

DOI: 10.20103/j.stxb.202212133581

孙睿霖, 王成, 张昶, 殷鲁秦. 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. 生态学报, 2024, 44(4): 1491-1500.

Sun R L, Wang C, Zhang C, Yin L Q. Comparing the summer ultraviolet radiation characteristics in the shade of 3 urban forests based on human health effects. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1491-1500.

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

孙睿霖^{1,2,3}, 王成^{1,2,3,*}, 张昶^{1,2,3}, 殷鲁秦^{1,2,3}

1 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

2 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091

3 国家林业和草原局城市森林研究中心, 北京 100091

摘要: 以中波紫外线为主的紫外辐射对人体健康具有多种生物学影响, 城市森林能够为居民提供温和的紫外辐射环境。为了解林下紫外线辐射环境特征是否存在树种间差异, 对北京市 3 种常见遮荫树种的夏季林下紫外辐射 (UV) 强度、林内与林外 UV 辐射的比值 (SR)、UV-B 在总 UV 辐射中占比 (UV-B/UV), 以及 VD 合成和红斑效应两种人体作用有效辐射强度 (UV_{VD}、UV_{er}) 进行了测算。结果表明: (1) 三种林分林内紫外辐射总量是林外的 3%—10%, 不同林分的林内 UV 强度具有显著差异, 元宝枫林对 UV 屏蔽能力最强, 其次是栾树林和国槐林; (2) 三种林分林冠对不同波长上紫外辐射能量的屏蔽能力具有明显的一致性, 林冠对 UV-B 的屏蔽能力没有在 UVA 波段强和稳定, 林内 UV-B/UV 普遍高于林外, 其中元宝枫林最高, 其次为栾树林, 国槐林最低; (3) 林冠明显改变了日光 UV_{VD} 和 UV_{er} 两种人体作用光谱曲线的形态, 三种林分内的人体作用光谱曲线形态相似, 强度上, 林内外 UV_{VD}/UV_{er} 值均接近 1, 不同林分间没有显著差异; (4) 胸径、无截取散射、平均叶倾角、叶面积指数和叶片透光性等树种特性或林冠结构特征会影响林内 UV 的强度, 但不同林分内的紫外辐射光谱曲线变化趋势和波峰、波谷的位置基本一致, 说明林内 UV 光质特征的树种间差异不明显。

关键词: 紫外线; 城市森林; 人体健康; 城市光环境

Comparing the summer ultraviolet radiation characteristics in the shade of 3 urban forests based on human health effects

SUN Ruilin^{1,2,3}, WANG Cheng^{1,2,3,*}, ZHANG Chang^{1,2,3}, YIN Luqin^{1,2,3}

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry Administration, Beijing 100091, China

3 Urban Forest Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Ultraviolet (UV), primarily ultraviolet B (UV-B) radiation, has multiple biological effects on human health, and urban forests can provide residents with a moderate UV radiation environment. In order to understand whether there are inter-species differences in UV radiation characteristics in canopy shade, diurnal spectral irradiance measurements in the open and below grove canopies of 3 native tree species in Beijing, Chinese scholartree (*Sophora japonica*, SJ), goldenrain tree (*Koelreuteria paniculate*, KP) and Shangtung maple (*Acer truncatum*, AT), had been taken in summer using a portable fiber spectrometer with a cosine corrector. The results showed that: (1) the ratios of UV radiation in shade to which in the open (Shade Ratio, SR) were 0.03—0.1. There were significant differences in UV irradiance between different

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFE0193200)

收稿日期: 2022-12-13; 网络出版日期: 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wch8361@163.com

grove shade at the same time period. AT grove had the lowest shade ratio with a range of 0.03 to 0.05 compared to the range of 0.03—0.09 for KP grove, and 0.07—0.1 for SJ grove; (2) significant consistency in shade ratios of the three groves were found at each wavelength. Shade ratios in UV-B band was not as low and stable as it was in the UV-A band, which indicated that the tree canopy had a stronger effect on UV-A radiation screening than UV-B. The proportion of UV-B radiation in total UV radiation (UV_{-B}/UV) values in shade were generally higher than that in the open, with the highest in AT grove, followed by KP grove and the lowest in the SJ grove; (3) the canopy significantly changed the spectral waveform of both daylight vitamin D production spectrum weighted UV irradiances (UV_{VD}) and erythema action spectrum weighted UV irradiance (UV_{er}), but the spectral curves in different grove shade were similar. In terms of intensity, the ratios of UV_{VD}/UV_{er} were 0.84—1.27. The mean value of the ratios were 0.99 for SJ grove, 0.95 for KP grove, 0.98 for AT grove and 1 for which in the open, with no significant differences between 3 groves; (4) the diameter at breast height (DBH), diffuse non-interception (DIFN), mean tilt angle of the leaves (MTA), leaf area index (LAI), leaf transmission, and other features of tree species or structural characteristics of the canopy, could affect the intensity of UV radiation in grove shade. But the UV radiation spectral waveforms and the positions of the peaks and valleys within different groves were generally consistent, indicating that there were no significant inter-species differences in UV light quality between groves.

