27(6): 835-843.