干旱半干旱区城市公园绿地环境效益评价*

包红光[1]　王　波[1]　闫晓云[1]　贾雨龙[2]　秦嘉泽[3]　王卫民[4]

1　内蒙古农业大学林学院　呼和浩特　010010
2　北京市通州区园林绿化局　北京　101101
3　国家植物园　北京　100090
4　陕西省气象科学研究所　西安　710000

摘要：【目的】评价干旱半干旱区城市公园绿地环境效益，旨在为植被群落结构的最优配置模式提供数据支持，为城市绿地建设提供理论基础。【方法】以呼和浩特市敕勒川公园为研究对象，于 2020—2021 年不同季节选取晴天、晴间多云为主的天气各 10 天，在 7：00—19：00 对 5 种不同结构绿地及对照点的空气温度、相对湿度、平均风速、$PM_{2.5}$、空气正负离子以及噪声等指标进行实地监测，分析变化特征并评价环境效益。【结果】人体舒适度（I_{CHB}）季节日变化与季节均值主要表现为较舒适（V）、偏热（VI）、舒适（IV）、冷（II）等级；同一季节不同结构绿地差异不显著。不同季节 $PM_{2.5}$ 呈“上午高，下午低”的状态，15：00—19：00 出现监测时段最低值；冬季、夏季 $PM_{2.5}$ 均值分别表现最高、最低；$PM_{2.5}$ 日变化及季节变化均能达到环境空气质量 II 级标准。春季、夏季、秋季 18：00—19：00，冬季 7：00—8：00 空气清洁度指数（*CI*）达到容许（D）及以上；不同季节均值等级分别为 C～D、B～C、B～C、C～D，对照点均值为 D；冬季灌草型均值最高，其他季节乔灌草型均值最高。冬季噪声均值在Ⅰ～Ⅲ，其他季节噪声均值在Ⅰ～Ⅱ，同一季节多层结构绿地噪声较低；秋季、冬季不同结构绿地噪声显著高于其他季节。【结论】$PM_{2.5}$ 为影响城市公园绿地环境效益的主要因素；春季灌草型，夏季、秋季、冬季乔木型环境效益综合得分最高。建议公园管理部门实行季节性绿地管理模式，根据不同结构绿地的环境效益表现，建立科学合理的绿地更新规划方案。

关键词：城市公园绿地；人体舒适度指数；$PM_{2.5}$；空气清洁度指数；噪声
DOI：10.12169/zgcsly.2023.12.26.0002

Environmental Benefits of Urban Park Green Space in Arid and Semi-arid Area：An Evaluation

Bao Hongguang[1]　Wang Bo[1]　Yan Xiaoyun[1]　Jia Yulong[2]　Qin Jiaze[3]　Wang Weimin[4]

(1. Forestry College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Tongzhou District Landscape and Forestry Bureau, Beijing 101101, China; 3. China National Botanical Garden, Beijing 100090, China; 4. Shanxi Institute of Meteorological Science, Xi'an 710000, China)

Abstract：【Objective】The environmental benefits of urban parks in arid and semi-arid areas are evaluated to provide data support to determine the optimum configuration model of vegetation community structure. This study aims at offering the theoretic basis for the construction of urban green spaces. 【Method】Chilechuan Park in Hohhot is taken as the research object, and 10 clear-sky days and 10 partly-cloudy days in different seasons from 2020 to 2021 were selected, respectively. The air temperature,

收稿日期：2023-12-26
* 基金项目：内蒙古农业大学青年教师科研能力提升专项（BR220132）；内蒙古自然科学基金博士基金项目（2019BS03018）；中国气象局项目（CXFZ2022J042）。
第一作者：包红光（1987-），男，博士，副教授，研究方向为城市生态与保护。E-mail：baohongguang2016@163.com

relative humidity, average wind speed, $PM_{2.5}$, air positive and negative ions, and noise of 5 different green space structures and control points were monitored on the spot from 7 : 00 to 19 : 00, and the changes and their characteristics were analyzed and the environmental benefits were evaluated. 【Result】 The seasonal diurnal variation and seasonal mean value of human body comfort index (I_{CHB}) fall in the categories of more comfortable (V), warmer (VI), comfortable (IV) and cold (II). No significant differences are observed among the green spaces of varying structure within a given season. $PM_{2.5}$ is "high in the morning and low in the afternoon" in different seasons, and the lowest value is captured from 15 : 00 to 19 : 00. The mean value of $PM_{2.5}$ reaches the highest in winter and the lowest in summer. The diurnal and seasonal variations of $PM_{2.5}$ can meet the Class II standard for ambient air quality. The clean index (CI) at 18 : 00−19 : 00 in spring, summer and autumn and at 7 : 00−8 : 00 in winter reach tolerance (D) or above. The mean grades in different seasons are C−D, B−C, B−C and C−D, respectively, and the mean grade at the control points is D. The mean value of the shrub-grass combination is the highest in winter, and the mean value of the arbor-shrub-grass combination in other seasons is the highest. The mean noise in winter is I−III, the mean noise in other seasons is I−II, and the noise of multi-layer structure is lower in the same season. The noise in green spaces of different structures is significantly higher in autumn and winter than in other seasons. 【Conclusion】 $PM_{2.5}$ is the main factor affecting the environmental benefit of urban park green space, and the shrub-grass combination in spring and the arbor community in summer, autumn and winter present the highest environmental benefits. It is recommended that the park management department should adopt a seasonal approach to green space management and formulate a science-based renewal planning scheme for green spaces based on the environmental benefit performance of green spaces of different structures.

