北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

城市林荫环境下紫外辐射的人体健康曝露时长测算

孙睿霖 王成 韩文静 边琦 张淑菁

Estimating human healthy exposure duration of ultraviolet radiation in urban tree shading environment

Sun Ruilin, Wang Cheng, Han Wenjing, Bian Qi, Zhang Shujing

引用本文:
孙睿霖, 王成, 韩文静, 边琦, 张淑菁. 城市林荫环境下紫外辐射的人体健康曝露时长测算[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):21–29. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240108
Sun Ruilin, Wang Cheng, Han Wenjing, Bian Qi, Zhang Shujing. Estimating human healthy exposure duration of ultraviolet radiation in urban tree shading environment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):21–29. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240108

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240108

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于改进的像元二分模型估测郁闭度
Estimation of canopy closure based on improved dimidiate pixel model
北京林业大学学报, 2019, 41(6): 35–43. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180263

间伐强度对落叶松次生林冠层结构和林内光环境的影响
Influence of thinning intensity on canopy structure and light environment inside *Larix gmelinii* secondary forest
北京林业大学学报, 2018, 40(10): 11–23. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180021

黄檗幼苗抗氧化物质及生物碱含量对UV–B辐射增强响应
Influence on antioxidants and alkaloid content of *Phellodendron amurense* seedlings grown under supplementary UV–B radiation
北京林业大学学报, 2018, 40(1): 27–36. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170201

人居环境安全视角下的北京市浅山区泥石流防灾林规划研究
Planning of debris flow prevention forest in shallow mountain area of Beijing from the perspective of human settlement environment safety
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 130–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200207

西双版纳热带季节雨林辐射长期变化特征
Long–term variation characteristics of radiation in the tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwestern China
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 56–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200270

城市居住区绿地小微尺度下垫面构成对环境微气候的影响
Effects of micro scale underlying surface type and pattern of urban residential area on microclimate: taking Beijing as a case study
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 100–109. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200256

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240108

城市林荫环境下紫外辐射的人体健康曝露时长测算

孙睿霖　王　成　韩文静　边　琦　张淑菁
（中国林业科学研究院林业研究所，国家林业和草原局城市森林研究中心，北京 100091）

摘要:【目的】量化人体在林荫环境中通过日光紫外辐射安全合成维生素 D(避免红斑效应危害)的最佳曝露时长，解析其关键影响因素，为健康导向的城市户外空间设计及居民户外活动时间规划提供科学依据。**【方法】**选取北京市 11 种典型城市乔木，实测四季、5 个时段(08:00、10:00、12:00、14:00 和 16:00)的林荫下紫外辐射强度，并基于我国居民皮肤最小红斑剂量和维生素 D 最低合成剂量(10 μg)，计算人体曝露时长，对林荫紫外辐射与各林分结构特征进行相关性分析，筛选关键影响因子，最后采用多元线性回归模型构建林荫健康曝露时间估算模型。**【结果】**(1)林荫环境可使曝露时长增至林外的 2～13 倍，夏季延时效果最为明显，达林外的 8 倍以上；(2)林分郁闭度和叶面积指数是生长季影响林内红斑紫外辐射量，进而决定紫外线曝露时长的主要林分结构指标，郁闭度为 0.4 时，林内健康曝露时长约为林外的 1.8 倍，此后郁闭度每提高 0.2，可延长约 50% 时间；(3)利用实测数据，建立了以日光紫外线指数和林分郁闭度估算林荫健康曝露时长模型($R^2 = 0.47$)。**【结论】**林荫环境能够营造相对温和的紫外辐射环境，满足国人适度曝露于紫外线辐射的健康需求。通过合理规划城市林荫环境，可实现对日光紫外辐射健康效益与风险的协同调控，显著延长居民户外活动时间。

关键词：林下光环境；紫外辐射；红斑效应；维生素 D 缺乏；人体健康；郁闭度；城市森林
中图分类号：S731　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)07−0021−09
引文格式：孙睿霖，王成，韩文静，等. 城市林荫环境下紫外辐射的人体健康曝露时长测算［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：21−29. Sun Ruilin, Wang Cheng, Han Wenjing, et al. Estimating human healthy exposure duration of ultraviolet radiation in urban tree shading environment［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 21−29.

Estimating human healthy exposure duration of ultraviolet radiation in urban tree shading environment

Sun Ruilin　Wang Cheng　Han Wenjing　Bian Qi　Zhang Shujing
(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Urban Forest Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract:［**Objective**］This paper quantifies the optimal exposure duration for human body to synthesize recommended dose of vitamin D through sunlight ultraviolet (UV) radiation without inducing erythema in tree shade, and analyzes key influencing factors, so as to provide scientific basis for health-oriented urban open space design and residents' outdoor activity scheduling.［**Method**］Eleven typical urban tree species in Beijing were selected to measure UV radiation intensity under tree shade across 4 seasons and 5 time periods (08:00, 10:00, 12:00, 14:00 and 16:00). Optimal exposure durations were calculated based on the minimum erythema dose (MED) for Chinese skin types and the minimum vitamin D synthesis dose (10 μg). Correlation analysis was performed between UV radiation and forest structural characteristics to explore key influencing factors. A multiple linear regression model was used to establish an exposure duration estimation model.［**Result**］(1) The optimal time for exposure in forest could be 2−13 times longer than that in the

收稿日期: 2024−04−12　**修回日期:** 2024−07−03
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFE0193200)。
第一作者: 孙睿霖，助理研究员。主要研究方向：城市林业与风景园林。Email: 1300627719@qq.com　地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号。
责任作者: 王成，研究员，博士生导师。主要研究方向：城市林业与森林生态。Email: wch8361@163.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

open. Summer had the most striking time extension effect, with the duration extendable by more than 8 times. (2) Canopy cover and leaf area index (LAI) were the main structural indicators affecting erythemal UV radiation (UV_{er}) in the forest, thereby determining the duration of UV exposure during growing seasons. At a canopy cover of 0.4, exposure duration doubled compared with open areas; each 0.2 increase in canopy cover extended the duration by 50%. (3) A model (R^2 = 0.47) was developed to estimate the optimal exposure time in tree shade with the use of UV index (UVI) and canopy cover using experimental data. [**Conclusion**] Urban tree canopies create a mild UV radiation environment which tends to meet the health needs of Chinese people for moderate exposure to UV radiation. By wisely creating shaded environments with trees, it is possible to achieve a synergistic regulation of UV radiation health benefits and risks, and prolong residents' outdoor activity time significantly.

