

DOI: 10.5846/stxb202109302752

刘畅,王月容,汤志颖,王茜,段敏杰,漆良华.不同群落结构风景游憩林生态保健效应——以北京西山国家森林公园为例.生态学报,2022,42(16):6499-6513.

Yang C, Wang Y R, Tang Z Y, Wang Q, Duan M J, Qi L H. Ecological health care effects of scenic recreational forests with different community structures: A case study of Beijing Xishan National Forest Park. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6499-6513.

不同群落结构风景游憩林生态保健效应 ——以北京西山国家森林公园为例

杨 畅^{1,2}, 王月容², 汤志颖¹, 王 茜², 段敏杰², 漆良华^{1,*}

1 国际竹藤中心 国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102

2 北京市园林绿化科学研究所, 园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室, 北京 100102

摘要:风景游憩林是城市森林的重要组成部分,具有减菌、降噪、滞尘、释氧及调节人体舒适度等生态保健效应,探索具有良好综合生态保健效应的景观模式对游憩林的建设和管理尤为重要。以北京西山国家森林公园乔-灌-草、乔-草和灌-草等 9 种不同群落结构风景游憩林为研究对象,通过野外监测和室内分析相结合等方法,研究了空气负离子浓度、PM_{2.5}浓度及消减率、噪音消减率、减菌率及人体舒适度的动态变化,分析了温度、湿度、风速等环境因子对生态保健效应的影响,运用综合指数法对生态保健效应进行定量评价。结果表明:(1)空气负离子浓度年变化范围为 296.67—1090.00 个/cm³,乔-灌-草结构年均最高,为(755.62±110.11)个/cm³,灌-草结构最低为(637.53±121.90)个/cm³;(2)PM_{2.5}浓度年变化范围为 6.83—63.04 μg/m³,且夏季<秋季<春季<冬季,乔-灌-草结构对 PM_{2.5}消减率最大(10.95%),灌-草结构最低(1.17%);(3)噪音消减率随着距离的增加均有一个最佳消减场,不同群落结构平均减噪率表现为乔-灌-草>乔-草>灌-草;(4)减菌率变化范围为 11.65%—44.60%,且乔-灌-草>乔-草>灌-草;(5)乔-草结构人体舒适度最好,灌-草结构最弱;(6)PM_{2.5}浓度和温度呈负相关,与湿度和风速呈正相关,细菌数量与温度、湿度、风速均呈正相关,噪音与温度、风速呈正相关,与湿度呈负相关,空气负离子浓度与湿度和风速呈负相关;(7)生态保健效应综合指数范围为 1.6565—9.1387,总体排序乔-灌-草>乔-草>灌-草。北京风景游憩林的建设,在群落结构上以乔-灌-草为宜,在树种选择上优先考虑油松、刺槐、侧柏等具有生态保健效应的乡土树种。

关键词:生态保健;风景游憩林;群落结构;季节动态

Ecological health care effects of scenic recreational forests with different community structures: A case study of Beijing Xishan National Forest Park

YANG Chang^{1,2}, WANG Yuerong², TANG Zhiying¹, WANG Qian², DUAN Minjie², QI Lianghua^{1,*}

1 International Centre for Bamboo and Rattan Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration/Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, Beijing 100102, China

2 Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing Key Laboratory of Ecological Function Assessment and Regulation Technology of Green Space, Beijing 100102, China

Abstract: The scenic recreational forest is an important part of the urban forest. It has ecological health care functions which include bacteria reduction, noise reduction, dust retention, oxygen release, and adjustment of human comfort. For the development and administration of the recreational forest, understanding how to explore a landscape model with an exceptional and comprehensive ecological health care effect is extremely crucial. This study took 9 kinds of scenic recreation forests with different community structures, including arbor-shrub-grass, arbor-grass and shrub-grass in Beijing Xishan

基金项目:北京市自然科学基金项目(8192018);北京市科技计划课题(Z161100001116065)

收稿日期:2021-09-30; 网络出版日期:2022-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qlh@icbr.ac.cn

National Forest Park as the research object. We investigated the dynamic changes in air anion concentration, $PM_{2.5}$ concentration and reduction rate, noise reduction rate, bacteria reduction rate, and human comfort using a combination of field monitoring, interior analysis, and the complete index approach. This study analyzed the effects to ecological health care of environmental factors such as temperature, humidity and wind speed, which used the comprehensive index method to quantitatively evaluate the effect of ecological health care. The results showed that: (1) the annual variation range of air anion concentration was 296.67—1090.00 con/cm^3 , the air anion concentration of tree-shrub-grass structure was the highest ($755.62 \pm 110.11 con/cm^3$), and the shrub-grass structure was the lowest one ($637.53 \pm 121.90 con/cm^3$). (2) The annual variation range of $PM_{2.5}$ concentration was 6.83—63.04 $\mu g/m^3$, and the order of concentration value was summer < autumn < spring < winter, the reduction rate of $PM_{2.5}$ by the arbor-shrub-grass structure was the largest (10.95%), and reduction rate of $PM_{2.5}$ by shrub-grass structure was the lowest (1.17%). (3) There was an optimal noise reduction field with the increase of distance, and the average noise reduction rate of different community structures was as follows: arbor-shrub-grass > arbor-grass > shrub-grass. (4) The range of bacteria reduction rate was 11.65%—44.60%, and arbor-shrub-grass > arbor-grass > shrub-grass. (5) The comfort index of the arbor-grass structure was 8.83 and that of the shrub-grass structure was 9.06. (6) The number of bacteria was strongly connected with temperature, humidity, and wind speed; $PM_{2.5}$ concentration was negatively correlated with temperature, but positively correlated with humidity and wind speed; Temperature and wind speed were favorably connected with noise, while the humidity was adversely correlated; Humidity and wind speed have a negative relationship with air anion concentration. (7) The comprehensive index of ecological health care effect ranged from 1.6565 to 9.1387, and the overall order was arbor-shrub-grass > arbor-grass > shrub-grass. For the construction of scenic recreational forest in Beijing, it is appropriate to take arbor-shrub-grass as the community structure, give priority to local tree species with ecological health care effects such as *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, and *Platycladus orientalis* in the selection of tree species.

Key Words: ecological health care; recreational forest; community structure; seasonal dynamics

随着城市化的快速发展及人们追求更优的生活环境和品质,生态保健意识不断增强^[1]。风景游憩林具有游玩和休憩的自然条件及人工基础服务设施,作为城市森林的一种重要类型,不仅在改善和维持生态环境方面具有重要作用^[2-4],在调节气候^[5-6]、丰富视觉环境^[7]、促进居民体力与脑力恢复^[8]、维持身心健康^[9]和获得愉悦感受^[10]等生态保健方面也具有独特优势。生态保健效应是基于植物景观的生态、美学、社会、生产等 4 大功能,对人体身心健康所产生的各类直接有益功效,通常以空气负离子浓度、人体舒适度、减菌率、降噪率、 $PM_{2.5}$ 消减率等环境效应指标进行表征^[11-13]。

Wang 等^[14]研究了五大连池风景区空气负离子的变化规律,指出空气负离子日变化呈“U”型分布且与环境因子的相关性与季节有关。陈波等^[15]研究了北京植物园红松(*Pinus koraiensis*)林不同天气条件下的 $PM_{2.5}$ 浓度,认为在不同天气条件下其均有强大的净化空气能力。王琴等^[16]研究了武汉市 15 种常见乔木滞尘能力,并结合叶表微形态分析滞尘机理,认为叶表面粗糙度、蜡质含量和沟槽宽度等是影响植物滞尘的重要因素。美国学者首次用模型分析了圣路易斯地区城市森林对大气中主要污染物的净化作用,指出绿地减少 PM_{10} 效果最显著^[17]。Streiling 等^[18]研究了城市公园胡杨(*Populus euphratica*)在改善气候方面的能力,指出植物对改善热环境和空气质量组分有积极作用。Bowler 等^[19]通过植树、创建公园和绿色屋顶,研究了绿地的降温效应,指出绿地周围平均可降低气温 1℃。Arghavani 等^[20]研究了夏季地表植被、屋顶植物、地表植被+屋顶植物对人体舒适度的影响,指出绿地通过白天降温、夜间升温提高舒适度。张艳丽等^[21]研究了成都市植物廊道的 8 种绿化植物降温增湿以及固碳释氧的生态保健效应,指出夏季单位面积植物固碳释氧和降温增湿能力最强。Stanhope 等^[22]研究了城市公园绿地生态保健效应对身体机能的影响,指出优质的绿地空间可以减轻疼痛。