Key Words: ultraviolet radiation; urban forest; human health; light environment

日光中以中波紫外线(UV-B)为主的紫外辐射(ultraviolet radiation, UV)穿透能力较强,生物效应明显,其对人体健康的影响具有两面性^[1]:一方面,会引起皮肤红斑效应,造成皮肤色素沉着、晒伤,过度暴露还会带来皮肤癌风险等危害;另一方面,90%以上人体所需维生素D依赖于紫外线照射皮肤后合成^[2],照射不足会导致佝偻病等维生素D缺乏症状^[3]。林木树冠能极大削减日光中的紫外辐射,提供温和的紫外线照射环境,这一特性受到国内外学者关注。在澳洲和北美等地区,由于皮肤癌等紫外线引起的疾病高发,围绕林下紫外线辐射特征及影响因素开展了大量研究。从分布来看,Parisi、Grant分别对独立木树荫测量发现,越靠近树干,UV-A与UV-B的光通量密度较光合有效辐射(PAR)衰减得更快,树荫下与林外的紫外线绝对辐照度比值随紫外线波长的增加而降低,UV-B与PAR比值也呈下降趋势^[4-5],Parisi另一研究测算了不同季节桉树树荫下红斑紫外线在人体不同部位的暴露强度^[6];从绿化模式来看,Grant研究表明,合理的树木栽植方式能够改善环境总体紫外线防护系数(UPF),片林林荫最优,而成排种植形式能够在树冠覆盖不足时提供高UPF值^[7];从树种和树冠结构对林下紫外辐射的影响来看,Ysasi比较了两株不同树木对红斑紫外线的遮挡能力,当皮肤暴露面积低于27%时,两种树木都能为人体提供有效屏障,但相比枝叶较疏的松树,枝叶较密的垂柳对红斑紫外线的屏蔽能力更强也更稳定^[8];Downs利用遮阴指数(SPI)和UPF对澳大利亚昆士兰州不同城市21株树木的树荫质量进行评价排序,发现同一树种树冠对紫外线的遮蔽能力有随纬度升高而下降的趋势^[9];Sivarajah比较了64株16种树木树冠的紫外线遮蔽能力及其与树种和林冠特征的关系,发现耐阴性较高的树种紫外线遮蔽能力更强,树冠透明度和树冠半径与冠高之比是确定单株树木紫外线遮蔽能力的最佳预测因子^[10]。这些研究既有通过实测,也有依据Gao等人建立的冠层下UV-B辐射模型^[11]获得林下紫外线数据。我国学者也研究分析了林冠对紫外线的屏蔽率及树种间差异^[12-14],戴忠炜认为,林下UV-B辐射主要受林冠叶面积指数影响^[15];而郑思俊认为影响因素还包括群落高度和枝下高等冠层特征^[16]。总体上,国外对林内紫外辐射特征和机理的研究较为深入,但多以独立木树荫为研究对象,而国内均以光强为测量指标,缺乏光谱层面的研究。同时,国内外研究多关注紫外辐射不利的一面,并以高紫外线屏蔽率更为有利为前提提出结论。实际上,相比紫外辐射过量引起的红斑效应,因紫外线照射不足造成的维生素D缺乏现象在我国更为普遍^[17-19]。为了探究林下紫外线光强、光质和人体作用光谱等特征是否存在树种间差异,本研究选取北京地区广泛应用的3种城市林荫树种,对其林分夏季林下紫外线辐射状况进行了连续观测和实验分析,以期合理选择城市森林树种,营造具有健康光环境的城市游憩林提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京通州区东郊森林公园(39°57'50"—40°17'N, 116°40'3"—48°E, 海拔 20m), 该园是 2013 年建成的城市郊野公园。园内种植有数十种乡土树种, 林分主要为块状混交林, 种植密度均匀, 林下为自然地被, 代表了典型的北京平原区城市游憩林风貌。公园周边无高大建筑群, 园内地形开阔平坦。

1.2 样地林分特征

研究树种选择近年来北京行道树和游憩林应用较多的 3 个乡土树种^[20-21], 包括国槐(*Sophora japonica*, SJ)、栾树(*Koelreuteria paniculata*, KP)和元宝枫(*Acer truncatum*, AT), 各树种林分面积均超过 8.5 亩, 样方设置于远离林缘的林分内部, 大小为 10m×10m, 林下为自然地被。不同于以往很多研究选择城区孤植树或单排种植行道树, 本研究各样方内冠层结构相对单一整齐, 林内具有相对独立的林下光环境(图 1), 减小了来自林缘、建筑和地面铺装对光环境的影响^[22]。利用冠层分析仪(美国 LI-COR, LAI-2200)测量林分叶面积指数(LAI)、无截取散射(DIFN)和平均叶倾角(MTA)等冠层结构指标, 还测量了样方内每株乔木的树高、冠高、冠幅、胸径和株间距。从表 1 可以看出, 三种林分间树高、冠高和株间距差异不显著, 国槐林的胸径指标和元宝枫林的冠幅指标略高于另外两个林分; 冠层结构上, 林分叶面积指数由高到低依次为栾树林、元宝枫林和国槐林, 叶面积指数越高, 截取散射越小; 国槐林的平均叶倾角略高于另两个林分。



图 1 利用全景相机拍摄的样方冠层影像

Fig.1 Canopy image in plots taken with panoramic camera

表 1 样方森林结构与冠层特征($\bar{x}\pm s$)

Table 1 Forest structure and canopy characters in plots

样地 Plots	胸径 DBH/cm	树高 H/m	冠高 CH/m	冠幅 CD/m	行株距 RS/m	叶面积 指数 LAI	无截取 散射 DIFN	平均叶 倾角 MTA
SJ	19.83±1.52a	10.19±1.35a	7.52±1.26a	4.61±0.63b	4.04±0.55a	1.84	0.24	52.31
KP	16.24±1.99b	10.73±1.36a	7.68±0.24a	4.53±0.65b	4.47±.47a	4.36	0.03	45.8
AT	17.18±1.42b	9.86±1.59a	7.8±1.28a	6.55±1.53a	4.72±1.17a	3.01	0.1	45.66

SJ: 国槐林 *Sophora japonica*; KP: 栾树林 *Koelreuteria paniculata*; AT: 元宝枫林 *Acer truncatum*; DBH: 胸径 Diameter at breast height; H: 树高 Tree height; CH: 冠高 Crown height; CD: 冠幅 Crown diameter; RS: 行株距; Row spacing; LAI: 叶面积指数; DIFN: 无截取散射; MTA: 平均叶倾角; 不同小写字母表示不同林分间差异显著($P<0.05$)

1.3 紫外辐射测定

紫外线测量时间为 2021 年 8 月 6 日, 在晴朗天气, 根据居民日常户外活动规律, 从 8:00 至 16:00, 每 2 小时对 3 种林分林内和开阔无遮挡对照点紫外线辐射进行一次观测, 各组指标控制在半小时内采集完毕。紫外