Key words: light environment under canopy; UV radiation; erythemal effect; vitamin D deficiency; human health; canopy closure; urban forest

日光紫外线辐射对人体健康具有双重影响：长期过度曝露会增加皮肤癌、白内障和皮肤晒伤等风险，而曝露不足则可能导致维生素 D 缺乏及相关骨骼代谢疾病[1–2]。城市林木树冠削减日光紫外辐射作用受到国内外学者关注。在皮肤癌等疾病高发的澳洲和北美地区，研究多聚焦于树冠对红斑紫外线辐射的屏蔽能力、不同树种及冠层结构的防护效能差异[3–4]、林荫紫外辐射的分布特征[5–6]与光谱特征[7]等。相比之下，国内研究主要集中于树冠紫外线屏蔽作用的定量测定，但较少结合我国城市人群特有的健康需求开展深入分析[8–9]。由于人种肤色差异，国人因紫外线照射过量导致严重健康风险的概率显著低于白种人[10]。例如，澳大利亚皮肤黑色素瘤发病率为 65 例/10 万人[11]，而中国仅为 0.37 例/10 万人[12]。相比之下，我国城市居民因户外活动不足、过度防晒等生活方式影响，维生素 D 缺乏现象在北方城市更为普遍[13]。调查显示，我国儿童维生素 D 缺乏率北方为 30%～70%，南方为 10%～40%。世界卫生组织特别强调，深肤色人群需通过科学的紫外线曝露策略预防维生素 D 缺乏症。

随着城市森林建设的推进，城市公共空间的林荫覆盖率提升，这为健康导向的城市景观设计提供了新机遇。为厘清林荫下紫外线曝露时间与维持人体健康的平衡关系，本研究对北京地区广泛应用的 11 个城市林荫树种，在不同季节、不同日照时段的林下紫外线辐射进行了测定，并根据国人皮肤最小红斑剂量（minimum erythema dose，MED）和维生素 D 补充建议剂量参考值，计算出人体合成足量维生素 D 且不会受到红斑效应危害所需的曝露时长，探究影响林荫紫外辐射的主要因素，并建立林荫下健康曝露时长测算模型。研究成果可为优化城市林荫空间设计提供量化依据，同时指导居民科学计划户外活动时长。

1 材料与方法

1.1 样地选择与指标测定

试验地点位于北京通州区东郊森林公园，该公园是典型的北京平原地区城市游憩林，园内地形平坦，周边无高大建筑群。选取国槐（*Styphnolobium japonica*，SJ）、垂柳（*Salix babylonica*，SB）、毛白杨（*Populus tomentosa*，PT1、PT2）、榆树（*Ulmus pumila*，UP）、三球悬铃木（*Platanus orientalis*，PO）、金叶复叶槭（*Acer negundo* 'Aurea'，AN）、栾树（*Koelreuteria paniculata*，KP）、洋白蜡（*Fraxinus pennsylvanica*，FP）、臭椿（*Ailanthus altissima*，AA）、元宝枫（*Acer truncatum*，AT）和楸树（*Catalpa bungee*，CB）共 11 种在城市森林建设中广泛应用的林荫树种构成的纯林林分[14–16]，共设置 12 块样地，其中毛白杨因林分密度差异单独设置 2 块样地。所有样地均为人工林，林分结构整齐，林下光环境相对均匀且单一。在远离林缘的林分内部设置 10 m × 10 m 样方，记录样方内的林分结构和冠层结构特征。测定指标主要包括林分密度、胸径、冠幅、树高、冠高、叶面积指数和郁闭度，其中郁闭度由冠层分析仪（美国 Li-cor，LAI-2200）测定的天空开度（diffuse none-interceptance，DIFN）转换获得（表 1、2）。

于 2021 年 4 月（春季）、8 月（夏季）、10 月（秋季）和 2022 年 2 月（冬季），选择连续晴朗无云的 4 d（每日云量 < 10%），在 08：00—16：00 时段内每 2 h 进行一次测量。为缩短不同样地间测量时间间隔，将 12 个样地分为 4 组，每组 3 个样地在一天内完成同步测量（每组耗时 ≤ 30 min）。每个样地设置一个林外空旷对照点（无遮挡）。采用微型光纤光谱仪（美国 Ocean Optics，FLAME），配备余弦校正器，采集日光绝对辐照度，采集时间设定为 1 min。数据采集期间，光纤探头向上置于操作员头顶上方，距地面 1.7 m

表 1　样地林分结构特征

Tab. 1　Stand structure characteristics in sample plots

样地名称	胸径/cm	树高/m	冠高/m	冠幅/m	林分密度/(株·hm^{-2})
SJ	19.83 ± 1.52	10.19 ± 1.35	7.52 ± 1.33	4.61 ± 0.63	612
KP	16.24 ± 1.99	10.73 ± 1.36	7.80 ± 1.35	4.53 ± 0.65	747
AT	17.27 ± 1.42	9.86 ± 1.59	7.56 ± 1.85	6.34 ± 1.53	448
SB	32.78 ± 14.47	8.90 ± 1.56	6.70 ± 1.69	8.96 ± 1.80	450
PT1	22.17 ± 7.76	18.69 ± 1.43	12.60 ± 1.53	3.06 ± 0.51	700
PT2	23.24 ± 3.47	14.60 ± 1.52	7.80 ± 1.59	5.69 ± 0.97	346
UP	19.33 ± 3.14	9.21 ± 1.60	6.06 ± 1.71	6.14 ± 0.70	420
PO	21.43 ± 4.60	14.86 ± 2.15	12.38 ± 1.86	7.10 ± 0.32	578
AN	19.61 ± 4.81	8.21 ± 0.30	6.45 ± 0.46	3.55 ± 0.71	813
FP	20.00 ± 2.63	9.95 ± 1.49	7.27 ± 1.41	4.72 ± 0.71	525
AA	15.87 ± 1.56	9.01 ± 0.40	6.10 ± 0.37	3.21 ± 0.50	1 204
CB	18.38 ± 3.94	10.31 ± 2.41	6.74 ± 1.86	3.63 ± 0.49	718