国内外有关生态保健的研究多集中于对绿地的整体效应,且主要针对一种或两种保健因子,或以某一个季节为时间段,而对群落结构差异、动态变化、影响因素及多种保健因子综合效应等研究报道鲜见。因此,论文以北京西山国家森林公园风景游憩林为研究对象,通过野外监测和室内分析相结合等方法,探讨了乔-灌-草、乔-草和灌-草等 9 种不同群落结构下的生态保健效应,研究了空气负离子浓度、PM_{2.5} 浓度及消减率、噪音消减率、减菌率及人体舒适度的动态变化,分析了温度、湿度、风速等环境因子对生态保健效应的影响,运用综合指数法对生态保健效应进行定量评价,旨在探索城市风景游憩林适宜的群落结构,为其建设与管理提供科学依据。

1 研究区概况

西山国家森林公园位于北京市西郊,公园植被是距城区最近的风景区(39°58'18.17"N, 116°11'51.20"E),总面积 59.7 km²,平均坡度 15°—35°,土壤主要为砂质土,腐殖质和团粒结构较欠缺,pH 值为 5.5—7.5。研究区属于温带季风气候区,四季分明;夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年降水量 600 mm 左右;年平均气温 10—13℃;植被覆盖率达 98.5%,林分起源上以人工林为主,生长状况良好,植被类型主要为阔叶林和针叶林,主要树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与群落调查

于 2019 年在对北京西山国家森林公园踏查的基础上,选择立地条件相似,植物群落发育较为完善的风景区,设置乔-灌-草(A)、乔-草(B)、灌-草(C),3 种群落结构类型的样地,样地面积为 20 m×20 m,每种群落类型设置 3 个重复(A1、A2、A3;B1、B2、B3;C1、C2、C3)。在每个样地内设置 5 m×5 m 的灌木样方和 1 m×1 m 的草本样方。在样地内进行每木检尺和群落特征调查,乔木层调查树种组成和胸径、树高、冠幅、郁闭度,灌木层调查物种组成、株高、地径、盖度,草本层调查物种组成、高度和盖度。在春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月、次年 1—2 月)开展生态保健因子监测。研究区位置与样地基本情况详见图 1 与表 1 所示。

2.2 生态保健指标监测与评价

采用 DLY-5G 空气负离子测定仪测定空气负离子浓度,仪器位置距离地面 1.5 m,每个季节选择 3 天晴好天气(风速<2 m/s),观测时间为 8:00—18:00,每间隔 2 h 观测 1 次,读取 3 次取其均值作为空气负离子浓度测定值。

PM_{2.5}的测定采用 Dustmate 手持空气颗粒物监测仪,仪器的位置距离地面 1.5 m,每个季节选择 3 天晴好天气(风速<2 m/s),在 8:00—18:00,每间隔 2 h 观测一次,重复测定 3 次为 1 组,取其均值作为 PM_{2.5}浓度测定值。PM_{2.5}消减率计算公式为:

$$P = \frac{C_s - C_m}{C_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中, P 为消减率, C_s 代表无植被覆盖点的 PM_{2.5}浓度, C_m 是实测样地的 PM_{2.5}浓度。

减噪效应主要以夏季为主,采用 NL-52 噪音测定仪测定噪音,固定声源 80—90 dB,距声源 0 m、5 m、10 m、15 m、20 m 同时测定噪音值,每间隔 2 min 记录一组数据,重复 3 次取均值。噪音的消减率计算公式如下:

$$N = \frac{L_0 - L_m - \Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, N 代表实测样地的消减率, L_0 代表样地噪音源的噪音值, L_m 为与噪音源距离 m 的噪音值,分别为 5、10、15、20 m。 ΔL 为距离为 m 时噪音的自然衰减量。

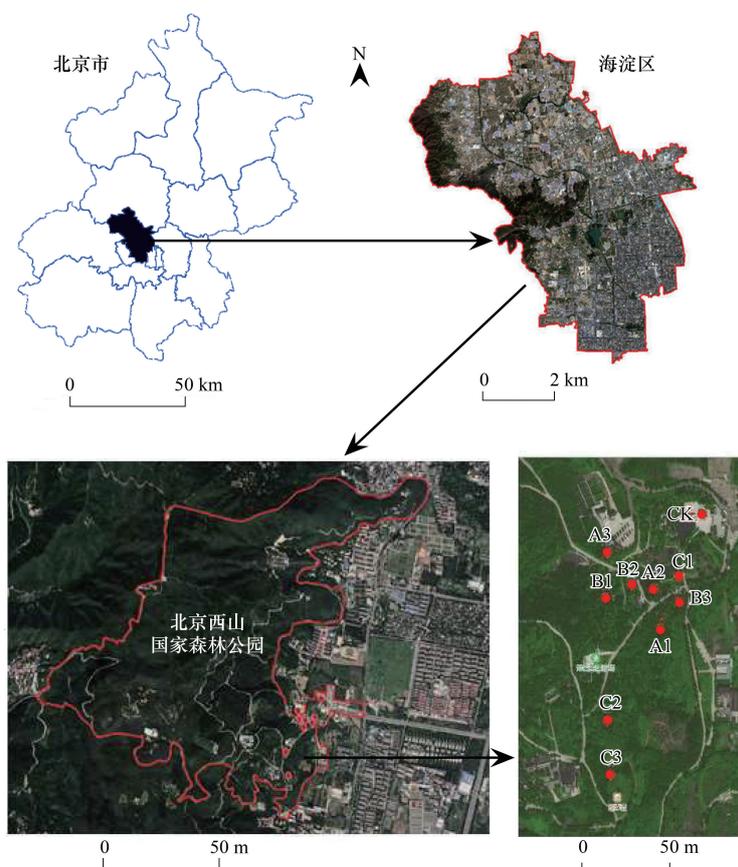


图1 研究区位置

Fig.1 The location of study area

表1 样本基本信息

Table 1 Basic information of test plot

样地编号 Plot No.	群落结构 Community structure	平均胸径/cm Mean DBH	乔木层平均 株高/m Average plant height	乔木层 郁闭度/% Tree canopy density	灌木层 盖度/% Shrub coverage	草本层 盖度/% Herb coverage	群落主要物种 Main species of community
A1	乔-灌-草	15.7±1.8	7.42±0.35	60	96	29	油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>) + 刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>) - 荆条 (<i>Vitex negundo</i>) + 胡枝子 (<i>Lespedeza bicolor</i>) - 狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>) + 马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>) + 牵牛 (<i>Ipomoea nil</i>) + 鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>)
A2	乔-灌-草	23.2±5.3	7.54±1.50	50	90	53	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>) + 油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>) + 国槐 (<i>Styphnolobium japonicum</i>) + 侧柏 (<i>Platycladus orientalis</i>) - 山杏 (<i>Armeniaca sibirica</i>) + 榆叶梅 (<i>Amygdalus triloba</i>) + 沙地柏 (<i>Juniperus sabina</i>) + 丁香香 (<i>Syzygium aromaticum</i>) - 鸢尾 (<i>Iris tectorum</i>) + 牛筋草 (<i>Eleusine indica</i>) + 旋覆花 (<i>Inula japonica</i>) + 虎尾草 (<i>Chloris virgata</i>)
A3	乔-灌-草	12.7±3.1	5.32±0.60	50	85	60	油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>) + 白皮松 (<i>Pinus bungeana</i>) + 银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>) - 丁香香 (<i>Syzygium aromaticum</i>) + 珍珠梅 (<i>Sorbaria sorbifolia</i>) + 碧桃 (<i>Amygdalus persica</i>) + 梨树 (<i>Pyrus spp</i>) - 马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>) + 虎尾草 (<i>Chloris virgata</i>) + 狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>) + 刺儿菜 (<i>Cirsium arvense</i>)
B1	乔-草	22.0±2.9	7.17±1.03	70	—	93	油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>) - 芍药 (<i>Paeonia lactiflora</i>) + 牡丹 (<i>Paeonia suffruticosa</i>) + 牛筋草 (<i>Eleusine indica</i>) + 狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>) + 马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>) + 醋浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>) + 虎尾草 (<i>Chloris virgata</i>)