Keywords: urban park green space; comfort index of human body (I_{CHB}); $PM_{2.5}$; clean index (CI); noise

城市公园绿地是居民生活、休闲、游憩、户外活动的重要场所，具有多种生态功能[1-2]。城市绿地中不同树种及群落结构通过叶片表面不同微结构吸收、吸附、拦截空气污染物[3]，通过光合作用和尖端放电能够产生较高浓度的空气负离子[4]，通过树冠遮荫、树木蒸腾、吸收太阳辐射等改变局部环境中的微气候[5-6]，通过吸收、阻挡、分散声音能量而起到减弱噪音的作用[7]。

目前，国内外对城市公园绿地环境效益的研究多聚焦于不同植被、不同绿地类型中单个环境指标浓度变化规律，监测地点多布设在景区、森林公园等植被覆盖度较高的区域。由于城市公园绿地环境效益不仅受到植被类型、不同环境要素等影响，其不同监测指标时空分布规律具有显著的区域性差异，研究结果也存在差异。针对上述情况，在区域气候特点显著的城市公园绿地不同结构绿地监测不同环境指标要素并科学合理评价所产生的环境效益，对准确认识城市公园绿地环境效益、指导城市居民健康生活具有积极的意义[8]。

基于此，本研究选取位于典型干旱半干旱气候区域的呼和浩特市敕勒川公园，通过实地监测5种不同结构绿地空气温度、相对湿度、平均风速、$PM_{2.5}$、空气正、负离子浓度以及噪声等环境要素指标，对不同环境要素指标不同季节的变化特征及规律进行定量研究，旨在为植被群落结构的最优配置模式提供数据支持，为城市绿地建设提供理论基础。

1　研究区概况

呼和浩特市(110°46′—112°10′E,40°51′—41°8′N)位于内蒙古自治区中西部，属于干旱半干旱气候区域，四季气候变化明显，降水偏少，气候干燥。敕勒川公园绿地占地面积为 38 hm^2，是周边城市居民休闲活动的主要场所之一。

2　研究方法

2.1　监测地点

所选不同结构绿地为乔草型、乔灌型、乔木型、灌草型、乔灌草型等 5 种，对照点（CK）紧邻公园内水域、无遮光影响的硬质铺装空地，城市公园绿地及不同结构绿地本底调查在 2020 年 7—8 月进行，每个样方大小为 20 m×20 m（表 1）。

表 1 样地植被概况

不同结构绿地	主要植物类型	乔、灌木平均树高/m	乔木平均胸径、灌木平均地径/cm
乔草型	国槐（*Styphnolobium japonicum*）、栾树（*Koelreuteria paniculata*）、新疆杨（*Populusalba* var. *pyramidalis*）、草地早熟禾（*Poa pratensis*）	10.0±1.67	12.0±2.35
		4.3±1.52	6.0±1.65
乔灌型	新疆杨、国槐、小叶黄杨（*Buxus sinica* var. *parvifolia*）	12.0±2.18	9.6±2.86
		4.2±1.16	4.0±1.09
乔木型	国槐、榆树（*Ulmus pumila*）、紫叶李（*Prunus cerasifera*）	6.3±1.68	6.0±0.89
灌草型	连翘（*Forsythia suspensa*）、紫丁香（*Syringa oblata*）、草地早熟禾	2.2±0.35	2.6±0.33
乔灌草型	新疆杨、国槐、红瑞木（*Cornus alba*）、珍珠梅（*Sorbaria sorbifolia*）	9.6±0.88	10.0±0.38
	紫丁香、草地早熟禾	5.4±0.97	6.2±0.46
		2.2±0.68	2.1±0.26
对照点	—	—	—

2.2 监测时间

于 2020—2021 年，每个季节参照中国环境监测网并依据城市区域天气预报选取晴天、晴间多云为主的天气各 10 天，监测时段为 7：00—19：00，每小时监测 1 次，不同结构绿地按照“△”位置选择 3 个监测点，每个监测点重复观测 3 次，不同结构绿地采取同步监测的方式进行数据采集。

2.3 监测指标

使用 AIC-1000 型便携式空气负离子监测仪（美国照明（ALP）公司）对空气正、负离子浓度进行监测，监测高度为距离地面 1.3～1.5 m 处，每个观测点开机并做归零调整后，观察空气正、负离子读数，记录数据停顿 1～2 s 的数值。使用 Dustmate 手持粉尘仪（英国 Turnkey 公司）监测 $PM_{2.5}$（粒径≤2.5 μm）质量浓度；使用 Krestal 4500 手持气象站（美国 NK 公司）监测平均风速、相对湿度、平均温度、大气压强；使用 UT352 声级计（中国优利德公司（UNI-T））监测噪声。

2.4 环境效益评价

2.4.1 人体舒适度指数计算方法与评价

选用我国气象台所用的人体舒适度公式对不同结构绿地人体舒适度指数（I_{CHB}）进行计算和评价（表 2）[9]：

$$I_{CHB} = (1.8t + 32) - 0.55(1.8t - 26) \cdot (1 - HR/100) - 3.2\sqrt{v} \quad (1)$$

式（1）中：t 是空气温度（℃）；HR 是相对湿度（%）；v 是平均风速（$m \cdot s^{-1}$）。

表 2 人体舒适度指数（I_{CHB}）等级划分标准

舒适度等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
I_{CHB}	≤25	25～35	35～50	50～60	60～65	65～70	70～77	77～85	>85
人体感受	寒冷	冷	偏凉	舒适	较舒适	偏热	较热	热	炎热

I_{CHB} 改善率计算公式如下[10]：

$$I_{CHB}\text{改善率} = (\text{不同结构绿地 } I_{CHB} - \text{对照点 } I_{CHB}) / \text{不同结构绿地 } I_{CHB} \times 100\% \quad (1)$$

2.4.2 $PM_{2.5}$ 等级评价

依据 2012 年我国最新发布的 GB3095-2012《环境空气质量标准》对 $PM_{2.5}$ 进行等级评价（表 3）。

2.4.3 空气清洁度指数计算与评价

选用目前国内外常用的单极性系数方法进行计算空气清洁度评价指数。计算公式为 $q = n^+/n^-$，$CI = n^-/(1000q)$，其中 q 为单极性系数，n^+、n^- 为空气正、负离子浓度，CI 为空气清洁度评价指数，其评价标准如表 4 所示[11]。