注：SJ. 国槐*Styphnolobium japonica*；SB. 垂柳*Salix babylonica*；PT1、PT2. 毛白杨*Populus tomentosa*；UP. 榆树*Ulmus pumila*；PO. 三球悬铃木*Platanus orientalis*；AN. 金叶复叶槭*Acer negundo* ‘Aurea’；KP. 栾树*Koelreuteria paniculata*；FP. 洋白蜡*Fraxinus pennsylvanica*；AA. 臭椿*Ailanthus altissima*；AT. 元宝枫*Acer truncatum*；CB. 楸树*Catalpa bungee*。下同。

表 2　样地冠层结构特征

Tab. 2　Canopy structure characteristics in sample plots

样地名称	郁闭度				叶面积指数(LAI)			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
SJ	0.57	0.76	0.52	0.22	1.07	1.84	0.92	0.31
KP	0.84	0.97	0.91	0.35	2.31	4.36	3.11	0.55
AT	0.88	0.91	0.88	0.16	2.59	3.01	2.88	0.22
SB	0.69	0.88	0.88	0.31	1.49	2.70	2.69	0.47
PT1	0.95	0.93	0.58	0.37	3.70	3.49	1.11	0.58
PT2	0.84	0.85	0.81	0.33	2.34	2.62	2.08	0.49
UP	0.71	0.85	0.84	0.45	1.53	2.42	2.28	0.76
PO	0.54	0.89	0.82	0.25	1.00	2.77	2.23	0.36
AN	0.92	0.99	0.91	0.33	3.28	5.64	3.01	0.50
FP	0.65	0.94	0.75	0.29	1.30	3.76	1.72	0.43
AA	0.50	0.94	0.82	0.28	0.88	3.53	2.14	0.42
CB	0.36	0.86	0.86	0.33	0.56	2.54	2.43	0.50

位置，操作员在采集时间内沿蛇形路径匀速行走覆盖整个样方。每个样方单次测量获得 ⩾ 100 个空间样点的连续紫外线光谱数据。对各样点光谱数据进行红斑效应加权，获得红斑有效辐射强度（erythemally weighted UV，UV_{er}）(式 1)，并取所有样点的平均值代表样方内整体水平。

$$UV_{er} = \int_{250}^{400} E_\lambda \cdot s_{er}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (1)$$

式中：E_λ 为光谱辐照度(μW/(cm^2·nm))，s_{er} 为紫外红斑效应参照谱[17]，λ 为辐射波长(nm)。

1.2　健康日光曝露时间计算

本研究采用最小红斑剂量(MED)和维生素 D 合成阈值剂量作为判断紫外辐射曝露的双阈值评价指标，分别表征辐射过量的健康风险与不足的生理需求。MED 指经一定强度紫外线照射一段时间后，照射部位可察觉的无明显边界红斑的最小辐射剂量[18]。尽管人体 MED 值的个体差异很大，但总的来看，影响该值的主要因素是皮肤类型，肤色越浅，MED 值越小，越容易受到紫外辐射的伤害，而

MED 值与性别、年龄、地区、季节等的关系尚无定论[19]。国内人群 MED 值的测量中位数集中在 30 ~ 50 mJ/cm^2[20−22]，作为本研究 MED 取值范围。

人体内源性维生素 D 主要通过 UVB 照射皮肤表皮，经一系列生化反应合成，体表曝露面积直接影响维生素 D 合成。中国对于维生素 D 缺乏症的补充预防建议剂量最低为 10 μg(400 IU)[13]。参考 Holick[23] 的研究，全身曝露于 1 MED 的全日照能产生维生素 D 250 ~ 625 μg。参考成人体表总面积(total body surface area，TBSA)百分数，可计算不同季节着装条件下，合成最小维生素 D 建议剂量时的着装系数(k)(表 3)。

结合上述参考数值，利用式(2)可计算出不同环境中紫外辐射健康曝露时长。

$$t = kx \times 10^3 \div \mathrm{UV_{er}} \div 60 \tag{2}$$

式中：t 为曝露时间(min)，x 为 MED，k 为着装系数。当 k = 1 时，t 为曝露任意体表部位产生红斑效应的临界点，作为健康曝露时长的上限[24]；当 k 取表 3 中数值时，可计算不同着装条件下合成 10 μg 维生素 D 所需时间，作为人体健康曝露时长的下限。

1.3 健康曝露时长预测

多元线性回归模型用于研究多个自变量与一个因变量之间的线性关系[25]。在选取模型参数时，除考虑影响因素的相关性，也应考虑数据获取的便捷性，以为居民提供便利的林下活动时长预测工具。在缺乏专业仪器的情况下，$\mathrm{UV_{er}}$ 数值或 LAI 难以获得，但公众能够通过天气预报获知日光紫外线指数(ultraviolet index，UVI)，并目视估计某一林分的郁闭度。因此，尝试将生长季林分郁闭度、由实测数据转换的日光 UVI(1 UVI = 0.4 $\mathrm{UV_{er}}$)[18]和由林内 $\mathrm{UV_{er}}$ 测算的红斑效应曝露时长，代入多元线性回归方程进行建模，得到

$$Y = 23 - 6.7X_1 + 216.8X_2 \tag{3}$$

式中：Y 为林下曝露预测时间，X_1 为 UVI，X_2 为郁闭度。

1.4 数据处理

使用双因素方差分析，并通过 Tukey 检验比较不同季节或林分间的林荫健康曝露时长差异。为探明不同季节、时段和林分内的 $\mathrm{UV_{er}}$ 与林分结构特征间关系，引入红斑辐射遮荫比(erythemal shade ratio，$\mathrm{SR_{er}}$)[6]，即林内红斑有效辐射强度占林外红斑有效辐射强度的比例，对其与郁闭度、胸径、冠幅、树高、冠高等林分结构指标的相关性进行分析。

利用 R4.2.2 和 Excel 对光谱实测数据进行预处理，再利用 Origin 2021 完成数据的方差分析、线性回归分析及图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同季节、时段林内外健康曝露时长比较