续表

样地编号 Plot No.	群落结构 Community structure	平均胸径/cm Mean DBH	乔木层平均株高/m Average plant height	乔木层郁闭度/% Tree canopy density	灌木层盖度/% Shrub coverage	草本层盖度/% Herb coverage	群落主要物种 Main species of community
B2	乔-草	21.0±1.5	6.30±0.59	60	—	83	侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>) - 芍药(<i>Paeonia lactiflora</i>) + 牡丹(<i>Paeonia suffruticosa</i>) + 刺儿菜(<i>Cirsium arvense</i>) + 牛筋草(<i>Eleusine indica</i>) + 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)
B3	乔-草	19.4±3.2	6.65±0.48	70	—	95	侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>) + 栾树(<i>Koelreuteria paniculata</i>) - 芍药(<i>Paeonia lactiflora</i>) + 牛筋草(<i>Eleusine indica</i>) + 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>) + 知风草(<i>Eragrostis ferruginea</i>)
C1	灌-草	—	—	—	85	80	榆叶梅(<i>Amygdalus triloba</i>) + 沙地柏(<i>Juniperus sabina</i>) + 金银忍冬(<i>Lonicera maackii</i>) + 椴树(<i>Kerria japonica</i>) - 虎尾草(<i>Chloris virgata</i>) + 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>) + 旋覆花(<i>Inula japonica</i>) + 刺儿菜(<i>Cirsium arvense</i>)
C2	灌-草	—	—	—	70	48	紫薇(<i>Lagerstroemia indica</i>) - 虎尾草(<i>Chloris virgata</i>) + 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>) + 牛筋草(<i>Eleusine indica</i>) + 马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>) + 苦苣菜(<i>Sonchus oleraceus</i>)
C3	灌-草	—	—	—	95	43	麦李(<i>Cerasus glandulosa</i>) + 荆条(<i>Vitex negundo</i>) - 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>) + 鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>) + 牵牛(<i>Ipomoea nil</i>) + 藜(<i>Chenopodium album</i>) + 小蓬草(<i>Erigeron canadensis</i>)

A1: 乔-灌-草结构第一个样地 The first sample plot of arbor-shrub-grass structure; A2: 乔-灌-草结构第二个样地 The second sample plot of arbor-shrub-grass structure; A3: 乔-灌-草结构第三个样地 The third sample plot of arbor-shrub-grass structure; B1: 乔-草结构第一个样地 The first sample plot of arbor-grass structure; B2: 乔-草结构第二个样地 The second sample plot of arbor-grass structure; B3: 乔-草结构第三个样地 The third sample plot of arbor-grass structure; C1: 灌-草结构第一个样地 The first sample plot of shrub-grass structure; C2: 灌-草结构第二个样地 The second sample plot of shrub-grass structure; C3: 灌-草结构第三个样地 The third sample plot of shrub-grass structure

减菌效应主要以夏季为主,将盛有牛肉膏琼脂培养基的培养皿置于样地中心水平支架上,打开接种空气 5 min 后,盖上培养皿封口带回实验室,倒置于 30℃ 恒温培养箱中,培养 48 h 测定细菌数量,每个样地放置 3 个培养皿。减菌率的计算公式如下:

$$P = \frac{E_s - E_c}{E_s} \times 100\% \tag{3}$$

式中, P 为减菌率, E_s 为对照的细菌数, E_c 为样地中的细菌数。

采用 Kestrel-4500 袖珍式气候测量仪,每个季节选择三天天气较晴好(风速 < 2 m/s),在 8:00—18:00,每间隔 2 h 测定 1 次样地中心的温度、湿度、风速,重复 3 次取均值,计算人体舒适度。人体舒适度计算公式(公式 4)、等级(表 2)如下:

$$S_i = 0.6(|T_i - 24|) + 0.07(|RH_i - 70|) + 0.5(|V_i - 2|) \tag{4}$$

式中, S_i 为人体舒适度, T_i 为气温(℃), RH_i 为相对湿度(%), V_i 为风速(m/s)。

表 2 舒适度等级

Table 2 Comfort level

级别 Level	舒适度指数 S Comfort index	评价 Evaluation	级别 Level	舒适度指数 S Comfort index	评价 Evaluation
1 级 The first level	$S \leq 4.55$	舒适	3 级 The third level	$6.95 < S \leq 9.00$	不舒适
2 级 The second level	$4.55 < S \leq 6.95$	较舒适	4 级 The fourth level	$S > 9.00$	极不舒适

2.3 生态保健效应评价

选择植物生长最旺盛的夏季测定的空气负离子浓度、PM_{2.5}消减率、噪音消减率、减菌率、人体舒适度 5 个指标,开展不同群落结构风景游憩林的生态保健效应评价。空气负离子浓度、PM_{2.5}消减率、减菌率、噪音消减率等为正效应指标,采用公式(5)进行标准化处理;人体舒适度为负效应指标,则采用公式(6)进行标准化处

理。采用公式(7)和(8)按同类相乘,异类相加的综合指数法计算生态保健效应单项指数和综合指数^[23]。

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (5)$$

$$X'_{ij} = (\max X_{ij} - X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (6)$$

式中, X 为各指标原始值; X' 为标准化后的值; i 为第*i*个监测指标 $i = 1, 2, \dots, n$; j 为不同群落结构风景游憩林, $j = 1, 2, \dots, m$ 。

$$Y_{ij} = \frac{X'_{ij}}{M_{ij}} \quad (7)$$

式中, Y_{ij} 为单项指数, M_{ij} 取各指标标准值的平均值。

$$I = \sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^n Y_{ij} \quad (8)$$

式中, I 为综合指数, Y_{ij} 为第*i*个监测指标,第*j*个样地的单项指数, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ 。

2.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 和 SPSS 软件进行数据处理,利用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和邓肯(Duncan)检验法,对北京西山国家森林公园不同群落结构风景游憩林的空气负离子浓度、PM_{2.5}消减率、噪音消减率、减菌率、人体舒适度进行方差分析与多重比较,利用聚类分析,对不同群落结构风景游憩林生态保健效应进行分类,运用 Python 3.8.8 作图。

3 结果与分析

3.1 空气负离子浓度动态变化

北京西山国家森林公园春、夏、秋、冬四个季节不同群落结构风景游憩林的空气负离子浓度日变化范围分别为 296.67—770.00 个/cm³、555.33—1030.00 个/cm³、683.33—1090.00 个/cm³和 263.33—760.00 个/cm³(图 2),均

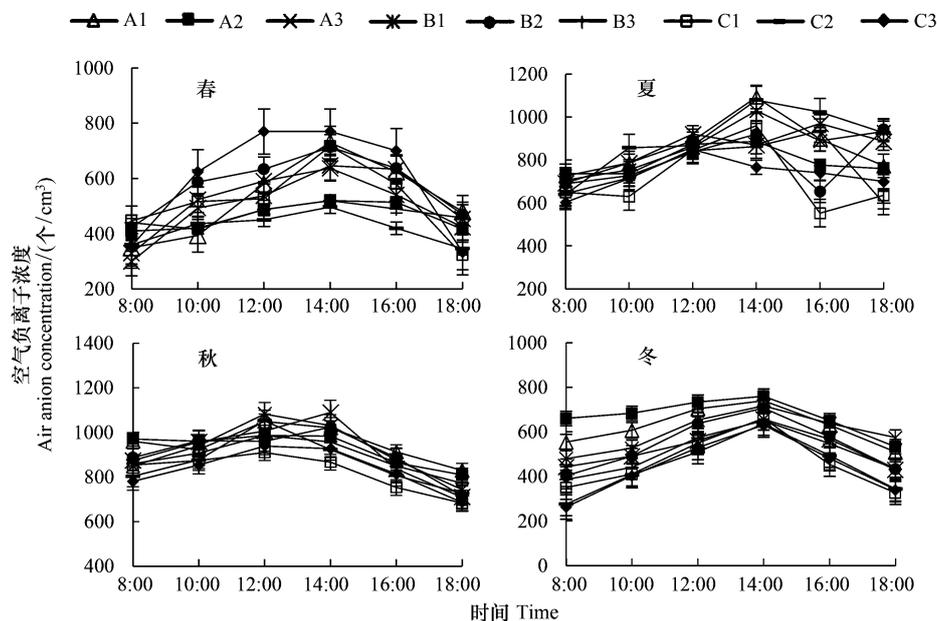


图 2 空气负离子浓度日变化

Fig.2 Diurnal variation of air anion concentration

A1: 乔-灌-草结构第一个样地 The first sample plot of arbor-shrub-grass structure; A2: 乔-灌-草结构第二个样地 The second sample plot of arbor-shrub-grass structure; A3: 乔-灌-草结构第三个样地 The third sample plot of arbor-shrub-grass structure; B1: 乔-草结构第一个样地 The first sample plot of arbor-grass structure; B2: 乔-草结构第二个样地 The second sample plot of arbor-grass structure; B3: 乔-草结构第三个样地 The third sample plot of arbor-grass structure; C1: 灌-草结构第一个样地 The first sample plot of shrub-grass structure; C2: 灌-草结构第二个样地 The second sample plot of shrub-grass structure; C3: 灌-草结构第三个样地 The third sample plot of shrub-grass structure