光绝对辐照度采用安装了余弦校正器的微型光纤光谱仪(美国 Ocean Optics, FLAME)进行采集。数据采集期间,光纤探头向上置于操作员头顶上方距地面约 1.7m 位置,操作员在 10×10 样方内匀速平稳走动,路径覆盖样方范围,获取途经各点的紫外线光谱数据,每次能够采集各样方内光谱数据 100 个以上。研究波段范围划分为 UV-B(280—315nm)、UV-A(316—400nm)和全 UV(250—400nm)。

1.4 数据处理

利用 R、Excel、Origin 等软件对光谱数据进行统计分析和作图。首先对光谱数据进行预处理,使绝对辐照度值在波长上以 1nm 递进,利用采样中位数进行统计描述和绘制光谱图。

1.4.1 紫外线辐射强度和光质特征分析

对各波长上绝对辐照度测量值进行积分,得到各紫外波段的总辐射强度。紫外总辐射强度的样方间比较使用 Kruskal-Wallis 非参数检验,并用 Dunn 法进行多重比较。借鉴 Parisi 的遮荫比(Shade Ratio, SR)指标^[8],即林内辐射强度与天空辐射强度的比值,反映林冠对紫外辐射的总体屏蔽能力及其在光谱上的分布。

紫外辐射引发人体皮肤红斑或促发维生素 D 合成的能力随波长改变。从国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)制定的红斑效应和维生素 D 合成效应参照谱(图 2)可以看出,紫外线维生素 D 合成效能在 298nm 处达到最高值,而红斑作用效能从 298nm 处开始衰减,UV-B 对这两种人体作用的贡献要大于 UVA。因此,对不同环境中 UV-B 在紫外总辐射强度中的占比 UV-B/UV 进行比较,采用双因素方差分析和 Scheffe 检验。

1.4.2 紫外辐射人体作用光谱比较

通过对 UV 光谱进行上述两种人体效应参照谱加权^[23—25],形成不同环境中紫外红斑效应和维生素 D 合成效应谱。进一步将两个光谱进行积分,获得红斑效应有效辐射强度(UV_{er})和 VD 合成有效辐射强度(UV_{VD})。用 UV_{VD}/UV_{er} 比值分析两种作用的变化和环境差异^[26]。 UV_{VD}/UV_{er} 比值的均值间比较,采用双因素方差分析, Scheffe 检验。

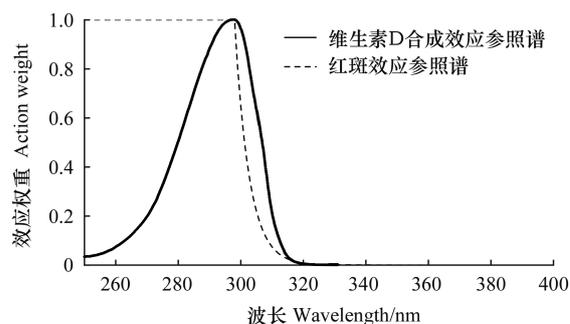


图2 紫外红斑效应和维生素 D 合成效应加权参照谱

Fig.2 Erythema action spectrum and the production of pre-vitamin D3 Action Spectrum

2 结果与分析

2.1 林内紫外线辐射环境特征

2.1.1 林内紫外线辐射强度特征

从图 3 可以看出,林外紫外线辐射强度呈单峰型,正午达到峰值,为 $2829.09\mu\text{W}/\text{cm}^2$,比早晚时高 $1683.06\mu\text{W}/\text{cm}^2$,增加了一倍多。林内紫外辐射强度日变化趋势与林外一致,三种林分 12:00 紫外辐射强度分别为国槐林 $296.43\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、栎树林 $129.58\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、元宝枫林 $88.35\mu\text{W}/\text{cm}^2$,比早晚平均紫外线强度提高了 $191.36\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、 $38.36\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $43.06\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。非参数检验显示,同一时段不同林分间林内紫外线强度均存在极显著差异,其中 8:00 ($\chi^2 = 113.98, P < 0.001$)、10:00 ($\chi^2 = 83.93, P < 0.001$)、12:00 ($\chi^2 = 113.24, P < 0.001$)、14:00 ($\chi^2 = 168.85, P < 0.001$)、($\chi^2 = 174.5, P < 0.001$)。

进一步将胸径、冠幅、叶面积指数、无截取散射和平均叶倾角 5 个具有显著差异的林分特征参数与林下紫外线绝对辐照度进行相关分析,判断影响林内紫外辐射强度的主要影响因素。结果表明,林内 UV 强度与胸径、无截取散射和平均叶倾角呈显著正相关关系,与叶面积指数呈显著负相关关系(表 2)。可见林内 UV 辐射强度不仅受林外日光辐射变化影响,也与冠层特征有较强的关联。

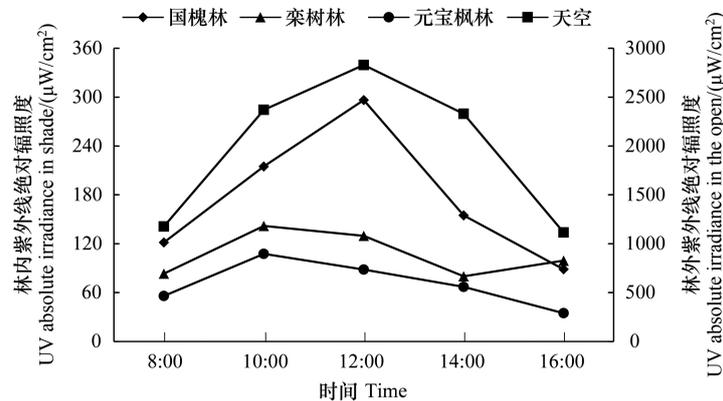


图 3 不同样地紫外线绝对辐照度日变化

Fig.3 Diurnal variation of UV absolute irradiance in different plots

表 2 林下紫外线绝对辐照度与林分特征参数相关分析

Table 2 The correlation analysis between UV absolute irradiance in shades and structure characters of plots