在同等日照和着装条件下，对于 MED 为 30 mJ/cm^2 的浅肤色人群，不同时段、不同季节 12 个林分内的平均曝露时长是林外对照点的 2 ~ 13 倍(图 1)。其中夏季各时段健康曝露时长均达林外的 8 倍以上，正午曝露时长上限可由林外无遮挡对照点的 21 min 延长至 2 h 以上，而合成足量维生素 D 所需最少时长，也由 1 ~ 15 min 增加至 8 min ~ 2 h 以上；冬季林内延时效果明显减弱，但枝干对阳光的遮挡作用仍能使曝露时长延长至对照点的 2 ~ 5 倍。当 MED 为 50 mJ/cm^2 时，即对于肤色偏深的人群，各时段曝露时长是浅肤色的 1.67 倍。需要指明，由于日光辐射强度会随时间产生较大变化，且本实验紫外辐射测量间隔为 120 min，因此，在辐射强度较低时，超过 120 min 的曝露时长不具有参考意义，在图中未予显示。

2.2 影响林下红斑紫外辐射的林分结构因子分析

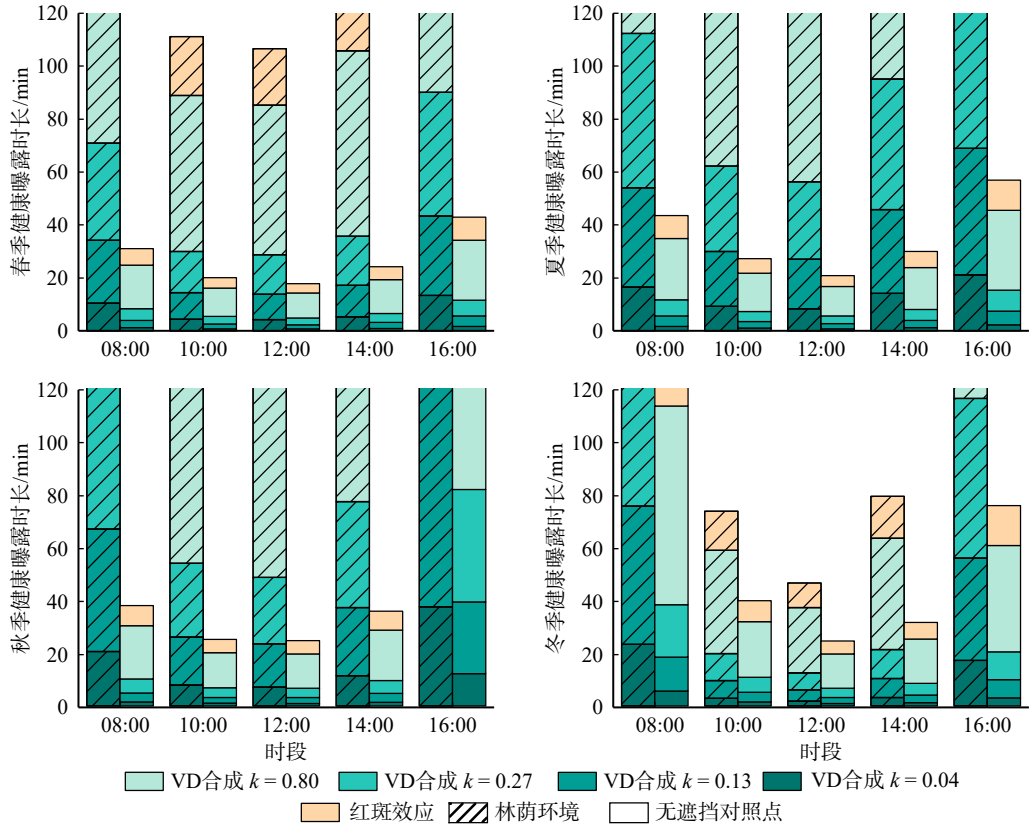
林分结构与 $\mathrm{SR_{er}}$ 的相关分析表明，$\mathrm{SR_{er}}$ 仅与林分郁闭度($p < 0.01$，$R^2 = 0.483$)和叶面积指数(LAI，$p < 0.01$，$R^2 = 0.722$)显著相关，而与胸径、冠幅、树高、冠高和林分密度均无显著相关性($p > 0.05$)。从季节来看，在春、夏、秋 3 个树木生长季，郁闭度和 LAI 均与 $\mathrm{SR_{er}}$ 均呈极显著相关($p < 0.01$)，而冬季无显著相关性($p > 0.05$)；从日变化来看，二者在 08：00—14：00 与 $\mathrm{SR_{er}}$ 呈极显著相关($p < 0.01$)，16：00 后则无显著相关性($p > 0.05$)。

表 3 不同体表曝露面积下合成 VD 10 μg 时的着装系数

Tab. 3 Dressing coefficients corresponding to synthesis of 10 μg VD with different area of skin exposed

身体曝露面积占比/%	曝露部位	1 MED合成VD剂量/μg	着装系数(k)
100	全身	250.00 ~ 625.00	0.04
30	面、颈、臂、腿	75.00 ~ 187.50	0.13
15	面、颈、臂	37.50 ~ 93.75	0.27
5	面、手	12.50 ~ 31.25	0.80

注：MED为最小红斑剂量，VD为维生素D。



k 为着装系数。

图 1　不同季节林内外健康曝露时长日变化对比图

Fig. 1　Comparison diagram of diurnal healthy exposure time variation between shaded and open plots in different seasons

利用具有显著相关性的季节和时段数据绘图（图 2），分析 SR_{er} 与郁闭度和 LAI 的定量关系，发现 SR_{er} 随林分郁闭度和 LAI 的提高而下降。郁闭度对紫外辐射的遮挡作用呈线性关系，当郁闭度为 0.4 时，林内红斑有效辐射约为林外的 45%；郁闭度为 0.6 时，约为 35%；郁闭度为 0.8 时，为 20%；郁闭度接近 1.0 时，为 10% 左右。LAI 对紫外辐射的遮挡作用呈指数递减，LAI 为 1 时，林内红斑有效辐射约为林外的 40%，LAI 为 2 时，为 20%，LAI 为 3 时，约为 15%。

2.3　不同林分林荫健康曝露时长比较

将各林分在不同季节和时段的日曝露时长上限进行累加，比较不同树种提供健康紫外辐射环境能力。通过双因素方差分析发现，尽管不同林分的树种物候期、林分密度、林冠郁闭度等不尽相同，但同季节不同林分间的日曝露时长并没有显著差异（$F = 0.84$，$p > 0.05$），而同一林分在不同季节的日曝露时长差异性显著（$F = 13.63$，$p < 0.05$）。由于树种物候习性等差异，各树种在不同季节提供遮荫能力有所区别。分别将四季 12 个林分的日曝露时长进行排