值分别为(492.94±68.44) 个/cm³、(809.40±61.01) 个/cm³、(819.98±49.80) 个/cm³和(534.01±7.46) 个/cm³,变异系数分别为 0.139、0.075、0.031 和 0.145。秋季空气负离子浓度最高,且变异最小。春季空气负离子日变化表现为“单峰”曲线,在 8:00 最低,14:00 最高,麦李+荆条-狗尾草+鬼针草+牵牛+藜+小蓬草的灌草结构(C3)空气负离子浓度最高,为 770.00 个/cm³。夏季绿地空气负离子浓度在 14:00 以后变化较大,出现了骤降和急升的现象。秋季和冬季空气负离子浓度均呈现先增加后减小的“单峰”曲线,秋季最高值出现在 14:00 的乔-草结构。冬季空气负离子浓度较低,最高值出现于 14:00。

空气负离子浓度随季节变化明显(表 3),秋季最高(846.41±46.76) 个/cm³,冬季最低(529.74±88.28) 个/cm³。乔-灌-草结构的油松+刺槐-荆条+胡枝子-狗尾草+马唐+牵牛+鬼针草(A1)年均最高,为(755.62±110.11) 个/cm³,灌-草结构中榆叶梅+沙地柏+金银忍冬+棣棠-虎尾草+狗尾草+旋覆花+刺儿菜(C1)最低,为(637.53±121.90) 个/cm³,整体表现为乔-灌-草>乔-草>灌-草。多重比较结果表明,不同群落结构风景游憩林春季空气负离子浓度变化幅度较小,差异不显著;夏季、秋季和冬季差异显著($P < 0.05$),乔-灌-草和乔-草结构空气负离子浓度效应具有明显优势。

表 3 空气负离子浓度季节变化

Table 3 Air anion concentration in different seasons

样地 Plot	春季 Spring /(个/cm ³)	夏季 Summer /(个/cm ³)	秋季 Autumn /(个/cm ³)	冬季 Winter /(个/cm ³)	年平均 Annual average /(个/cm ³)
A1	671.48±212.70a	809.61±40.14ab	908.63±136.80a	632.78±37.28a	755.62±110.11a
A2	645.56±203.72a	788.15±13.81abc	905.19±131.71a	643.15±19.0a	745.51±109.30ab
A3	654.63±227.99a	807.41±48.98ab	895.11±118.09ab	629.63±34.63ab	746.69±129.4 ab
B1	679.44±266.82a	749.44±86.42abc	871.74±107.18ab	538.33±13.84b	709.74±120.54abc
B2	645.56±232.56a	815.37±80.23a	819.48±68.60abc	563.70±24.18b	711.03±110.27abc
B3	648.15±246.48a	717.96±38.29bc	839.78±86.81abc	532.22±110.27abc	684.53±111.5bcd
C1	582.59±173.66a	699.07±27.19c	796.41±49.32bc	472.04±18.99d	637.53±121.90d
C2	595.37±256.28a	754.44±103.30ab	843.96±97.40abc	480.37±53.18cd	668.54±140.46cd
C3	585.00±150.91a	699.81±31.46c	825.93±131.65abc	453.33±26.40d	641.02±137.85d
平均值 Average	611.13±76.67	733.09±91.47	846.41±46.76	529.74±88.28	680.29±72.05

不同的小写字母表示同一季节不同群落结构风景游憩林空气负离子浓度在 $P < 0.05$ 水平上显著性差异

3.2 PM_{2.5}浓度动态变化及消减率

不同季节 PM_{2.5}浓度日变化有明显的差异(图 3),春夏秋冬日变化范围分别为 8.07—18.53 μg/m³、6.83—30.43 μg/m³、24.32—43.59 μg/m³和 38.07—63.04 μg/m³,均值分别为(13.26±0.23) μg/m³、(14.66±0.39) μg/m³、(33.32±0.88) μg/m³和(49.82±0.53) μg/m³,变异系数分别为 0.017、0.027、0.026 和 0.011。春季乔-灌-草结构 PM_{2.5}浓度最低,整体趋势呈“双谷”型,谷值分别在 10:00 和 14:00,且 14:00 最低(8.07 μg/m³),18:00 达最高(18.53 μg/m³)。夏季从 8:00 开始 PM_{2.5}浓度持续降低,到 14:00 达到最低(16.03 μg/m³)后缓慢上升。秋季 PM_{2.5}浓度从 8:00 开始上升,18:00 达到一天中的最高值(43.59 μg/m³)。冬季 PM_{2.5}浓度整体最高,在 8:00 为一天中的最高值,后持续下降至 16:00 时达到最低值。

PM_{2.5}浓度四个季节表现为夏季<秋季<春季<冬季(表 4)。浓度最低群落结构分别为灌-草结构(C1)和乔-灌-草结构(A1),年均值分别为(33.07±9.10) μg/m³、(33.09±9.83) μg/m³,灌-草结构(C3)PM_{2.5}浓度最高,年均值为(34.00±10.48) μg/m³。多重比较结果表明,不同群落结构风景游憩林 PM_{2.5}浓度在夏季、秋季和冬季达显著性差异($P < 0.05$)。

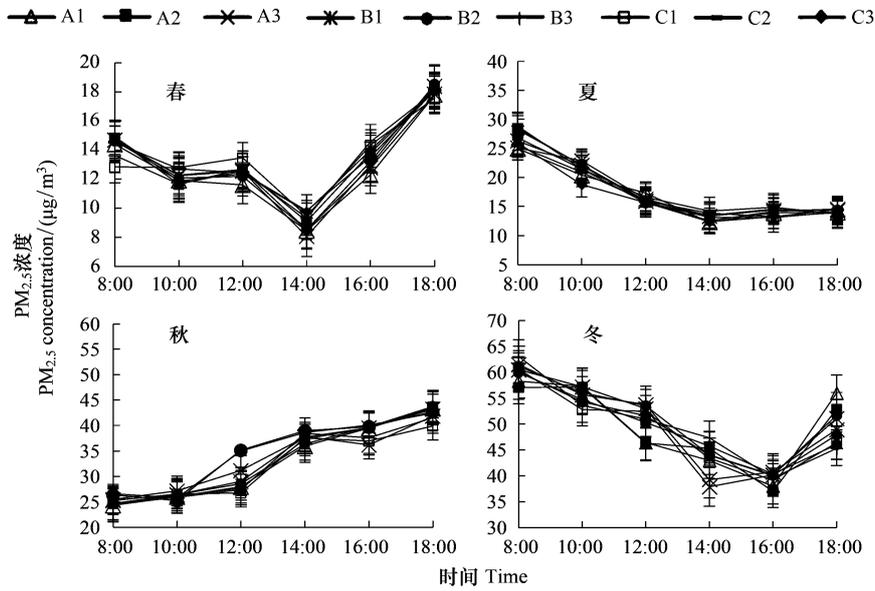


图3 PM_{2.5}浓度日变化

Fig.3 Diurnal variation of PM_{2.5} concentration

表4 PM_{2.5}浓度季节变化

Table 4 PM_{2.5} concentration in different seasons

样地 Plot	春季 Spring /(µg/m ³)	夏季 Summer /(µg/m ³)	秋季 Autumn /(µg/m ³)	冬季 Winter /(µg/m ³)	年平均值 Annual average /(µg/m ³)
A1	40.81±41.02a	17.13±5.90cd	32.86±20.19bc	49.83±10.95b	33.09±9.83a
A2	41.82±41.65a	18.51±5.71ab	33.16±20.19abc	49.28±10.73b	33.66±9.39a
A3	42.69±43.47a	17.89±5.46bc	32.78±20.54bc	49.95±12.37b	33.53±9.76a
B1	42.29±42.80a	17.59±6.00bcd	34.05±20.84ab	49.97±11.10b	33.82±9.90a
B2	42.09±42.55a	18.13±5.49abc	33.25±20.26abc	49.52±10.48b	33.78±9.70a
B3	40.54±40.29a	18.55±5.72ab	32.57±19.99bc	49.96±11.71b	33.18±9.09a
C1	40.71±40.38a	18.53±5.40ab	32.15±19.87c	49.13±10.98b	33.07±9.10a
C2	42.57±42.78a	17.42±5.86bcd	34.69±21.43a	49.65±10.86b	33.98±10.02a
C3	42.67±42.99a	16.65±5.29d	34.76±21.32a	51.09±12.27ab	34.00±10.48a
平均值 Average	42.08±1.16	17.96±0.73	33.51±0.94	50.15±11.24	33.79±0.74