表 3 $PM_{2.5}$ 日均浓度等级评价标准

项目	浓度日均值	评价等级	单位
$PM_{2.5}$	≤35	Ⅰ	$\mu g \cdot m^{-3}$
	35～75	Ⅱ	
	>75	Ⅲ	

2.4.4 噪声评价

依据《声环境质量标准》（表 5）对城市公园内不同结构绿地的昼间噪声进行评价。

表 4　空气清洁度（*CI*）评价标准

等级		清洁度	*CI*
A		最清洁	>1
B		清洁	1.0~0.7
C		中等	0.69~0.50
D		容许	0.49~0.30
E		临界值	0.29
E	E1	轻污染	0.29~0.19
	E2	中度污染	0.18~0.10
	E3	重度污染	<0.09

表 5　声环境质量标准（GB3096-2008）　dB

类别	0	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
昼间	≤50	51~55	56~60	61~65	66~70

2.5　数据处理

运用 SPSS19、Origin2018 进行数据处理与图表制作，差异显著性采用单因素方差分析（one-way ANOVA）、多重比较采用 Duncan 方差分析。不同季节各项指标进行主成分分析，并计算各主成分的因子得分及环境效益综合得分。

3　结果与分析

3.1　I_{CHB}季节变化及改善率

3.1.1　I_{CHB}季节变化特征

由图 1 可知：春季 I_{CHB}在 7：00—10：00，呈上升态势，处于舒适至较舒适（Ⅳ~Ⅴ）等级，10：00—19：00 处于较舒适（Ⅴ）等级，对照点只在 7：00 处于舒适（Ⅳ）等级，其余时段为较舒适（Ⅴ）等级。夏季 I_{CHB}处于较舒适至偏热（Ⅴ~Ⅵ）等级，7：00—8：00 处于较舒适（Ⅴ）等级，其余时段处于偏热（Ⅵ）等级，对照点主要处于偏热（Ⅵ）等级，说明夏季应选择较舒适（Ⅴ）等级时段在公园内进行休闲游憩。秋季 I_{CHB}呈“先上升，后下降”的变化趋势，7：00—8：00 处于偏凉（Ⅲ）等级，其余时段处于舒适（Ⅳ）等级，对照点基本处于较舒适（Ⅴ）等级。冬季 I_{CHB}7：00—10：00、19：00 基本处于寒冷（Ⅰ）等级，11：00—18：00 主要处于冷（Ⅱ）等级，对照点主要处于冷（Ⅱ）等级。

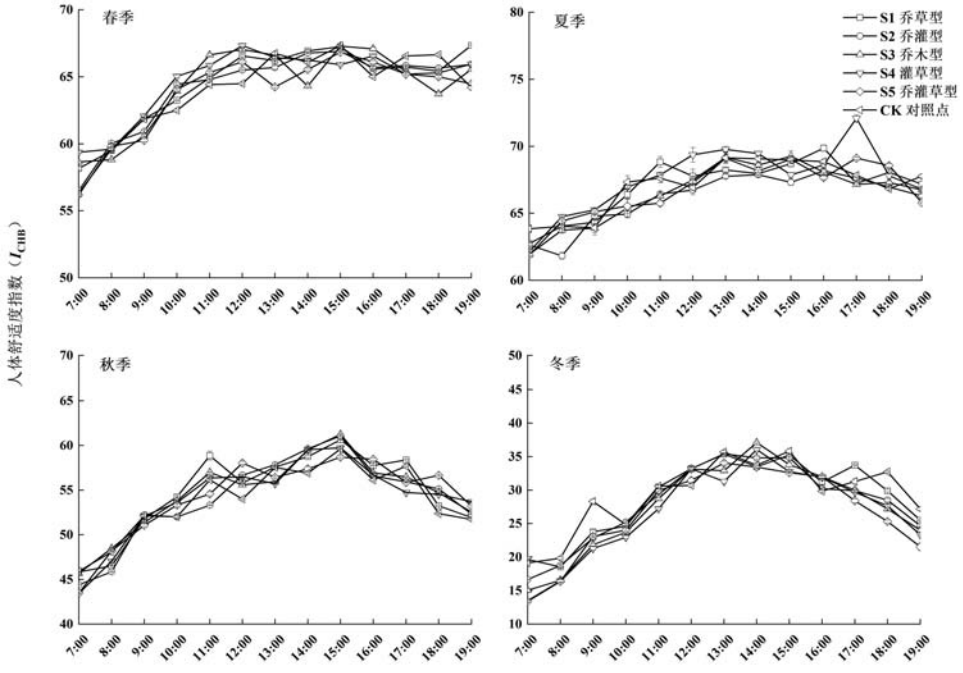
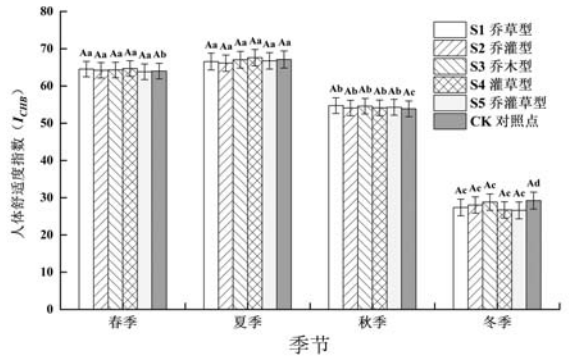


图 1　I_{CHB}日变化规律

由图 2 可知，不同季节不同结构绿地 I_{CHB}均值表现为较舒适（Ⅴ）、偏热（Ⅵ）、舒适（Ⅳ）、冷（Ⅱ）等级。方差分析表明：同一季节不同结构绿地差异不显著；同一结构绿地春季、夏季 I_{CHB}均值显著（P<0.05）高于秋季、冬季；夏季、冬季同一结构分别表现显著（P<0.05）最高、显著（P<0.05）最低，不同季节同一结构绿地均值有差异，其舒适等级也各有不同。