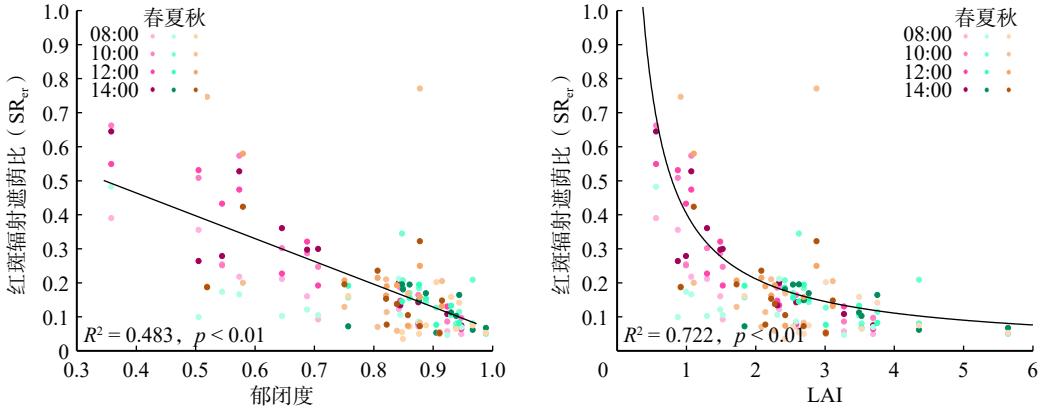


图 2　生长季 08：00—14：00 时段红斑辐射遮荫比（SR_{er}）与郁闭度、LAI 的关系

Fig. 2　Relationship between erythemal shade ratio (SR_{er}) and canopy closure as well as LAI in 08:00−14:00 in growing season

序，可知复叶槭、栾树、毛白杨、榆树等树种展叶时间早、落叶晚，郁闭期长，全年健康曝露总时长比其他林分略长；楸树、臭椿、国槐、悬铃木等树种展叶时间晚，毛白杨、元宝枫、国槐等树种落叶时间早，在春、秋季健康曝露时长较其他林分短(图 3)。

对林内日健康曝露时长与林分郁闭度、LAI 的季节变化进行比较，可见三者变化具有一致性，日曝露时长总体随冠层密度增加而延长(图 4)。其中，夏季各林分郁闭度、LAI 均处高位，平均日曝露时长亦最长，达(590 ± 13)min；春、秋季由于不同树种的展、落叶时间不同，各林分的冠层差异较大，春季平均为(479 ± 118)min，秋季为(572 ± 51)min；冬季落叶后，林分对阳光遮挡作用减弱，日曝露时长平均为(439 ± 32)min。

2.4 基于多元线性回归模型的林下曝露时长预测

经统计检验，模型 $R^2 = 0.47 (p < 0.01)$，数据回归拟合平均相对误差为 12.12%。利用式(3)，公众能够在已知日光 UVI 与林分郁闭度条件下，推算出理论上的林荫环境曝露时长上限，不同着装条件下维生素 D 合成所需最小曝露时间的计算可在此基础上乘以着装系数(k)(图 5)。例如，当预报 UVI 为 5，林分郁闭度 0.4 时，林下活动长不宜超过 76.2 min，如身着长裤短袖($k = 0.27$)，则需要至少 20.6 min 可合成 10 μg 的维生素 D。总体来看，郁闭度为 0.4 的林荫环境健康曝露时长约为林外的 1.8 倍，此后郁闭度每提高 0.2，时间平均将延长约 51.22%。

3 讨 论

3.1 林下紫外辐射健康曝露时长的计算方法及其应用

本研究基于实测数据，定义并计算了中国人在林荫环境中的紫外线健康曝露时间。公式(2)参考了 McKenzie 等[24]和吴梅等[26]的曝露时间计算公式，但吴梅的研究未对维生素 D 合成所需辐射剂量的取值做出明确界定。为此，本研究通过计算在不同着

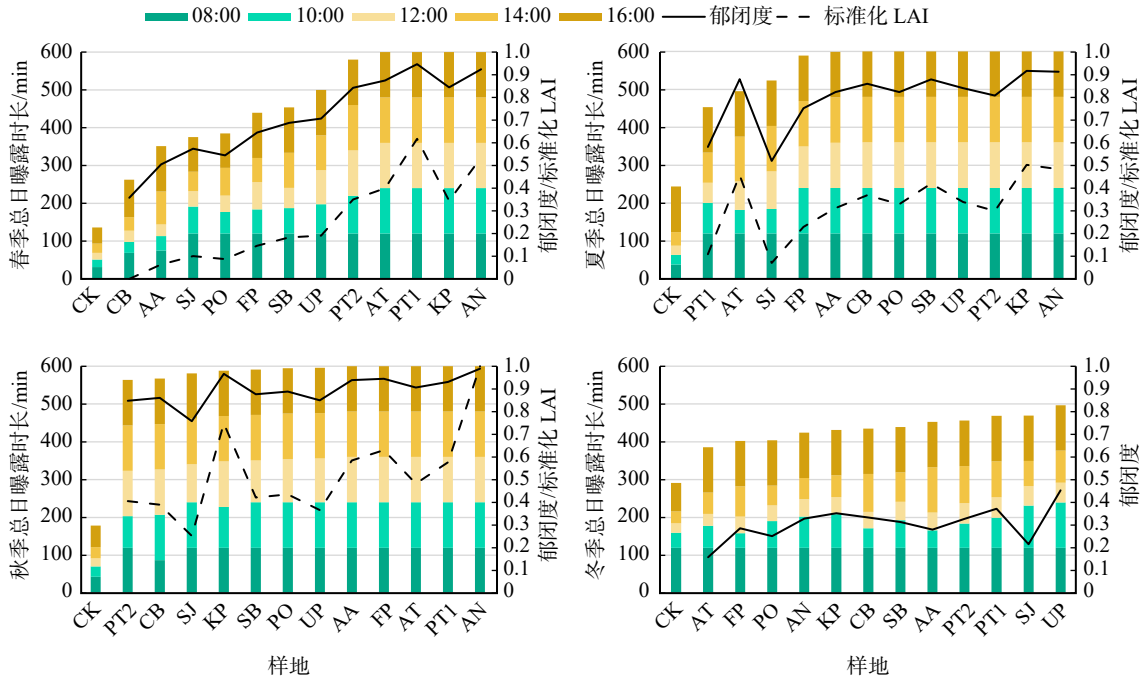
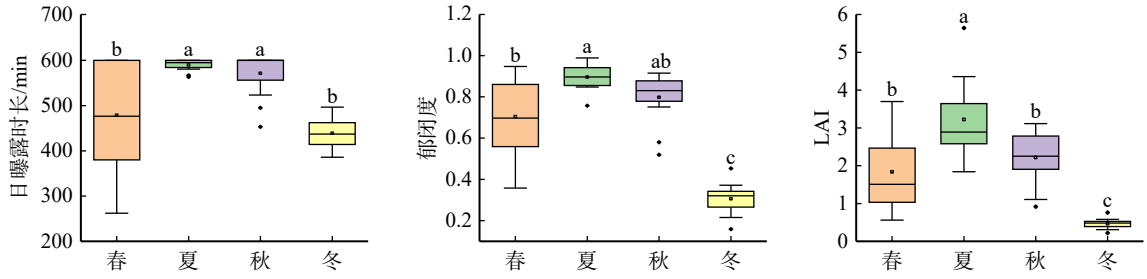