不同的小写字母表示同一季节不同群落结构风景游憩林 PM_{2.5}浓度在 P<0.05 水平上显著性差异

PM_{2.5}的消减效应随季节变化较大(表5),春季、夏季和秋季有显著性差异(P<0.05)。春季 PM_{2.5}消减作用表现为乔-草>乔-灌-草>灌-草,以 A1 最优,达到了 9.04%。夏季表现为灌-草>乔-灌-草>乔-草,以 C3 和 A1 消减作用较高,消减率分别为 12.72% 和 10.95%,乔-草结构的侧柏+栎树-芍药+牛筋草+狗尾草+知风草(B3)消减效应最弱,为 4.49%。秋季 PM_{2.5}的消减作用以乔-灌-草最优,达到了 9.63%。冬季 PM_{2.5}由于浓度较高,不同群落的风景区憩林也表现出了一定的消减作用,最高为 7.56%,最低为 4.37%。

3.3 噪音消减率和减菌率

不同群落结构风景游憩林的噪音在自然衰减和植物消减作用下,噪音值产生不同变化(图4)。距音源 5 m、10 m、15 m、20 m 实测噪音最低值分别为 68.87 dB、60.73 dB、58.03 dB、54.60 dB。距噪音源 5 m 消减效应最好的为乔-草结构的 B3 和灌-草结构的麦李+荆条-狗尾草+鬼针草+牵牛+藜+小蓬草(C3),消减率分别为 4.42% 和 3.93%。距噪音源 10 m 时消减效应最好的为乔-灌-草结构 A1,乔-草结构 B3,灌-草结构 C3。距噪

音源 15 m 时乔-灌-草结构 A1 和乔-草结构 B3 消减率最高,分别为 10.36%、12.93%。距噪声源 20 m 时消减效应以乔-草结构的 B3 最好。

表 5 PM_{2.5}消减率季节变化
Table 5 PM_{2.5}reduction rate in different seasons

样地 Plot	春季 Spring/%	夏季 Summer/%	秋季 Autumn/%	冬季 Winter/%	年平均值 Annual average/%
A1	9.04±0.48a	10.95±3.64ab	7.26±2.75ab	6.39±1.20a	8.41±1.75a
A2	5.55±0.75ab	6.22±4.40c	4.51±0.58ab	7.16±1.16a	5.86±0.97a
A3	6.71±2.73ab	7.04±2.74abc	9.63±6.05a	6.53±3.48a	7.48±1.25a
B1	6.74±1.71ab	8.49±3.54abc	3.41±0.54b	6.17±1.69a	6.20±1.83a
B2	7.09±1.96ab	7.76±2.76b	4.83±0.83ab	6.82±0.65a	6.62±1.09a
B3	8.30±1.93ab	4.49±3.04c	6.56±1.50ab	6.39±2.44a	6.43±1.35a
C1	7.69±2.10b	6.77±3.97c	8.14±2.29ab	7.56±1.31a	7.54±0.50a
C2	5.17±1.37ab	9.63±2.45abc	3.93±1.65ab	6.71±1.17a	6.36±2.13a
C3	5.33±1.77ab	12.72±1.41a	3.16±0.44b	4.37±3.07a	6.39±3.73a
平均值 Average	6.85±1.27	8.23±0.02	5.71±2.15	6.45±0.84	6.81±0.77

不同的小写字母表示同一季节不同群落结构风景游憩林 PM_{2.5}消减率在 P < 0.05 水平上显著性差异

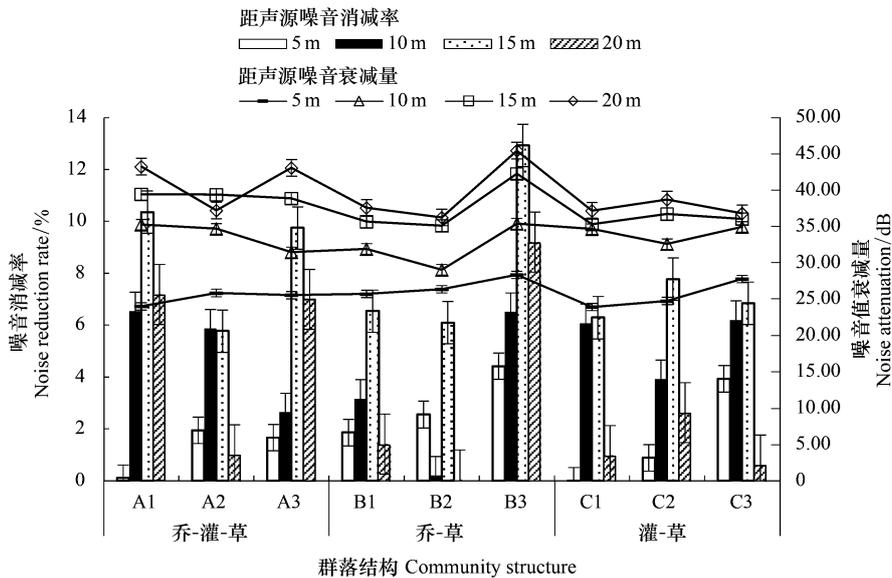


图 4 噪音消减率与衰减量

Fig.4 Noise reduction rate and noise attenuation

不同群落结构风景游憩林减菌率表现为乔-灌-草>乔-草>灌-草(图 5),减菌率均值分别为(36.39±5.94)%、(28.26±6.20)%、(18.67±7.22)%。减菌效应以 A1 最优,其次为 B3,减菌率分别为 44.60%、38.56%。减菌效果最弱的为灌-草结构紫薇-虎尾草+狗尾草+牛筋草+马唐+苦苣菜(C2),减菌率为(11.65±1.81)%,上下限较为接近,都处于游憩林中减菌率的最小值,A1 减菌率分别为 B3 和 C2 的 1.16、3.83 倍。减菌效果最不稳定的为灌-草结构麦李+荆条-狗尾草+鬼针草+牵牛+藜+小蓬草(C3),减菌率为(28.60±14.22)%,上下限距离最远,且中位数基本与下限持平,减菌效果最为稳定的是灌-草结构榆叶梅+沙地柏+金银忍冬+棣棠-虎尾草+狗尾草+旋覆花+刺儿菜(C1),减菌率为 15.76±1.02%,其上限下限和中位数最为接近。

3.4 人体舒适度动态变化

春、夏、秋、冬不同季节人体舒适度指数日变化范围分别为 3.54—7.39、2.80—9.63、5.37—9.26 和 11.31—

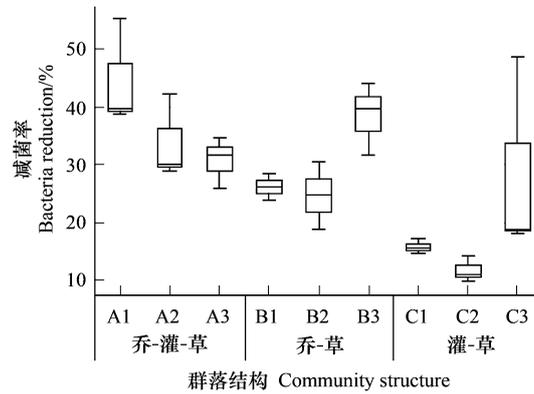


图5 减菌率

Fig.5 Bacteria reduction rate

18.07(图6),均值分别为 4.90 ± 0.18 、 6.74 ± 0.23 、 6.84 ± 0.08 和 14.29 ± 0.27 , 变异系数分别为 0.037、0.034、0.012 和 0.019。春季人体舒适度日变化趋势成“√”型,在“舒适”等级以上达到了 46.7%,且集中于 12:00—16:00。夏季舒适度指数呈现单“峰”曲线,从 8:00 开始逐渐上升,峰值出现在 14:00,此时舒适度指数为 9.10—10.22,体感为“极不舒适”等级。秋季舒适度指数呈现先降低后增高的趋势,在 12:00—16:00 舒适度指数较低,最低值为 5.84,体感为“较舒适”等级。冬季舒适度指数在 8:00 最高(18.07),在 12:00—14:00 时达到最低(10.14),达“极不舒适”等级。