注：不同大写字母表示同一季节不同结构绿地差异显著（$P<0.05$），不同小写字母表示同一结构绿地不同季节差异显著（$P<0.05$）；下同。

图 2 I_{CHB} 日均值比较

3.1.2 I_{CHB} 均值改善率

由表 6 可知，春季乔灌草型 I_{CHB} 改善率为 -0.31%，其余结构绿地 I_{CHB} 改善率为 0.35% ~ 1.08%；夏季灌草型改善率为 0.75%，其余改善率均为 -0.09% ~ -1.49%，不同结构绿地虽有一定的改善作用；秋季 I_{CHB} 改善率在 0.39% ~ 1.56%；冬季改善率在 -1.36% ~ -9.87%。说明不同结构绿地 I_{CHB} 均值改善效果有限，其中秋季不同结构绿地改善效果表现整体较好。

表 6 不同结构绿地 I_{CHB} 改善率 %

结构绿地	春季	夏季	秋季	冬季
乔草型	0.83	-0.82	1.56	-6.67
乔灌型	0.35	-1.49	0.39	-4.21
乔木型	0.47	-0.09	1.27	-1.36
灌草型	1.08	0.75	0.49	-9.34
乔灌草型	-0.31	-0.54	0.73	-9.87

3.2 $PM_{2.5}$ 变化特征及污染评价

3.2.1 $PM_{2.5}$ 日变化及污染评价

由图 3 可知，春季 $PM_{2.5}$ 呈下降趋势，7：00 出现最高值，之后下降，15：00—17：00 除乔木型外其余结构绿地均为最低值；夏季 $PM_{2.5}$ 呈“M”型变化趋势，8：00 出现最高值，9：00—10：00 为较低值，之后陡然升高，13：00 之后呈下降趋势，17：00—19：00 为最低值；秋季 $PM_{2.5}$ 基本呈下降趋势，8：00—9：00 为最高值，之后持续下降，15：00—17：00 期间出现最低值；冬季 7：00—12：00 为较高值，之后迅速下降，13：00—19：00 出现较低值；不同季节不同结构绿地与对照点日变化并未表现出明显的差异性。由表 3 可知，春季、夏季监测时段均能达到Ⅰ级标准，秋季 7：00—10：00 为Ⅱ级标准，11：00—19：00 为Ⅰ级标准，冬季乔木型达到Ⅱ级标准，乔草型在 7：00—14：00 达到Ⅱ级标准，除乔草型外的不同结构绿地 7：00—12：00 为Ⅱ级标准，其余时段为Ⅰ级标准。总体来看，不同季节不同结构绿地 $PM_{2.5}$ 日变化均可以达到环境空气质量Ⅱ级标准。

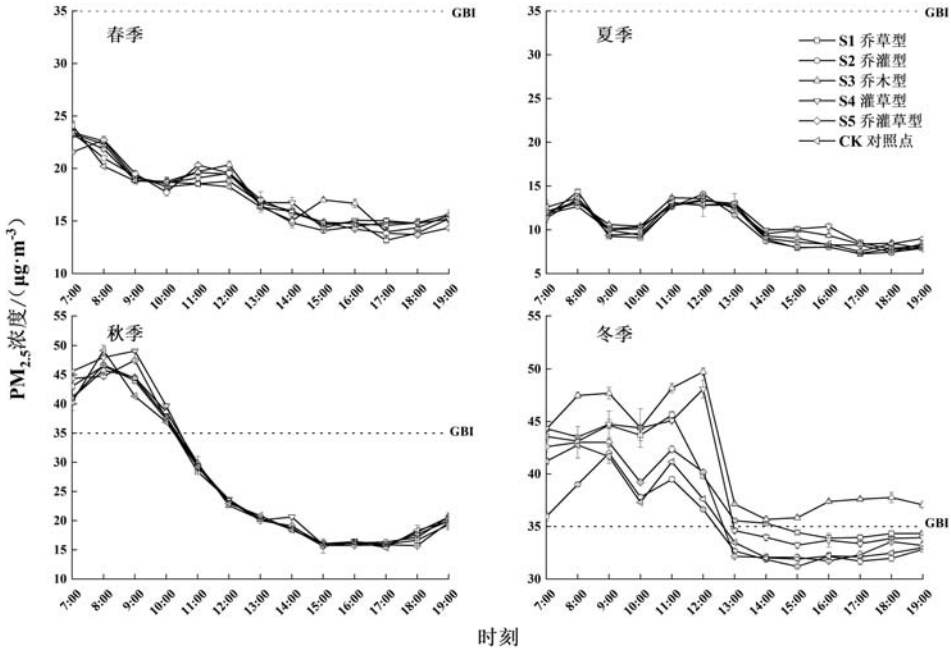


图 3 $PM_{2.5}$ 日变化规律

3.2.2　$PM_{2.5}$季节变化及污染评价

由图 4 可知，不同季节不同结构绿地 $PM_{2.5}$均值表现为冬季>秋季>春季>夏季，冬季不同结构绿地达到Ⅱ级标准，其余季节不同结构绿地达到Ⅰ级标准。方差分析表明，春季、夏季、秋季不同结构绿地 $PM_{2.5}$均值差异不显著，冬季乔草型、乔木型 $PM_{2.5}$均值显著高于其他结构绿地，乔灌型 $PM_{2.5}$均值显著（$P<0.05$）低于其他结构绿地，其余结构绿地差异不显著；冬季、夏季同一结构绿地 $PM_{2.5}$均值分别为显著最高、显著最低。说明从颗粒物污染的角度各季节不同结构绿地可以提供较好的公园绿地内部环境。