图 3 不同季节各林分日曝露时长排序

Fig. 3 Ranking of daily exposure duration in each stand in different seasons



不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 4 林内日曝露时长与林分郁闭度、LAI 季节变化差异分析

Fig. 4 Difference analysis of seasonal changes in daily exposure duration and canopy closure as well as LAI

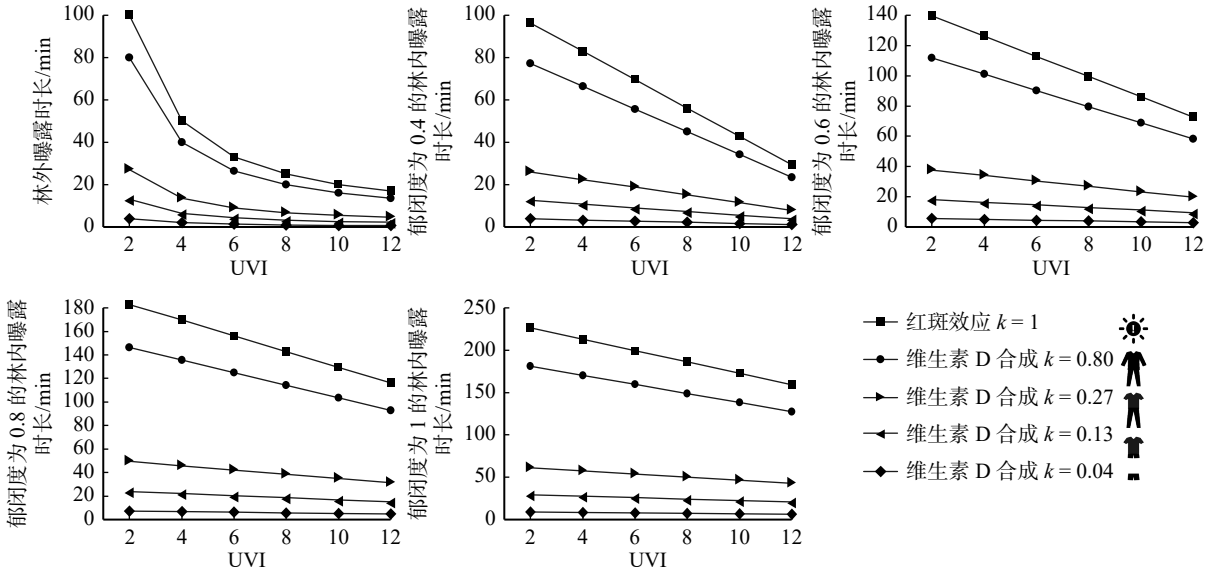


图 5　不同 UVI 与林分郁闭度下曝露参考时长

Fig. 5　Reference exposure duration under different UVI and forest canopy closure environments

装条件下合成 10 μg 维生素 D 时的着装系数 k，弥补这一不足。McKenzie 的公式使用日光紫外线指数（UVI）计算，适用于无遮挡环境，而本研究所采用的 UV_{er} 则适用于各类遮荫环境的曝露时间计算。

关于林荫环境中维生素 D 合成所需最低时间的估计，是基于 Holick[23]对全身曝露于日光辐射条件下的成年人合成维生素 D 剂量的试验数据换算得出。然而，在浓荫下极低的紫外辐射环境中，能否通过延长曝露时间获得足够的维生素 D 合成辐射剂量，不同皮肤部位的曝露合成效能是否存在差异，以及不同年龄人群之间差异等问题，仍有待通过生化试验进一步佐证。目前有限的研究显示，1/4 MED 是合成维生素 D 的最佳剂量，低于该剂量的紫外线照射会导致血清 25-羟基维生素 D_3 在照射后 3 个月内迅速衰减，无法在缺乏紫外线辐射的情况下维持血液中正常的维生素 D 水平[27–28]。而维生素 D 的合成效率在 1/3 MED 时达到最大，进一步的照射并不能增加维生素 D 的浓度，反而会使其转化为无活性代谢物[29–30]。此外，还有研究表明，总曝露剂量相同时，多次小剂量曝露效果要优于集中大剂量曝露[31]。由此可见，在紫外辐射较强的季节，光影斑驳的林荫环境可平衡紫外线带来的伤害与益处，为人体提供相对温和且有益的辐射环境。

3.2　林荫健康曝露时长的影响因素分析

通过相关性分析，发现在一定日照条件下，林分郁闭度和叶面积指数（LAI）是影响林内辐射量，进而影响林下健康曝露时间的主要林分结构指标。之前的研究测定认为林内紫外辐射还与树种、枝下高、冠幅、树高等有关[8–9]，但通过本研究对 4 个季节的测定，发现林内光环境本质上还是由冠层密度决定。本试验主要研究了北京地区的落叶阔叶林林荫紫外辐射环境，具有一定地域和植被类型的局限性。此外，树木着叶期的影响因素很多，既与树种自身物候习性有关，也与小气候、水分供给、林分结构等环境因素有关。如本试验观测的两处仅一路之隔的毛白杨样地，林分密度分别为 49 株/100 m^2 和 30 株/100 m^2，调查时高密度毛白杨林（PT1）的展叶、落叶时间均早于低密度毛白杨林（PT2），使两个林分在不同季节的林下健康曝露时间呈现差异。因此，本研究得出的不同林分林下健康曝露时间仅作参考，实际应用还需结合立地条件与林木生长情况进行分析。