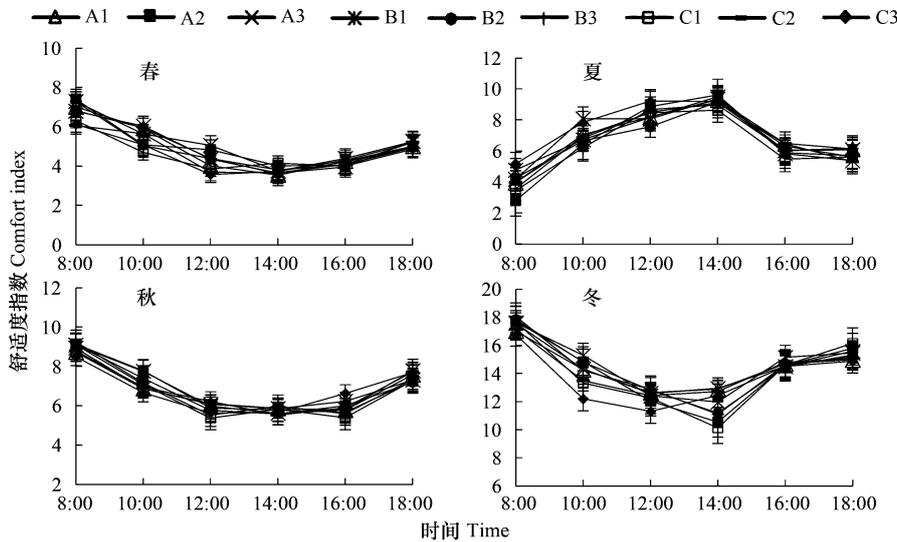


图6 舒适度指数日变化

Fig.6 Daily variation of comfort index

人体舒适度不同季节有明显的差异(图7),舒适度指数春季最优(4.92 ± 0.18),其次是秋季(7.48 ± 0.08)和夏季(7.98 ± 0.25),冬季因寒冷干燥最高(15.44 ± 0.18)表现出“极不舒适”。就群落结构而言,人体舒适度以 C1 最优的,最差为 B1,年均舒适度指数分别为 8.83 ± 4.02 、 9.06 ± 3.92 。在春季,不同群落结构出现显著差异,以 C1 最优,舒适度指数为 4.64 ± 0.92 。夏季乔-灌-草结构和乔-草结构最为舒适,灌-草结构最差。秋季总体上比夏季舒适,以灌-草结构最优(7.32 ± 0.61)。冬季不同群落结构风景游憩林人体舒适度指数差异不大。

3.5 生态保健效应影响因子与综合评价

生态保健效应与环境因子相关性分析结果表明(图8),PM_{2.5}浓度和温度呈负相关,与湿度和风速呈正相

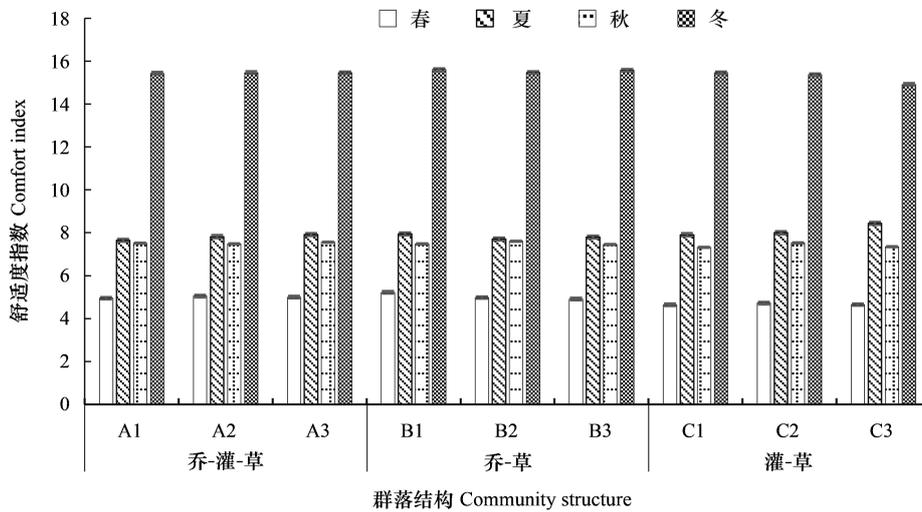


图 7 舒适度指数季节变化

Fig.7 Seasonal variation of comfort index

关;细菌数量与温度、湿度、风速均呈正相关,在一定程度上温度、湿度、风速均有利于细菌的生长繁殖;噪音与温度、风速呈正相关,而与湿度呈负相关;空气负离子浓度与温度呈正相关,与湿度和风速呈负相关。

在各保健因子之间,PM_{2.5}浓度与细菌数量和噪音量呈正相关,相关系数分别为 0.452、0.432,与空气负离子浓度呈负相关,相关系数为 -0.627;噪音则与细菌数量呈正相关且达显著水平(P<0.05),相关系数为 0.654;空气负离子浓度与 PM_{2.5}浓度和菌落数呈负相关且达显著水平(P<0.05)相关系数分别为-0.627、-0.716,与噪音呈负相关且达极显著水平(P<0.01),相关系数为-0.817。

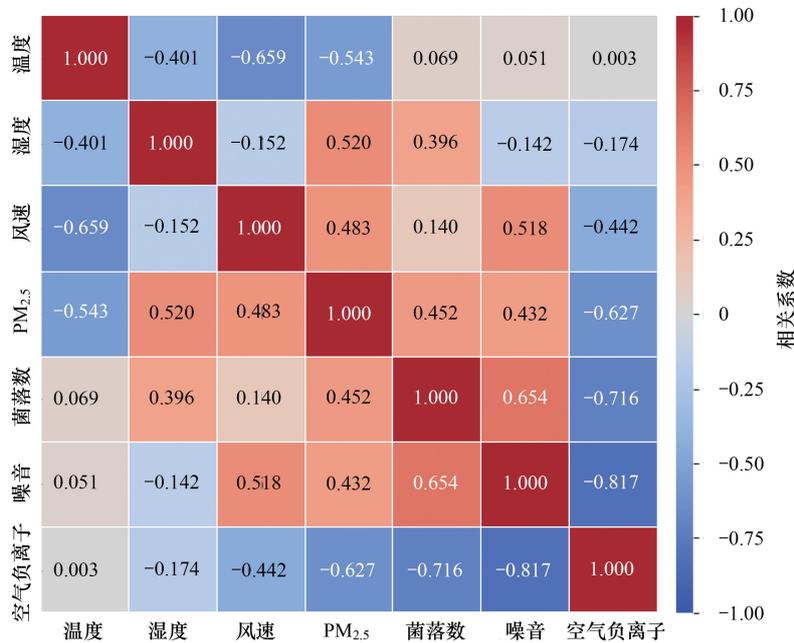


图 8 生态保健效应与环境因子的相关性

Fig.8 Correlation between ecological health effect and environmental factors

不同群落结构风景游憩林生态保健效应综合指数变化范围为 1.6565—9.1387(图 9)。乔-灌-草和乔-草结构的生态保健效应高于灌-草结构,分别是灌-草结构的 2.06 和 1.63 倍,可见乔木层在发挥风景游憩林生态

保健效应方面具有重要作用,这可能与其繁茂的林冠、复杂的枝叶结构有关。生态保健综合指数的聚类分析结果表明,9种群落结构风景游憩林可聚为4类,第一类为 B1、C2、C3、A2、B2,第二类 A3、B3,第三类 C1 和第四类 A1。其中乔-灌-草结构 A1 具有较好的增加空气负离子浓度、减菌、提高人体舒适度等生态保健效应,其综合保健指数最高;其次为乔-草结构 B3、乔-灌-草结构 A3,综合指数分别为 6.3398、6.2093;最弱的为灌-草 C1。