参数 Parameters	紫外辐射 UV radiation	胸径 DBH	冠幅 CD	叶面积指数 LAI	无截取散射 DIFN	平均叶倾角 MTA
紫外辐射 UV radiation	1	0.77637 **	-0.55189	-0.62287 *	0.74408 **	0.85091 **
<i>P</i>	—	0.00298	0.06283	0.03051	0.00552	0.00045

*, 显著相关性 $P < 0.05$; **, 极显著相关性 $P < 0.01$

2.1.2 不同树种对紫外辐射的屏蔽能力比较

遮荫比 SR (Shade Ratio) 是林内与林外 UV 辐射的比值, 该值反映林分对紫外辐射的屏蔽能力。各林分全天 SR 值在 0.03—0.1 不等 (图 4), 其中国槐林全天 SR 平均为 0.09, 栾树林为 0.06, 元宝枫林为 0.04。元宝枫在各时段的 SR 值均低于另外两个树种, 全天的波动幅度最小, 为 0.02, 说明其对紫外辐射的屏蔽能力优于另外两个林分。

对林内紫外光谱 SR 值进行平滑处理后, 获得该值随波长变化曲线 (图 5), 进而了解林冠对不同波长紫外光的屏蔽效果。可以看出, SR 在 UV-B 波段呈不规则变化, 且不同波长上的变化幅度较大, 而随着波长的增加, UV-A 波段 SR 值趋于稳定。不同时段间主峰位置略有偏移, 但同一时段三种林分 SR 光谱分布曲线变化趋势基本一致, 主峰值位置有明显的一致性, 分别在 265nm、285nm、293nm 和 301nm 左右位置呈现波峰, 说明林冠对这些位置波长上紫外能量屏蔽能力较低。不同林分间存在个别 SR 峰谷值位置不一致的现象, 而这些异常值在同林分其他时段并无重复, 因此可认为是实测中产生的随机误差。

不同时段间主峰位置略有偏移, 但同一时段三种林分 SR 光谱分布曲线变化趋势基本一致, 主峰值位置有明显的一致性, 分别在 265nm、285nm、293nm 和 301nm 左右位置呈现波峰, 说明林冠对这些位置波长上紫外能量屏蔽能力较低。不同林分间存在个别 SR 峰谷值位置不一致的现象, 而这些异常值在同林分其他时段并无重复, 因此可认为是实测中产生的随机误差。

2.1.3 林内紫外辐射光质特征

图 6 显示了 8:00、10:00 和 12:00 紫外光谱能量分布情况。可以看出, 紫外光在 UV-B 波段能量较低, 增长缓慢, 300nm 处的光谱曲线斜率为 0.17; 在接近 UVA 波段紫外光能量迅速增强, 315nm 处斜率达 1.07。在接近可见光的波段, 可以看到由太阳光谱暗线现象引起的若干明显的波谷。不同林分的紫外光谱曲线变化趋势和波峰、波谷的位置与林外基本一致, 辐射强度随天空日照增强或减弱, 但林内光谱变化幅度相对平缓, 说明林荫下光质分布更加均匀。