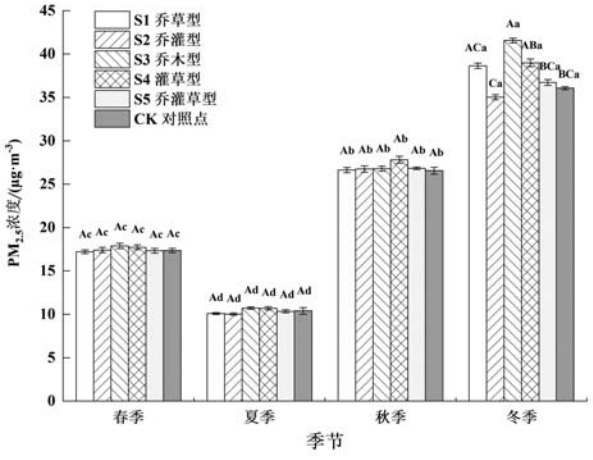


图 4　不同结构绿地 $PM_{2.5}$季节均值比较

3.3　*CI* 变化特征及污染评价

3.3.1　*CI* 日变化及污染评价

由图 5 可知：春季 *CI* 在 18：00—19：00 为中等（C）、清洁（B）等级，其余时段以容许（D）、轻污染（E1）等级为主，对照点以容许（D）、轻污染（E1）等级为主。夏季 7：00—9：00为最清洁至中等（A~C）等级，18：00—19：00 为最清洁至清洁（A~B）等级，其余时段为中等至容许（C~D）等级；对照点在 16：00—18：00 为清洁（B），其余时段为容许（D）等级。秋季乔草型、乔灌型在 7：00—8：00、16：00—17：00、19：00 为最清洁至清洁（A~B）等级，乔木型在 8：00、18：00—19：00 为最清洁至清洁（A~B）等级，其余时段以中等至容许（C~D）等级为主；灌草型除 10：00 为轻污染（E1）等级，其余时段则在最清洁至容许（A~D）等级；乔灌草型为最清洁至容许（A~D），对照点为容许至中度污染（D~E2）。冬季以容许（D）等级为主，乔草型、乔木型、灌草型在 7：00—9：00，乔灌型在 7：00—8：00，乔灌草型在 7：00—11：00 出现较高值，主要为最清洁至中等（A~C）等级；对照点在 7：00—9：00、18：00 为轻污染（E1）等级，其余时段则为最清洁至容许（A~D）等级。

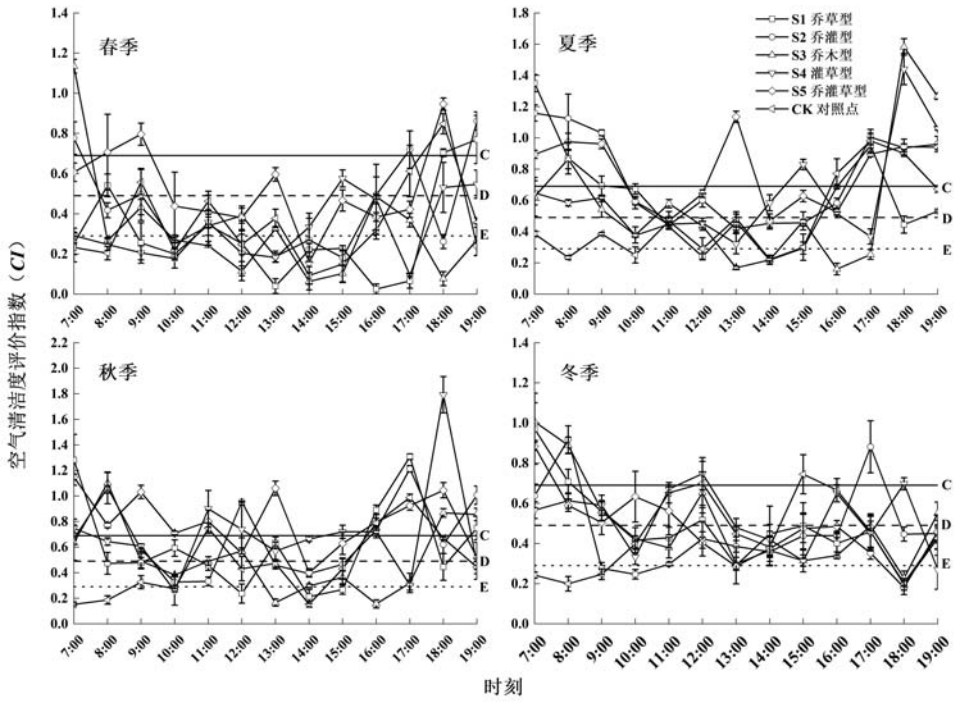


图 5　*CI* 日变化规律

3.3.2 *CI* 季节均值及污染评价

由表 7 可知，春季不同结构绿地 *CI* 均值在中等至容许（C~D）等级，其中乔灌草型、乔草型分别为最高、最低值；夏季在清洁至中等（B~C）等级，乔灌草型、乔木型分别为最高、最低值；秋季在清洁至中等（B~C）等级，乔灌草型、乔木型为最高、最低值；冬季在中等至容许（C~D）等级，灌草型、乔灌型为最高值、最低值；不同季节对照点均值为容许（D）等级。综上可知，夏季、秋季不同结构绿地 *CI* 等级较好。方差分析表明，春季、夏季、秋季多层结构绿地显著高于单一结构绿地，冬季不同结构绿地差异不显著，不同季节同一结构绿地以及对照点差异不显著。

表 7 *CI* 日均值比较

结构绿地及 *CI* 等级	春季	夏季	秋季	冬季
乔草型	0.30±0.06Bb	0.60±0.04ABa	0.62±0.07ABa	0.49±0.08ABab
CI 及等级	容许（D）	中等（C）	中等（C）	容许（D）
乔灌型	0.43±0.07ABc	0.75±0.05Aa	0.68±0.04ABb	0.48±0.05ABbc
CI 及等级	容许（D）	清洁（B）	中等（C）	容许（D）
乔木型	0.32±0.03Bb	0.58±0.04ABa	0.52±0.05Bab	0.50±0.05ABab
CI 及等级	容许（D）	中等（C）	中等（C）	中等（C）
灌草型	0.32±0.06Bb	0.64±0.04ABa	0.70±0.08ABa	0.52±0.05ABab
CI 及等级	容许（D）	中等（C）	清洁（B）	中等（C）
乔灌草型	0.54±0.07Ab	0.78±0.03Aa	0.80±0.06Aa	0.48±0.05ABb
CI 及等级	中等（C）	清洁（B）	清洁（B）	容许（D）
对照点	0.36±0.06ABa	0.49±0.04Ba	0.47±0.04Ba	0.44±0.05Ba
CI 及等级	容许（D）	容许（D）	容许（D）	容许（D）