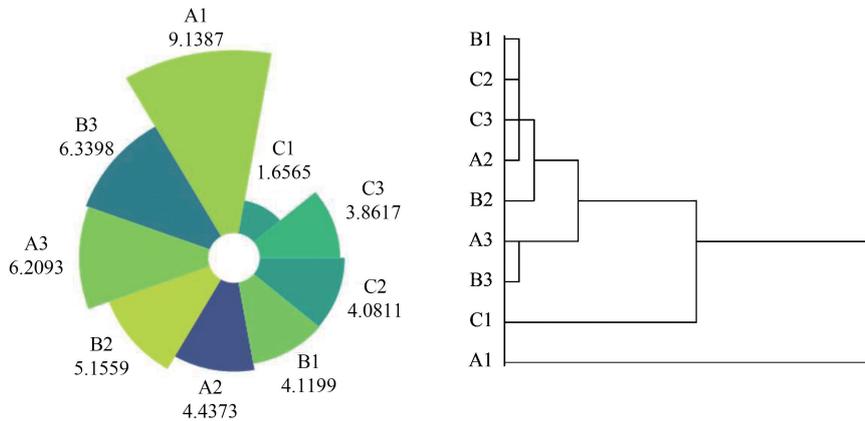


图9 风景游憩林生态保健效应及聚类分析

Fig.9 Comprehensive health function effects and cluster analysis of scenic and recreational forests

4 讨论

4.1 空气负离子浓度变化

植物光合作用和叶片尖端放电产生空气负离子^[24]。北京西山国家森林公园不同群落结构风景游憩林空气负离子浓度表现出夏秋高、春季次之,冬季弱的变化规律,这与邵海荣等^[25]对北京市常见植物空气负离子浓度变化特征研究结果一致,而与余海等^[26]对侧柏(*Platycladus orientalis*)林在春季和秋季可产生较多空气负离子的研究结果不同,这可能是纯林与混交林林分类型的差异导致。北京西山国家森林公园风景游憩林空气负离子浓度以乔-灌-草群落结构最高,与北戴河森林环境^[27]中空气负离子分布特征研究结果一致,这可能与复层植物群落可以释放更多的空气负离子有关。夏季空气负离子浓度最高值出现在 12:00—16:00,最低值出现在 8:00,这与合肥市居住区^[28]空气负离子浓度变化一致,与热带森林^[29]空气负离子浓度的变化不完全相同,可见空气负离子浓度受温度、湿度等气候因素影响较大。有关空气负离子浓度与环境因子关系的研究尚没有一致结论,吴作明等^[30]认为空气负离子浓度与温度呈负相关,与湿度呈正相关,王一荃等^[29]认为其与湿度呈正相关,Smirnov 等^[31]认为与风速呈正相关,本研究则认为温度与空气负离子相关关系不明显,与湿度和风速呈负相关。乔-灌-草结构可产生更多的空气负离子^[32],而本研究中乔-草结构 B1 空气负离子浓度也较高,可能是因为 B1 林分郁闭度和草本层盖度均大,且油松呈针状等曲率半径较小,具有良好的“尖端放电”功能,在植物生长初期有利于产生更多空气负离子。

4.2 $PM_{2.5}$ 浓度及消减率变化

$PM_{2.5}$ 浓度在早上和晚上较高,这与 Begum 等^[33]对英国颗粒物浓度变化研究结果相似。环境因子对 $PM_{2.5}$ 浓度及消减率有较大影响^[34],西山国家森林公园不同群落结构风景游林 $PM_{2.5}$ 浓度与温度呈负相关,与湿度和风速呈正相关,这与哈尔滨^[35]植物群落对大气细颗粒物浓度消减作用的研究结果一致,与布里斯班^[36]颗粒物的动态变化不完全相同,湿度增加颗粒物的重量增加,使之不断下降,近地面浓度升高,在陈波等^[15]的研究中还指出降雨有助于消减 $PM_{2.5}$ 。顾康康等^[37]对城市道路绿地植物 $PM_{2.5}$ 消减作用的研究发现,

乔-灌-草结构消减作用最优,这与本研究结果一致,群落结构、植物种类是影响 $PM_{2.5}$ 消减率的重要因子。Hwang 等^[38] 和陈波等^[39] 的研究表明针叶植物对 $PM_{2.5}$ 的消减能力远高于阔叶树,这也验证了北京西山国家森林公园乔木层以油松为主群落结构对 $PM_{2.5}$ 有较强的消减作用,而王琴等^[16] 对武汉的植物滞尘能力的研究中,叶表面粗糙、蜡质含量高和沟槽宽度深等植物叶片具有最佳滞尘能力,这可能与地域气候差异有关,发挥良好的滞尘保健效应需要因地制宜选择合适的植物。

4.3 降噪与减菌效应变化

林带的减噪效应与宽度、植物配置、组成和郁闭度有关,树木通过吸收和散射,使噪音在林内传播时间延长,减弱声波通过林带时的能量,从而达到降噪的效果^[40]。距离对噪音的消减效应差异显著,噪声消减率随距离增加而增加,这与 Fang 等^[41] 对林带降噪效果的研究结果相同。西山国家森林公园乔-灌-草结构降噪效果最优,这与 Maleki 等^[42] 对德黑兰森林公园不同类型林分降噪效果研究结果相似,灌木因其茂密的枝叶散射作用而能发挥较好的降噪效应,足够高的树木对噪音的扩散和吸收能力更优,因此将乔木和灌木搭配种植,形成乔-灌结构,提升游憩林降噪效应。植物通过分泌萜类、有机酸等物质从而抑制细菌生长^[43]。空气中的微生物大多来自地面,灌-草群落结构微生物扩散的范围小,对细菌的消减作用较弱,本研究减菌效果较好为乔-灌-草结构和乔-草结构,一方面复层结构的风景游憩林减菌效果要高于单层结构^[44],另外还可能与乔木层侧柏释放的可挥发性物质能够有效地抑制细菌活性、降低细菌浓度有关^[45]。产生较多空气负离子的植物群落对细菌的抑制作用也较强,本研究表明细菌数量与空气负离子浓度呈负相关。光照、温度、湿度和风速的综合状态能降低细菌的数量,且会随不同季节和地区改变^[46]。C3 减菌效应变动最大可能是因为其位置靠近道路,人为干扰较大,生态系统不稳定,在今后进行风景游憩林建设时可设缓冲区,以保证植物群落发挥最佳生态保健效应。

4.4 人体舒适度变化

人体舒适度主要与风景游憩林温度、湿度、风速有关,与林外相比,林内风速较低,由于光照不足等温度较低,植物呼吸作用而湿度较高^[47]。北京市夏季高温多雨,而西山国家森林公园风景游憩林夏季也较舒适,原因可能是森林公园远离城区且植被丰富,林分郁闭度大,形成一个特殊的小气候。不同群落结构风景游憩林人体舒适度指数没有显著的差异,可能是因为西山国家森林公园面积大,地表覆盖率高,改善了整体的舒适度,其中最佳的为乔-灌-草结构,可能是有良好的复层结构,并且乔木层树种刺槐具有降温、增湿和降低风速的显著效果^[48]。王庆等^[49] 的研究认为影响绿地人体舒适度的主要原因为植物群落结构、乔木平均冠幅、绿量、灌木围合度、灌木高度以及绿化率,要提升城市人体舒适度,需要综合考虑。

乔-灌-草群落结构风景游憩林的生态保健效应最好,这与紫竹院公园绿地^[50] 以及北小河公园绿地^[51] 生态保健效应研究结果一致。这主要与该类型具有完整的群落的结构,有降温、增湿、降低风速、滞尘、减菌的刺槐、油松、侧柏等优良树种有关。北京风景游憩林的建设,在群落结构上以拥有良好复层结构的乔-灌-草群落结构为主,在树种选择上优先考虑具有生态保健效应的乡土树种,适度设置林带的宽度以提升降噪效果。最佳游憩时间建议为春季 10:00—14:00,夏季 8:00—10:00,秋季 12:00—16:00,冬季 14:00—16:00。

5 结论

通过对北京西山国家森林公园 9 种不同群落结构风景游憩林生态保健效应研究,发现不同群落结构保健效应差别较大,对单个生态保健指标的表征各有优势,四个季节生态保健效应的日变化趋势也不尽相同,与环境因子呈现出显著相关性。不同植物在生态保健效应方面也表现出各自优势,如油松有良好的释放空气负离子的能力,侧柏减菌效应较优,刺槐降温增湿效果显著。研究得出的生态保健综合效应排序为:乔-灌-草>乔-草>灌-草,较优景观配置模式分别对应的是:乔-灌-草结构 A1(油松+刺槐-荆条+胡枝子-狗尾草+马唐+牵牛+鬼针草),乔-草结构 B2(侧柏-芍药+牡丹+刺儿菜+牛筋草+狗尾草),灌-草结构 C2(紫薇-虎尾草+狗尾草+牛筋草+马唐+苦苣菜),今后在风景游憩林建设中可供参考应用。未来的研究应考虑心理保健效应,及其与