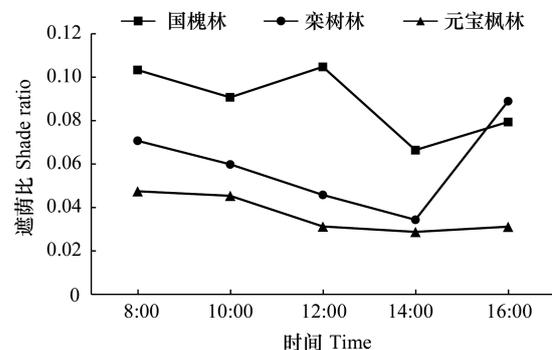


图 4 不同树种紫外光强遮荫比 SR 值日变化

Fig.4 Changes of Shade ratio (SR) in different tree shade

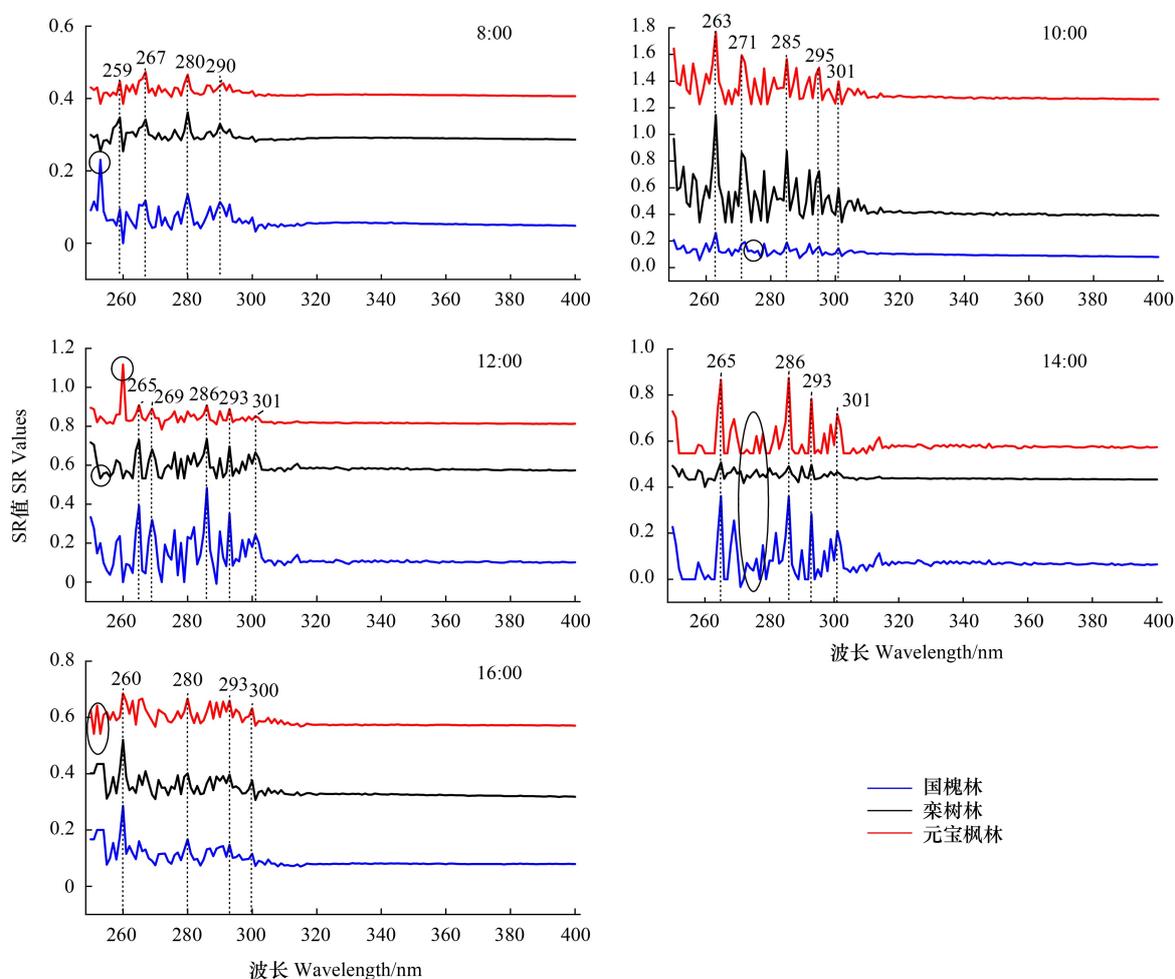


图5 不同样地内 SR 随波长变化曲线的比较

Fig.5 Comparison of wavelength changing curves of SR in each plot

虚线示意位置一致的主波峰,圆圈实线表示异常值

对 UV-B 波段做进一步研究,比较 UV-B 辐射在总 UV 辐射中占比(UV-B/UV)的差异。各样方内 UV-B/UV 呈正态分布,通过双因素方差分析,发现 UV-B/UV 在林内外和不同林分间 ($F=249.64, P < 0.05$),以及一天中不同时段间 ($F=187.74, P < 0.05$) 均有显著差异(图 7)。一天中,林外 UV-B/UV 呈现日间高、早晚低的规律,最大差值为 0.006;林内 UV-B/UV 普遍高于林外,且波动幅度较大,在太阳高度角较大的 10:00 至 14:00,UV-B/UV 的变异性增强。总体上,林内不同时段 UV-B/UV 值元宝枫林最高,其次为栎树林,国槐林最低;一天中 UV-B/UV 的最大差值为国槐林 0.008、栎树林 0.012 和元宝枫林 0.019。

2.2 林内紫外线人体作用强度特征

2.2.1 林内紫外线人体作用光谱特征

将紫外线各波长上的辐照度进行加权,对紫外线的人体作用光谱特征进行分析。经过平滑处理,图 8 显示了 12:00 天空及林内的 VD 合成作用光谱和红斑作用光谱曲线。全日照下,VD 作用光谱呈单峰形态,在 306nm 处达到峰值;而林内的 VD 作用光谱在 300nm 前有较大波动,三个林分均在 288nm、295nm 和 304nm 处有三处较明显的波谷,同时峰值较全日照环境左移,位于 301nm、302nm 处。全日照下的红斑作用光谱也接近单峰形态,在 297nm 处为最高峰值;而各林分林下红斑作用光谱曲线呈现较明显的双峰形态,均在 284nm 和 299nm 呈现峰值,在 290nm 附近为谷值。其他时段的人体作用光谱曲线呈现相似的形态,强度值随日光紫外辐射的强弱变化。

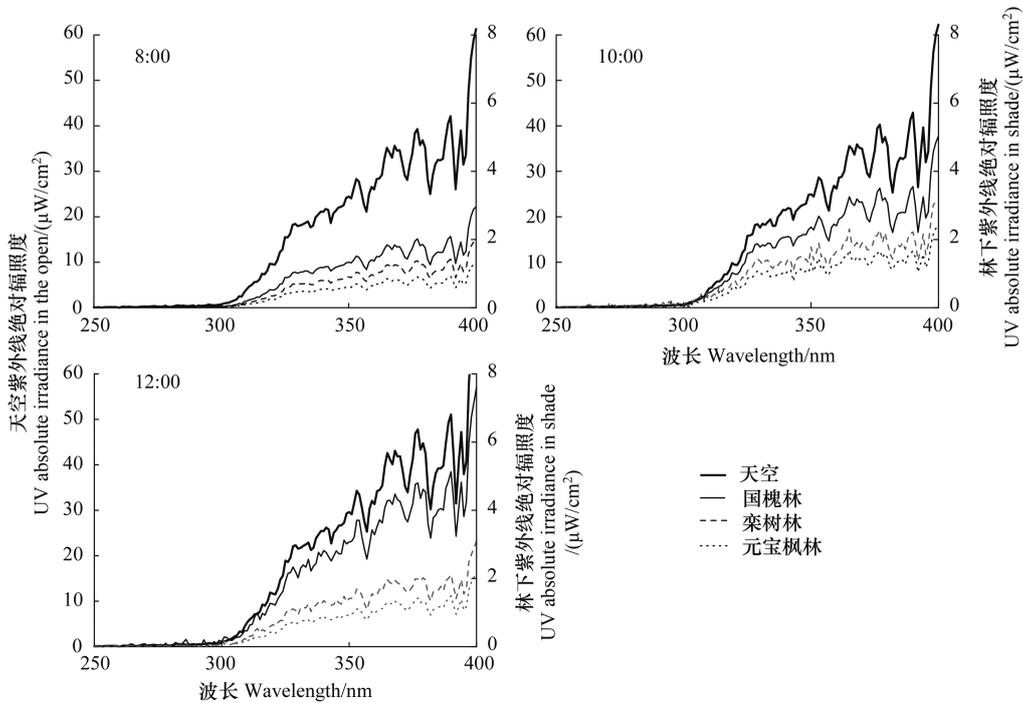


图 6 8:00、10:00 和 12:00 林内外 UV 光谱比较

Fig.6 UV spectrum of different plots at 8:00, 10:00 and 12:00

2.2.2 林内紫外光两种人体作用能量比日变化特征

对各时段加权光谱进行积分,得到林内外各时段紫外线红斑效应和 VD 合成作用有效辐射强度(表 3)。一天中林内 UV_{VD} 为林外的 2.9%—15.06%, UV_{er} 为林外的 2.32%—15.89%,同一环境中的 UV_{VD} 与 UV_{er} 值接近。