3.4 噪声变化特征及评价

3.4.1 噪声日变化特征及评价

由图 6 可知：春季不同结构绿地噪声总体在 0~Ⅱ类别范围，其中乔草型、乔灌型、灌草型、乔灌草型在 0~Ⅰ类别范围，分别占监测时段 92%、77%、69%、85%，乔木型在Ⅱ~Ⅲ类别范围占监测时段 93%，对照点在Ⅰ~Ⅱ类别范围占监测时段 84%；夏季不同结构绿地总体在 0~Ⅱ类别范围，乔草型、乔灌型、灌草型、乔灌草型 0~Ⅰ类别范围分别占监测时段 93%、62%、85%、100%，乔木型在Ⅱ类别范围占监测时段 92%，对照点为Ⅰ~Ⅱ类别范围占监测时段 85%，监测时段内 0~Ⅳ类别范围均有分布；秋季乔草型、乔灌型、灌草型、乔灌草型在Ⅰ~Ⅱ类别范围，对照

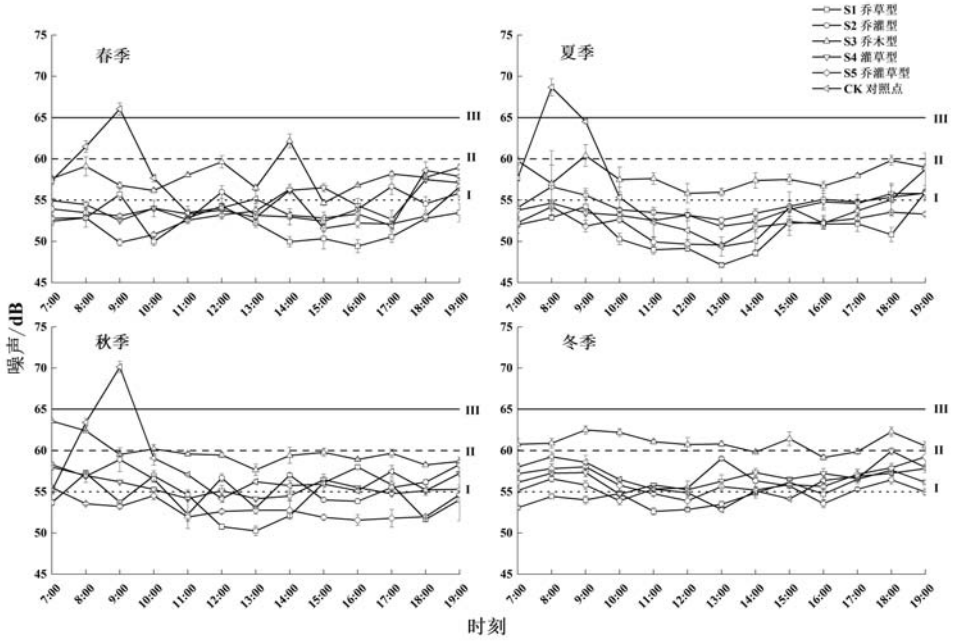


图 6 噪声日变化规律

点在Ⅰ~Ⅱ类别范围占监测时段 92%；冬季乔草型、乔灌型、灌草型、乔灌草型为Ⅰ~Ⅱ类别范围内，乔木型为Ⅲ类别的占监测时段 92%；对照点均在Ⅱ~Ⅲ类别范围内。总体来看，不同季节乔木型在Ⅱ~Ⅲ类别范围内，其余结构绿地主要在 0~Ⅰ类别范围内。

3.4.2　噪声季节均值及评价

由表 8 可知，春季、夏季、秋季不同结构绿地为Ⅰ~Ⅱ类别范围，冬季为Ⅰ~Ⅲ范围。其中，不同季节乔木型均值最高，并且高于对照点。方差分析表明，春季、夏季、秋季乔木型、乔灌草型分别为显著最高、最低，冬季乔木型显著最高；秋季、冬季除乔灌草型外，其余结构显著高于春季、夏季，说明监测时段内单一结构绿地降噪效果发挥有限。

表 8　噪声季节变化及评价

结构绿地及噪声类别	春季	夏季	秋季	冬季
乔草型	52.07±0.72Bb	51.28±0.77Bb	54.23±0.36ABa	54.71±0.34Ba
类别	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
乔灌型	54.05±0.67ABb	54.48±0.70ABb	55.95±0.58ABa	55.66±0.37Bb
类别	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ
乔木型	57.88±0.44Ab	57.89±0.99Ab	59.77±0.35Aa	60.92±0.48Aa
类别	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
灌草型	54.64±0.41ABab	53.84±0.53ABb	55.65±0.29ABa	56.36±0.39Ba
类别	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ
乔灌草型	52.90±0.42Bb	52.01±0.48Bb	52.98±0.66Bb	56.35±0.54Ba
类别	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ
对照点	56.38±0.61ABb	55.63±1.21ABb	57.69±0.53ABa	56.38±0.50Bb
类别	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

3.5　环境效益综合分析及评价

3.5.1　不同季节主成分个数及载荷矩阵

不同季节环境指标均通过 KMO 检验（KMO>0.6）和 Bartlett 检验（$P<0.05$）。通过初始因子载荷表和筛选特征值，不同季节前 3 个主成分的累积贡献率分别为 83.63%、81.21%、84.49%、74.54%，所对应的 3 个主成分可以反映原始指标所提供的绝大部分信息，并对不同季节环境效益进行综合评价。通过对不同季节 3 个主成分中具有较高载荷变量值进行排序，结果（表 9）可知：春季第一主成分为 $PM_{2.5}$、相对湿度、气压，第二主成分为风速、$PM_{2.5}$，第三主成分为噪声；夏季第一主成分为气压、相对湿度、$PM_{2.5}$，第二主成分为 $PM_{2.5}$、I_{CHB}、噪声，第三主成分为噪声；秋季第一主成分为 $PM_{2.5}$、相对湿度、气压，第二主成分为风速、气压、噪声，第三主成分为风速；冬季第一主成分为相对湿度、$PM_{2.5}$、噪声，第二主成分为气压、CI，第三主成分为 $PM_{2.5}$、噪声。以上表明 $PM_{2.5}$是影响公园环境效益的重要指标。