生理的耦合效应和影响机制。

参考文献 (References):

- [1] 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. 地球科学进展, 2019, 34(6): 640-649.
- [2] Twohig-Bennett C, Jones A. The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. *Environmental Research*, 2018, 166: 628-637.
- [3] 李锋, 王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. 生态学报, 2003, 23(9): 1929-1936.
- [4] 何兴元, 刘常富, 陈玮, 关正君, 赵桂玲. 城市森林分类探讨. 生态学杂志, 2004, 23(5): 175-178, 185-185.
- [5] Wei J X, Li H B, Wang Y C, Xu X Z. The cooling and humidifying effects and the thresholds of plant community structure parameters in urban aggregated green infrastructure. *Forests*, 2021, 12(2): 111.
- [6] Aram F, García E H, Solgi E, Mansournia S. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 2019, 5(4): e01339.
- [7] Cosalia V B. Pedestrian visual recommendation in Kertanegara-Semeru corridor in Malang City. *Conference Series: Earth Environmental Science*, 2017, 70: 012026.
- [8] Bauwelinc M, Zijlema W L, Bartoll X, Vandenheede H, Cirach M, Lefebvre W, Vanpoucke C, Basagaña X, Nieuwenhuijsen M J, Borrell C, Deboosere P, Dadvand P. Residential urban greenspace and hypertension: A comparative study in two European cities. *Environmental Research*, 2020, 191: 110032.
- [9] Kurazumi Y, Kondo E, Fukagawa K, Hashimoto R, Nyilas A, Sakoi T, Tsuchikawa T. The influence of foliage plants on psychological and physiological responses. *Health*, 2017, 9(4): 601-621.
- [10] 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.
- [11] 李萍. 森林环境健康因子的研究综述. 中国城市林业, 2004, 2(6): 45-49.
- [12] 杨畅, 王锐, 王月容. 城市绿地生态保健功能研究进展. 世界林业研究, 2021, 34(5): 32-37.
- [13] Nath T K, Han S S Z, Lechner A M. Urban green space and well-being in Kuala Lumpur, Malaysia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 36: 34-41.
- [14] Wang H, Wang B, Niu X, Song Q F, Li M W, Luo Y Y, Liang L D, Du P F, Peng W. Study on the change of negative air ion concentration and its influencing factors at different spatio temporal scales. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01008.
- [15] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 北京城市森林不同天气状况下 PM_{2.5} 浓度变化. 生态学报, 2016, 36(5): 1391-1399.
- [16] 王琴, 冯晶红, 黄奕, 王鹏程, 谢梦婷, 万好, 苏泽琳, 王仁鹏, 王征洋, 余刘思. 武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征. 生态学报, 2020, 40(1): 213-222.
- [17] Yang J, McBride J, Zhou J X, Sun Z Y. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2005, 3(2): 65-78.
- [18] Streiling S, Matzarakis A. Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: A case study. *Journal of Arboriculture*, 2003, 29(6): 309-316.
- [19] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 147-155.
- [20] Arghavani S, Malakooti H, Ali Akbari Bidokhti A A. Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort level in Tehran Metropolis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121183.
- [21] 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. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.
- [22] Stanhope J, Breed M F, Weinstein P. Exposure to greenspaces could reduce the high global burden of pain. *Environmental Research*, 2020, 187: 109641.
- [23] 牛安逸, 马皎娇, 陈志云. 基于遥感技术及综合指数法的广州市自然生态环境评价. 中国城市林业, 2015, 13(6): 11-15.
- [24] 曾曙才, 苏志尧, 陈北光. 我国森林空气负离子研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(5): 107-111.
- [25] 邵海荣, 贺庆棠, 阎海平, 侯智, 李涛. 北京地区空气负离子浓度时空变化特征的研究. 北京林业大学学报, 2005, 7(3): 35-39.
- [26] 余海, 郭嘉, 李恩杰, 裴顺祥, 吴迪, 辛学兵. 北京九龙山侧柏林空气负离子时空分布特征. 林业科学研究, 2021, 34(3): 174-179.
- [27] 曹建新, 张宝贵, 张友杰. 海滨、森林环境中空气负离子分布特征及其与环境因子的关系. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1375-1383.
- [28] 王薇, 张之秋. 城市住区空气负离子浓度时空变化及空气质量评价——以合肥市为例. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1783-1791.
- [29] 王一荃, 周璋, 李意德, 陈德祥, 张涛, 杨繁. 不同热带森林空气负离子浓度评价研究. 生态环境学报, 2021, 30(5): 898-906.
- [30] 吴明作, 王江彦, 李小伟, 杨守任, 林照明. 郑州市公园绿地春季空气质量评价. 西南林业大学学报, 2011, 31(3): 22-26.
- [31] Smirnov V V, Radionov V F, Savchenko A V, Pronin A A, Kuusk V V. Variability in aerosol and air ion composition in the Arctic spring

- atmosphere. *Atmospheric Research*, 1998, 49(2): 163-176.
- [32] 潘剑彬, 李树华. 北京城市公园绿地负氧离子效益空间格局特征研究. *中国园林*, 2015, 31(6): 100-104.
- [33] Begum B A, Biswas S K, Hopke P K. Temporal variations and spatial distribution of ambient $PM_{2.2}$ and PM_{10} concentrations in Dhaka, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 2006, 358(1/3): 36-45.
- [34] Tiwari S, Chate D M, Pragma P, Ali K, Bisht D S. Variations in mass of the PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 during the monsoon and the winter at New Delhi. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12(1): 20-29.
- [35] 刘畅, 胡尚春, 唐立娜. 寒地校园植物群落对大气细颗粒物浓度的消减作用. *生态学报*, 2021, 41(15): 6227-6233.
- [36] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, Vowles P D, Cohen D D, Bailey G M. Characterisation of chemical species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(22): 3773-3785.
- [37] 顾康康, 钱兆, 方云皓, 孙圳, 温红. 基于 ENVI-met 的城市道路绿地植物配置对 $PM_{2.5}$ 的影响研究. *生态学报*, 2020, 40(13): 4340-4350.
- [38] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [39] 陈波, 刘海龙, 赵东波, 陈鹏飞, 鲁绍伟, 李少宁. 北京西山绿化树种秋季滞纳 $PM_{2.5}$ 能力及其与叶表面 AFM 特征的关系. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 777-784.
- [40] 张庆费, 郑思俊, 夏樞, 吴海萍, 张明丽, 李明胜. 上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2295-2300.
- [41] Fang C F, Ling D L. Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63(4): 187-195.
- [42] Maleki K, Hosseini S M. Investigation of the effect of leaves, branches and canopies of trees on noise pollution reduction. *Annals of Environmental Science*, 2011, 5(1): 13-21.
- [43] 段佳, 崔艳秋, 秦志强, 赵佳媛, 南蓬. 园林植物挥发油成分分析及抗菌活性测定. *城市环境与城市生态*, 2005, 18(6): 23-25.
- [44] 罗英, 李晓储, 何小弟, 陆华敏, 窦军保. 城市森林不同类型绿地植物配置抑菌效应初析. *中国城市林业*, 2005, 38(6): 23-25.
- [45] 杨伟伟, 王成, 鄯光发, 郭二果. 北京西山春季侧柏游憩林内挥发物成分及其日变化规律. *林业科学研究*, 2010, 23(3): 462-466.
- [46] 任启文. 北京市绿地空气微生物浓度的变化特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [47] 吴菲, 李树华, 刘娇妹. 林下广场、无林广场和草坪的温湿度及人体舒适度. *生态学报*, 2007, 27(7): 2964-2971.
- [48] 潘剑彬, 李树华. 北京城市公园绿地热舒适度空间格局特征研究. *中国园林*, 2015, 31(10): 91-95.
- [49] 王庆, 李萌, 李相逸. 基于小气候人体舒适度的社区公园健身设施场地景观设计研究. *中国园林*, 2021, 37(8): 68-73.
- [50] 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. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1973-1983.
- [51] 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. *科学技术与工程*, 2017, 17(18): 31-40.