图 9 显示了 UV_{VD}/UV_{er} 在不同时段和不同样地内的变化。对照点 UV_{VD}/UV_{er} 随太阳高度角升高而增加,正午达到最高值 1.06,而各林分内该比值的变化波动较大,无明显规律。一天中不同环境下 UV_{VD}/UV_{er} 在 0.84—1.27 间变化。全天 UV_{VD}/UV_{er} 平均值分别为国槐林 0.99、栾树林 0.95、元宝枫林 0.98,林外为 1。对林内各样地 UV_{VD}/UV_{er} 进行双因素方差分析,发现该值在不同林分间 ($F=2.49, P>0.05$) 无显著差异,但在不同时段 ($F=3.97, P<0.01$) 具有显著差异。

3.3 结论与讨论

城市中的行道树、公园园林、社区绿化不光为城市居民提供宜人的小气候,也营造了独特光照环境。在炎炎夏日,林冠能极大地减少太阳紫外辐射,即便在正午时段,林荫下的紫外辐射量仍能维持在较低水平^[26]。本研究中 3 种片林对紫外辐射的削减量高达 90% 以上,而根据 Parisi、Grant 等澳洲学者的测算,孤立木树冠下紫外辐射削减量比例通常在 50% 左右,即便是郁闭度较高、冠幅较大的独立树冠,削减量也不会超过 80%,树干处阴影中的紫外辐射比树冠边缘处下降 40% 左右。可见,相比孤立木或分散种植的绿化树木,绿荫如盖的城市片林所营造的阴影更为均匀、覆盖面积更大,因此具有更强的紫外线遮蔽能力。

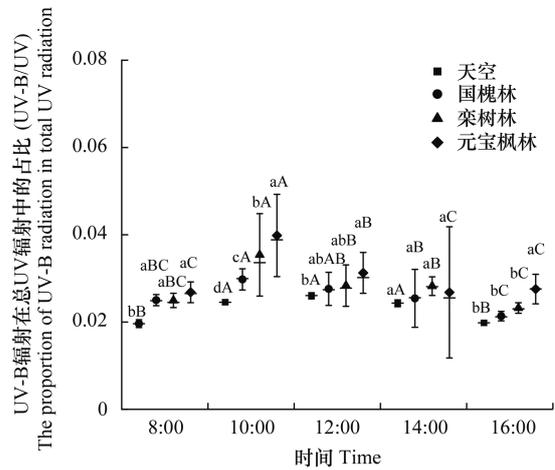


图 7 不同样方 UV-B/UV 日变化

Fig.7 Changes in UV-B/UV for different plots

不同小写字母表示同时段不同样方差异显著,不同大写字母表示同样方不同时段差异显著 ($P<0.05$)

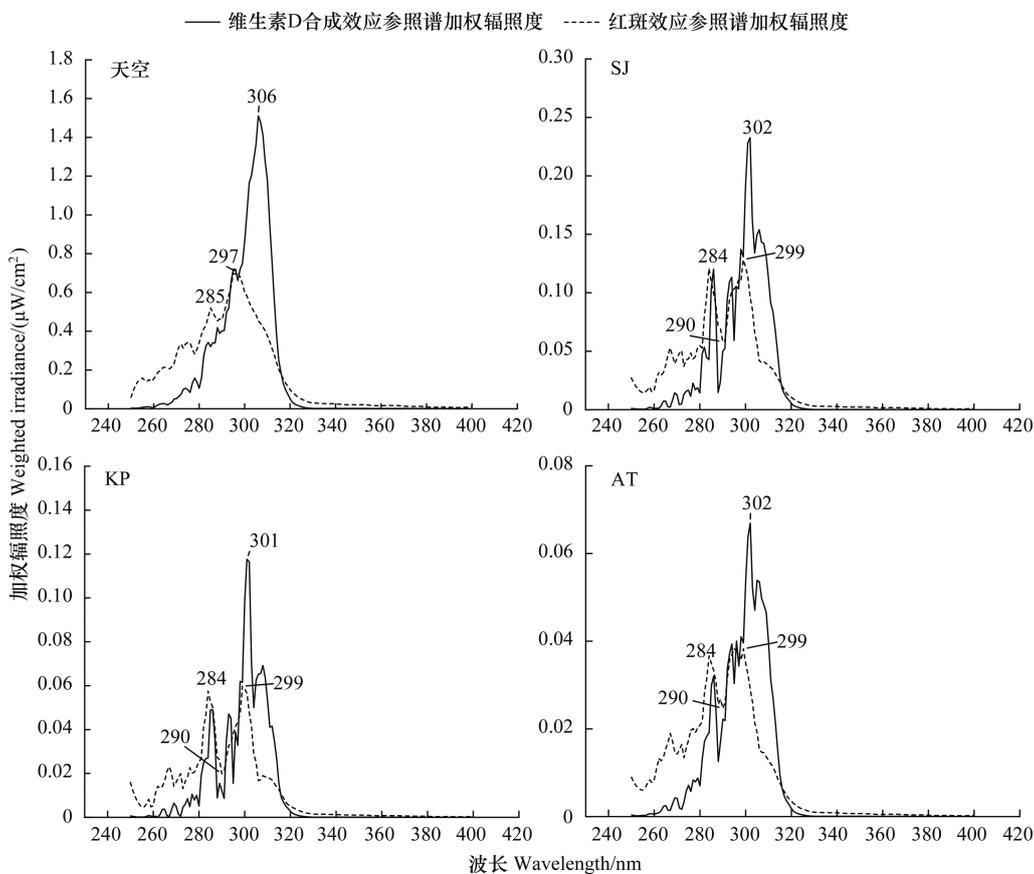


图 8 12:00 林内外紫外线人体作用光谱比较

Fig.8 Human effects weighted UV spectrum in different plots at 12:00

表 3 林内外紫外线两种人体作用有效辐射量比较/($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

Table 3 Comparison of two human effects weighted UV irradiance in different plots