表 9　各主成分因子载荷矩阵

因子	季节	因子载荷系数			季节	因子载荷系数		
		主成分 1	主成分 2	主成分 3		主成分 1	主成分 2	主成分 3
$PM_{2.5}$	春季	0.893	0.272	0.062	夏季	0.468	0.869	0.053
风速		−0.383	0.606	−0.090		−0.920	−0.361	0.151
温度		−0.966	0.052	0.066		−0.970	0.182	−0.049
相对湿度		0.968	−0.063	−0.051		0.950	0.161	−0.254
气压		0.848	0.354	0.07		0.736	−0.435	0.247
噪声		0.173	−0.432	0.816		0.191	0.483	0.837
I_{CHB}		−0.930	−0.051	0.044		−0.182	0.712	−0.648
CI		0.256	−0.677	−0.533		0.493	−0.724	−0.308
$PM_{2.5}$	秋季	0.933	0.204	0.099	冬季	0.649	0.181	0.728
风速		−0.357	0.531	0.587		−0.286	−0.644	−0.354
温度		−0.933	0.183	−0.031		−0.939	−0.017	0.332
相对湿度		0.982	−0.085	0.050		0.936	−0.151	−0.299
气压		0.777	0.403	0.232		−0.058	0.921	−0.144
噪声		0.387	0.356	−0.698		0.580	−0.532	0.577
I_{CHB}		−0.935	0.103	−0.112		−0.913	0.113	0.357
CI		0.123	−0.821	0.189		0.817	0.353	0.061

3.5.2 不同季节环境效益综合得分及评价

依据各项指标特征值、标准化数据计算环境效益综合得分表征环境的正负效应。由表 10 可知：春季灌草型最高，为 0.659，其次为乔木型、对照点；夏季乔木型最高，为 1.016，其次为灌草型、乔灌草型；秋季乔木型最高，为 0.631，其次为灌草型、乔木型；冬季乔木型最高，为 0.656，其次为灌草型、乔草型。整体来看，春季灌草型最高，乔木型其次，其余季节乔木型最高，灌草型其次。以上说明不同季节不同结构绿地环境效益综合得分各有不同，其中乔木型、灌草型得分较高。

表 10 不同季节环境效益综合得分

结构绿地	春季	夏季	秋季	冬季
乔草型	0.017	−0.577	0.145	0.213
乔灌型	−0.381	−0.272	0.093	−0.621
乔木型	0.491	1.016	0.631	0.656
灌草型	0.659	0.475	0.317	0.557
乔灌草型	−1.045	−0.162	−0.019	0.147
对照点	0.259	−0.480	−1.167	−0.952

4 讨论

4.1 I_{CHB}变化差异分析

不同季节不同结构绿地 I_{CHB} 日变化基本呈现“下午高，上午低”。人体舒适度感受季节排序为秋季、春季、夏季、冬季，分别处于较舒适（Ⅴ）、偏热（Ⅵ）、舒适（Ⅳ）、冷（Ⅱ），其中秋季舒适（Ⅳ）所占比例较高，这与张志永等[12]、段敏杰等[13]、吴思佳等[14]提出秋季人体舒适度尚佳，冬季城市绿地调节人体舒适能力较差的观点基本一致。夏季人体舒适度改善率较好，但处于偏热（Ⅵ），秋季改善率虽不佳，但处于舒适（Ⅴ），说明人体舒适度改善率具有季节差异性，这与 Klemm 等[15]、李克克[16]提出的树高、胸径和冠幅通过影响底层结构进而改变人体舒适度改善率的观点有所不同。不同季节对照点人体舒适度感受有时好于其他结构绿地，可能是由于对照点邻近水域，水体具有较大的比热容，可以贮存较多的热量并与调节温湿效应有关[17-19]，监测期间层次结构较为丰富的乔灌草型也未表现出舒适（Ⅳ）及较好的改善率，这与段敏杰等[13]等学者研究结果有所差异，至于产生差异的原因有待进一步深入研究。

4.2 $PM_{2.5}$变化差异分析

$PM_{2.5}$基本呈现“上午高，下午低”的状态，这与前者研究结果基本一致[20-21]。$PM_{2.5}$均值冬季最高，夏季最低，这与康新礼等[22]结果基本一致。夏季 $PM_{2.5}$表现最低（7.27～14.37 μg/m^3），可能是由于夏季监测时段主要以晴天为主，大气压强、空气温度较高，容易形成对流及湍流，加上夏季正值植被生长旺盛时期，不同结构绿地可以有效发挥吸收、吸滞污染物作用，有利于 $PM_{2.5}$的扩散和清除[23]；冬季 $PM_{2.5}$最高，这是由于冬季除供暖外，温度降低，大气层趋于稳定，环境容量相比较春季、夏季有所下降，地面出现“逆温”现象，使得污染物在近地层不断增加；低温加上相对静风也不利于 $PM_{2.5}$扩散[22,24]，再者公园邻近主干道，汽车尾气排放的污染物不断向公园内累积，产生“累积效应”。另外，对照点与不同结构绿地 $PM_{2.5}$差异不显著，甚至有时出现较低值，可能是由于滨水环境改变了水体周围的空气湿度，随着相对湿度的变化，$PM_{2.5}$等细颗粒物通过湿沉降及吸湿作用形成较大颗粒物，浓度降低[25-26]。