尽管日曝露时长总体随冠层密度增加而延长，但图 3 也显示，个别林分出现冠层密度与日曝露时长与总体变化趋势不符的情况。如夏季栾树的冠层密度较大，但日曝露时长低于冠层密度相对较低的元宝枫、榆树、三球悬铃木等林分等。这可能归因于不同树种叶片质地、厚度等差异导致其吸收紫外辐射能力不同。根据 Qi 等[32]对美国常见树木 UVB 耐受能力的研究，在组织层面，植物吸收 UVB 辐射的能力与叶片上表皮厚度、叶片总厚度、叶片 UVB 吸收化合物浓度等特征有关，这些特征存在较大的种间差异，且会随生长周期发生变化。若要厘清不同树种吸收紫外辐射在叶片尺度的种间差异，有待进一步的生理生化研究。对于公众而言，通过观察林木冠层郁闭度来规划林下活动时间则足够简便可靠。

3.3　对户外环境设计的启示

林荫环境能够在不同季节和时段极大地延长人们的户外活动时间，使人们免受红斑效应的危害。与澳洲、北美地区通常以孤立木或行道树遮荫为研究对象的相关研究[3–6]相比，片林具有更均匀的遮荫

效果，并能提供更广阔的活动空间。从这个角度来看，提高城市树冠覆盖率，对营造宜居环境、鼓励绿色出行和户外活动，以及提高居民健康水平具有重要的现实意义。上述地区通过制定政策和法规，使自然或人工遮荫环境的营造成为城市规划和户外场所设计的必要工作，以创造健康的城市环境[33−35]。因此，未来可结合我国国情，围绕健康林荫环境设计开展进一步研究。对于养老院、老龄化社区、幼儿园、中小学校、医院、商务区等特定人群活动场所的户外环境设计，应考虑到不同人群的户外活动习惯和对日光的需求差异，不宜一味追求高树冠覆盖率[36]。在进行种植设计时，可结合日照分析和植物物候习性，合理规划种植密度，选择适宜树种，营造健康宜人的林荫环境。

4 结　　论

林荫环境能使健康曝露时长延长至林外的 2 ~ 13 倍。在林冠最为茂盛的夏季，林荫环境对健康曝露时长的延时作用更为明显，即便在正午时段，也能保证人们长时间活动而不受到红斑紫外线危害。人们可通过日光紫外线指数（UVI）和林分郁闭度两个指标，估算并规划户外活动时间。

林分郁闭度和叶面积指数（LAI）是影响林内紫外线辐射量，进而影响林下健康曝露时间的主要因素。郁闭度越高，人们在林荫环境中不受红斑紫外辐射危害的活动时间越长，但合成足量维生素 D 所需的曝露时间也相应增长。因此，林荫环境的设计不仅要考虑树种物候习性、立地条件、种植模式等因素，还应结合场所服务人群的日照需求与活动习惯，营造健康人居环境。

参 考 文 献

[1] Grant W B, Holick M F. Benefits and requirements of vitamin D for optimal health: a review[J]. Alternative Medicine Review, 2005, 10(2): 94−111.

[2] Reichrath J. The challenge resulting from positive and negative effects of sunlight: how much solar UV exposure is appropriate to balance between risks of vitamin D deficiency and skin cancer?[J]. Progress in Biophysics & Molecular Biology, 2006, 92(1): 9−16.

[3] Downs N J, Baldwin L, Parisi A V, et al. Comparing the annualized dynamic shade characteristics of twenty-one tree canopies across twenty-six municipalities in a high ambient UV climate, Queensland -Australia[J]. Applied Geography, 2019, 108: 74−82.

[4] Sivajanani S, Thomas S C, Smith S M. Evaluating the ultraviolet protection factors of urban broadleaf and conifer trees in public spaces[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 51: 126679.

[5] Grant R H. Biologically active radiation in the vicinity of a single tree[J]. Photochemistry and Photobiology, 1997, 65(6): 974−982.

[6] Grant R H, Heisler G M, Gao W. Estimation of pedestrian level UV exposure under trees[J]. Photochemistry and Photobiology, 2002, 75(4): 369−376.

[7] Parisi A V, Kimlin M G, Wong J C, et al. Personal exposure distribution of solar erythemal ultraviolet radiation in tree shade over summer[J]. Physics in Medicine and Biology, 2000, 45(2): 349−356.

[8] 曹冰冰, 邱尔发, 陈明明. 北京市 23 种行道树遮荫及 UVB 屏蔽效果研究 [J]. 中国城市林业, 2016, 14(1): 5.
Cao B B, Qiu E F, Chen M M. A study of the shading and UVB Shielding of 23 species of street trees in Beijing[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2016, 14(1): 5.

[9] 郑思俊, 张庆费, 夏檑, 等. 上海人工绿地群落 UVB 屏蔽效应与冠层特征的关系 [J]. 生态环境, 2008, 17(4): 5.
Zheng S J, Zhang Q F, Xia L, et al. Canopy characters impacts on screening effect to UVB of urban artificial communities in Shanghai[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008, 17(4): 5.

[10] 何锞, 夏继斌, 张一鸣, 等. 日晒伤研究进展 [J]. 临床外科杂志, 2024, 32(12): 1236−1239.
He K, Xia J B, Zhang Y M, et al. Research progress of sunburn[J]. Journal of Clinical Surgery, 2024, 32(12): 1236−1239.

[11] Australian Institute of Health and Welfare. Cancer data in Australia [DB/OL]. Canberra, Australia, (2023−08−01) [2023−10−04]. https://www.aihw.gov.au/reports/cancer/cancer-data-in-australia/contents/summary.

[12] Han B, Zheng R, Zeng H, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022[J]. Journal of the National Cancer Center, 2024(4): 47−53.

[13] 仰曙芬, 吴光驰. 维生素 D 缺乏及维生素 D 缺乏性佝偻病防治建议解读 [J]. 中国儿童保健杂志, 2015, 23(7): 4.
Yang S F, Wu G C. Explanation of the guidance on prevention and treatment of vitamin D deficiency and rickets with nutritional vitamin D deficiency[J]. Chinese Journal of Child Health Care, 2015, 23(7): 4.