时间 Time	VD 合成有效辐射 UV_{VD} VD production weighted irradiance				红斑效应有效辐射 UV_{er} Erythemal weighted irradiance			
	天空	SJ	KP	AT	天空	SJ	KP	AT
	8:00	8.57	1.29	0.84	0.65	8.87	1.41	0.91
10:00	22.23	2.57	2.41	1.90	21.78	2.56	2.81	2.16
12:00	28.29	3.39	1.47	1.25	26.60	3.22	1.26	1.24
14:00	22.26	1.69	0.97	0.65	21.90	1.51	1.00	0.51
16:00	8.82	0.84	0.97	0.50	9.59	0.99	1.12	0.59

通过相关性可知,林内 UV 强度与胸径、无截取散射和平均叶倾角呈显著正相关关系,与叶面积指数呈显著负相关关系。一般认为,林冠密度越大,林内辐射越低。林冠密度可由叶面积指数、无截取散射等参数反映。从冠层结构和辐射量数据对比可以看出,叶面积指数较低、无截取散射最大的国槐林,各时段林内紫外线辐射强度确实比其他林分更高。但 3 个林分中叶面积指数最高、无截取散射最小的栎树林,在同一时段其林内紫外辐射强度并非最低,反而是林冠密度略低的元宝枫林,林内紫外辐射最小。根据齐亚东对 30 种美国常见阔叶树的研究,UV-B 的屏蔽能力与叶片厚度有关^[27];Sivarajah 的研究也显示,UV-B 的屏蔽能力与树冠透明度等冠层结构因子有关。由此推测,当冠层结构相近且林冠密度较大时,不同树种叶片的薄厚或透光能力不同造成的林内紫外辐射强度差异得以显现。例如本研究中林冠密度较大的栎树林内紫外辐射强度略高于同时段元宝枫林,是由于栎树有着更薄、更透光的叶片。

在光谱上,不同林分内的紫外辐射光谱曲线变化趋势和波峰、波谷的位置基本一致,说明不同树种对紫外光光质的改变没有明显差异。不同树种对 UV-B 波段不同波长的紫外辐射能量的屏蔽能力也具有一致性。各林分遮荫比在 UV-A 波段比 UV-B 波段更低且更稳定,说明林冠对长波紫外线的屏蔽能力更强也更为均匀。UV-B 与 UV 的比值也反映了林冠对 UV-A 和 UV-B 屏蔽能力的差异,林内 UV-B/UV 普遍高于林外。但从辐射总量来看,一是日光中 UV-B 辐射能量均远低于 UV-A,二是各林分内全天 UV-B 能量远低于林外,林冠极大地削减和屏蔽了具有更强生物效应的 UV-B,因此,与林内外 UV-B 总量的差异相比,林内外 UV-B/UV 的细微差异恐怕不足以对人体产生明显的影响。

通过对环境 UV 辐射进行人体作用加权,对 UV_{VD} 和 UV_{VD} 两种作用光谱及作用强度进行分析,发现二者能量差异很小,其分异特征的实际意义可能不大,但揭示了林冠对于日光紫外线人体作用光谱特征的改变。总体来看,日光中红斑作用光谱的波形没有 VD 作用光谱陡峭,说明紫外线红斑效应有效辐射波段更为宽泛、作用相对更均匀,而林冠不仅降低了作用的强度,也改变了人体作用光谱的分布,特别是红斑效应光谱的分布。无论是林内还是全日照下, UV_{VD} 与 UV_{er} 值接近,林内外 UV_{VD}/UV_{er} 无显著差异,计算值在 1 左右。而在 McKenzie 的研究中,树荫下 UV_{VD}/UV_{er} 值略高于全日照下比值,其计算比值接近 2。这一差异可能是由于 VD 效应加权紫外线受臭氧环境和和太阳天顶角(SZA)影响很大,导致其日变化、季节变化和地理变化比红斑效应加权紫外线更明显,使不同实验地区的比值结果略有不同^[28]。

综上,北方城市建设林荫空间时,在配置模式上,应优先考虑营造林冠郁闭的小片林^[29];在树种选择上,可考虑选用平均叶倾角小、叶面积指数大、叶片较厚的落叶树种^[30-31],以兼顾不同季节的紫外辐射强度变化以及人体需求。同时,由于林冠对紫外线较强的屏蔽能力,在养老机构、老龄化社区等场所,应避免树冠覆盖过密,造成老人等行动不便人群无法获得足够日照,导致维生素 D 缺乏。

参考文献 (References):

- [1] 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? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2006, 92(1): 9-16.
- [2] 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. *环境与健康杂志*, 1994, 11(6): 247-249.
- [3] Grant W, Holick M. Benefits and requirements of vitamin D for optimal health: a review. *Alternative Medicine Review*, 2005, 10(2), 94 - 111.
- [4] Parisi A V, Kimlin M G, Turnbull D. Spectral shade ratios on horizontal and Sun normal surfaces for single trees and relatively cloud free sky. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2001, 65(2/3): 151-156.
- [5] Grant R H. Biologically active radiation in the vicinity of a single tree. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, 65(6): 974-982.
- [6] Parisi A V, Kimlin M G, Wong J C F, Lester R, Turnbull D. Reduction in the personal annual solar erythemal ultraviolet exposure provided by Australian gum trees. *Radiation Protection Dosimetry*, 2000, 92(4): 307-312.
- [7] Grant R H, Heisler G M, Gao W. Estimation of pedestrian level UV exposure under trees. *Photochemistry and Photobiology*, 2007, 75(4): 369-376.
- [8] Ysasi G G, Ribera L J C. Analysis of two kinds of tree as physical barriers against erythemal UV-B radiation received. *Photochemistry and Photobiology*, 2013, 89(3): 724-729.
- [9] Downs N J, Baldwin L, Parisi A V, Butler H J, Vanos J, Beckman M, Harrison S. Comparing the annualised dynamic shade characteristics of twenty-one tree canopies across twenty-six municipalities in a high ambient UV climate, Queensland-Australia. *Applied Geography*, 2019, 108: 74-82.