4.3 *CI* 变化差异分析

夏季、秋季不同结构绿地 *CI* 值高于其他季节，这可能是由于夏季、秋季植物枝繁叶茂，光电效应等均有助于负离子的产生[27-28]。不同季节对照点 *CI* 值均为容许（D），可能是由于硬质区域阻隔土壤的电离源导致 *CI* 值较低[29]；同时，公园内具有一定生理活性的空气负离子被 $PM_{2.5}$吸附，通过交互作用稀释空气负离子，或被植被叶表面及微尘俘获降低浓度[28,30-31]。

4.4 噪声变化差异分析

单一结构绿地、对照点噪声高于多层结构绿地，这与李冠衡等[32]、Koprowska 等[33]研究结果一致。由于噪声具有波动率较大的特点，噪声变化未表现出明显的变化特征。此外，研究过程中未考虑树种搭配及比例、叶面积指数、枝下高、平均高度和冠幅等因子与降噪能力的相关性，希望在今后的研究中进一步深入量化。

本文通过人体舒适度、$PM_{2.5}$、空气负离子、

噪声等常见环境指标，采用主成分法获取更为客观和科学的环境效益评价结果。实验过程中由于仪器设备有限，所得结果只适用于横向结构绿地之间，缺乏结合垂直结构绿地。已有研究发现，城市公园环境效益表现出复杂、综合和模糊性，而本研究的评价方法主要针对以晴天为主的天气，数据观测具有局限性，下一步应考虑不同天气、不同污染程度的影响，因此对于合理、科学和全面评价城市公园环境效益仍有探究空间。

5　结论

秋季不同结构绿地 I_{CHB} 日变化、均值变化为舒适（Ⅳ）等级为主，改善率为正效应；$PM_{2.5}$ 日变化呈现“上午高、下午低”的规律，与对照点差异不显著，冬季 $PM_{2.5}$ 均值最高，夏季最低，且季节日变化及均值达到Ⅱ级标准。不同结构绿地在不同季节的 *CI* 均值等级范围存在差异，其中同一季节乔灌草型 CI 均值最高，夏季和秋季的不同结构绿地 CI 均值显著高于其他季节。冬季噪声均值为Ⅰ~Ⅲ类别范围，其余季节为Ⅰ~Ⅱ类别范围，同一季节多层结构绿地噪声低于单一结构绿地，同一结构绿地秋季、冬季噪声显著高于其他季节。环境效益综合分析可知，$PM_{2.5}$ 为影响城市公园环境效益的主要影响因素；春季灌草型、其余季节乔木型综合得分最高。

因此，建议公园管理部门实行季节性绿地管理模式，针对夏季热岛效应问题，应重点种植抗旱草本植物类型，以减少高温环境下城市绿地表面的蒸发作用。此外，通过进一步研究比较不同结构绿地的环境效益表现，以期建立科学合理的绿地更新规划方案。具体而言，应在紧邻城市道路区域选择具有良好隔音效果的植被，结合噪声传播特征进行规划设计。同时，建议部署智能化监测系统，对公园绿地环境指标进行实时监测，以便及时调整管理措施；另外，定期开展市民反馈调查研究，收集群体使用需求和偏好信息，从而客观评估现有绿地功能配置的合理性和市民满意度，为优化调整绿地功能布局提供科学依据，以实现多样化、个性化的公共空间服务需求。

参考文献

[1]NOWAK D J,HIRABAYASHI S,DOYLE M,et al.Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health[J].Urban Forestry & Urban Greening,2018,29:40-48.

[2]ENDRENY T A.Strategically growing the urban forest will improve our world[J].Nature Communications,2018,9(1):1160.

[3]CHEN M,DAI F,YANG B,et al.Effects of urban green space morphological pattern on variation of $PM_{2.5}$ concentration in the neighborhoods of five Chinese megacities[J].Building and Environment,2019,158:1-15.

[4]郑诗禹,张绿水,郭晓敏,等.不同森林郁闭度环境内空气负氧离子的时空变化及环境影响要素研究:以广州帽峰山为例[J].生态环境学报,2021,30(11):2204-2212.

[5]陈家硕,荣立苹,高玉福,等.不同遮荫环境的温湿效应及其对人体舒适度的影响[J].西北林学院学报,2022,37(3):254-260,274.

[6]杨宣,宫聪.城市公园降温效应的影响因素研究进展[J].中国城市林业,2024,22(6):28-34.

[7]HAMI A,KHODAYARI N.Plants performance on noise pollution reduction based on visual characteristics perspectives[J].Human & Environment,2021,19(1):51-65.

[8]郭广,张静,马守存,等.1961—2010 年青海省人体舒适度指数时空分布特征[J].冰川冻土,2015,37(3):845-854.

[9]王月容,段敏杰,刘晶.北京市北小河公园绿地生态保健功能效应[J].科学技术与工程,2017,17(18):31-40.

[10]杜万光,王成,王茜,等.北京香山公园主要植被类型的夏季环境效应评价[J].林业科学,2018,54(4):155-164.

[11]石强,舒惠芳,钟林生,等.森林游憩区空气负离子评价研究[J].林业科学,2004,40(1):36-40.

[12]张志永,叶兵,杨军,等.杭州市城市森林生态保健功能动态变化监测[J].西北林学院学报,2014,29(5):31-36,255.

[13]段敏杰,王月容,刘晶.北京紫竹院公园绿地生态保健功能综合评价[J].生态学杂志,2017,36(7):1973-1983.

[14]吴思佳,董丽,范舒欣.下垫面类型对其温湿效应及人体舒适度的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2020,49(4):532-539.

[15]KLEMM W,HEUSINKVELD B G,LENZHOLZER S,et al.Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort[J].Landscape and Urban Planning,2015,138:87-98.

[16]李克克.杭州市 5 个公园植物群落微气候与人体舒适度关系研究[D].杭州:浙江农林大学,2021.

[17]ŞIMŞEK Ç K,HALIME Ö.Investigation of the effects of wetlands on micro-climate[J].Applied Geography,2018,97:48-60.

[18]CHEUNG P K,JIM C Y.Differential cooling effects of landscape parameters in humid-subtropical urban parks[J].Landscape and Urban Planning,2019,192:103651.

（下转第 45 页）