[14] 于凌霄. 北京平原造林主要栽植树种适应性及栽植配置研究 [J]. 林业资源管理, 2019(1): 153−157.
Yu L X. Study on adaptability and planting configuration of main tree species in Beijing plain afforestation project[J]. Forest Resources Management, 2019(1): 153−157.

[15] 谢晓阳, 崔雅君, 邱尔发, 等. 2010-2020 年北京市行道树结构特征变化分析 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 78−88.
Xie X Y, Cui Y J, Qiu E F, et al. Analysis on changes of street tree structure in Beijing from 2010 to 2020[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 78−88.

[16] 北京市园林绿化局. 城市森林营建技术导则（DB11/T 1637—2019）[S/OL]. 北京: 北京市园林绿化局, 2019 [2024−05−10]. https://yllhj.beijing.gov.cn/sdlh/ylkj/bzgf/201911/t20191130_2606635.shtml.
Beijing Municipal Forestry and Parks Bureau. Guidelines for

selecting tree species for urban forest construction (DB11/T 1637−2019)[S/OL]. Beijing: Beijing Municipal Forestry and Parks Bureau, 2019 [2024−05−10]. https://yllhj.beijing.gov.cn/sdlh/ylkj/bzgf/201911/t20191130_2606635.shtml.

[17] CIE (International Commission on Illumination) Standard. Erythema reference action spectrum and standard erythema dose (CID S 007/E-1998)[S]. Vienna: CIE, 1998.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 紫外红斑效应参照谱、标准红斑剂量和紫外指数: GB/T 21005—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. UV erythema reference action spectrum, standard erythema dose and UV index. (GB/T 21005−2007)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[19] Diffey B L, Jansén C T, Urbach F, et al. The standard erythema dose: a new photobiological concept[J]. Photodermatology Photoimmunology & Photomedicine, 1997, 13(1−2): 64−66.

[20] 王丽英, 陈昆, 常宝珠, 等. 118 例志愿者紫外线最小红斑量值测定 [J]. 中华皮肤科杂志, 2005, 38(2): 80−82.
Wang L Y, Chen K, Chang B Z, et al. Determination of minimum erythema dose of normal skin to ultraviolet rays[J]. Chinese Journal of Dermatology, 2005, 38(2): 80−82.

[21] 楼小航, 张福仁, 田洪青, 等. 济南地区 94 例正常人最小红斑量测定 [J]. 中华皮肤科杂志, 2006(6): 361.
Lou X H, Zhang F R, Tian H Q, et al. Determination of minimum erythema dose in 94 normal people in Jinan area[J]. Chinese Journal of Dermatology, 2006(6): 361.

[22] 胡聪, 孙丽蕴. 紫外线最小红斑量的检测及其影响因素 [J]. 中国皮肤性病学杂志, 2015, 29(4): 424−426.
Hu C, Sun L Y. The influencing factors of minimal erythemal dose[J]. The Chinese Journal of Dermatovenereology, 2015, 29(4): 424−426.

[23] Holick M F. Sunlight “D”ilemma: risk of skin cancer or bone disease and muscle weakness[J]. Lancet, 2001, 357: 4−6.

[24] McKenzie R L, Liley J B. Balancing the risks and benefits of ultraviolet radiation[M]//Gao W, Slusser J R, Schmoldt D L. UV radiation in global climate change. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 38–41.

[25] 岳金柱, 冯仲科, 姜伟. 大兴安岭林区重特大森林火灾扑救时限预测模型构建研究 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊 2): 128−131.
Yue J Z, Feng Z K, Jiang W. Building time limited forecasting model of gravely extra large fire suppression in Daxing’anling Mountains Forest Region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Suppl.2): 128−131.

[26] 吴梅, 张巍. 北京地区不同季节及曝露方式下的紫外线照射强度 [J]. 卫生研究, 2011, 40(2): 3.
Wu M, Zhang W. Ultraviolet radiation intensity in different seasons and exposure modes in Beijing[J]. Journal of Hygiene Research, 2011, 40(2): 3.

[27] Webb A R, Kline L, Holick M F. Influence of season and latitude on the cutaneous synthesis of Vitamin D3: exposure to winter sunlight in Boston and Edmonton will not promote Vitamin D3 synthesis in human skin[J]. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 1988, 67(2): 373−378.

[28] 赵平, 王秉贤. 紫外线照射与照射后抗佝偻病作用的时间-效应关系的实验研究 [J]. 环境与健康杂志, 1994(6): 247−249.
Zhao P, Wang B X. Experimental study on the time-effect relationship between ultraviolet irradiation and anti-rickets effect after irradiation[J]. Journal of Environment and Health, 1994(6): 247−249.

[29] Holick M F, MacLaughlin J A, Clark M B, et al. Photosynthesis of previtamin D3 in human skin and the physiologic consequences[J]. Science, 1980, 210: 203−205.

[30] de Gruijl F R. Skin cancer and solar UV radiation[J]. European Journal of Cancer, 1999, 35(14): 2003−2009.

[31] 吴梅, 张巍. 不同紫外线辐射剂量率对大鼠血清 25-(OH)D 水平及皮肤效应的影响 [J]. 中国骨质疏松杂志, 2017(7): 870−873.
Wu M, Zhang W. The influence of different ultraviolet (UV) exposure frequency on serum 25 (OH) D and skin in rats[J]. Chinese Journal of Osteoporosis, 2017(7): 870−873.

[32] Qi Y D, Heisler G M, Gao W, et al. Characteristics of UV-B radiation tolerance in broadleaf trees in southern USA[M]//Gao W, Slusser J R, Schmoldt D L. UV radiation in global climate change. Berlin: Springer, 2010: 509−530.

[33] Cancer Council NSW. Guidelines to shade[R]. Sydney：Cancer Council NSW, 2013.

[34] School of Public Health, Queensland University of Technology. Creating shade at public facilities: policy and guidelines for local government (2nd edition) [R]. Melbourne：Australian Institute of Environmental Health (AIEH), 2007.

[35] Shade Policy Committee. Shade guidelines[R]. Toronto: Toronto Cancer Prevention Coalition, 2010.

[36] 孙睿霖, 王成, 张昶, 等. 基于人体健康的 3 种城市森林夏季林内紫外线辐射环境特征比较研究 [J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1491−1500.
Sun R L, Wang C, Zhang C, et al. Comparing the summer ultraviolet radiation characteristics in the shade of 3 urban forests based on human health effects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1491−1500.

（责任编辑　范　娟
责任编委　徐程扬）