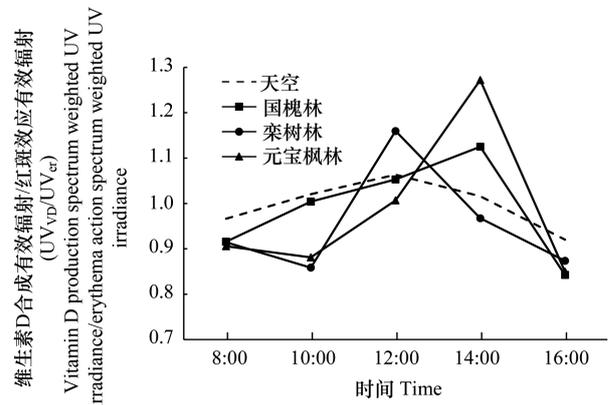


图 9 不同样方内 UV_{VD}/UV_{er} 日变化

Fig.9 Changes in UV_{VD}/UV_{er} of different plots

- [10] Sivajanani S, Thomas S C, Smith S M. Evaluating the ultraviolet protection factors of urban broadleaf and conifer trees in public spaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, 51(2020), 126679.
- [11] Gao W, Grant R H, Heisler G M, Slusser J R. A geometric ultraviolet-B radiation transfer model applied to vegetation canopies. *Agronomy Journal*, 2002, 94(3): 475-482.
- [12] 曹冰冰, 邱尔发, 陈明明. 北京市 23 种行道树遮荫及 UV-B 屏蔽效果研究. *中国城市林业*, 2016, 14(1): 13-17.
- [13] 吴家兵, 孙雨, 李荣平, 孙迪. 沈阳市 6 种行道树对紫外辐射屏蔽效应的研究. *辽宁林业科技*, 2011(4): 1-3, 46.
- [14] 李海涛, 胡东, 廖迎春, 闫雪东, 袁伟静, 沈文清. 北京市六种园林绿化树种对 UV-B 的屏蔽效应. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(6): 139-141.
- [15] 戴忠炜, 姜禹, 黄思颖, 林钰珺, 吴涌平, 兰思仁. 遮荫植被对高密度人群地 UV-B 辐射的影响——以福建农林大学为例. *河南科技学院学报: 自然科学版*, 2019, 47(1): 25-30.
- [16] 郑思俊, 张庆费, 夏楠, 侯庆武, 林明锐. 上海人工绿地群落 UV-B 屏蔽效应与冠层特征的关系. *生态环境*, 2008, 17(4): 1523-1527.
- [17] 江巍, 高凤荣. 维生素 D 缺乏相关性疾病研究进展. *中国骨质疏松杂志*, 2014, 20(3): 331-337.
- [18] 王翠侠, 张倩, 胡长梅, 刘颖, 段一凡, 鲁力, 胡小琪. 北京城区老年妇女维生素 D 营养状况. *中国骨质疏松杂志*, 2009, 15(9): 672-675.
- [19] 沙怡梅, 黄梨煜, 王睿焯, 于博, 姚一泓, 喻颖杰, 赵耀. 2016—2018 年北京市学龄儿童维生素 D 营养状况及其分布特点. *卫生研究*, 2022, 51(6): 969-974.
- [20] 谢晓阳, 崔雅君, 邱尔发, 符庆成. 2010—2020 年北京市行道树结构特征变化分析. *北京林业大学学报*, 2023, 45(1): 78-88.
- [21] 北京市园林绿化局. 北京城市森林建设树种选择导则. 2019, 10. http://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/fgwj/qtwj/201911/t20191130_766927.shtml
- [22] 于盈盈, 胡聃, 王晓琳, 李元征, 韩风森. 城市不同遮阴环境下光强和光质特征. *生态学报*, 2015, 35(23): 7748-7755.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 红斑基准反应光谱及标准红斑剂量; GB/T 20150—2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [24] CIE S 007/E-1998 Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose.
- [25] CIE 174-2006 Action Spectrum for the Production of Pre-vitamin D3 in Human Skin.
- [26] Heisler G M. Urban forest influences on exposure to UV radiation and potential consequences for human health. Gao W, Slusser JR, Schmoldt DL. *UV Radiation in Global Climate Change*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 331-369.
- [27] Qi Y D, Heisler G M, Gao W, Vogelmann T C, Bai S J. Characteristics of UV-B radiation tolerance in broadleaf trees in southern USA. Gao W, Slusser JR, Schmoldt DL. *UV Radiation in Global Climate Change*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 509-530.
- [28] McKenzie R L, Liley J B. Balancing the risks and benefits of ultraviolet radiation. Gao W, Slusser JR, Schmoldt DL. *UV Radiation in Global Climate Change*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 21-47.
- [29] Moreno A, Tangenberg J, Hilton B, Hilton J. An environmental assessment of school shade tree canopy and implications for sun safety policies: The Los Angeles unified school district. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(2): 607-625.
- [30] UVR Working Group, Toronto Cancer Prevention Coalition. Shade Guidelines. 2010, 7. http://www.toronto.ca/health/resources/tcpc/shade_guidelines.htm
- [31] SunSmart Victoria. Shade Guidelines. Cancer Council Victoria, Melbourne. 2015. <https://www.sunsmart.com.au/downloads/resources/booklets/shade-guidelines.pdf>