

基于人体模型模拟三亚市不同地理朝向眼部暴露紫外辐射分布的研究

王芳, 刘扬

摘要:

[目的] 利用人体头部模型模拟研究不同地理朝向时眼部紫外辐射的暴露量及其时间分布。

[方法] 使用自制的安装有高紫外灵敏度光纤光谱仪的眼紫外线暴露模型在中国三亚地区进行实地监测, 起始方位是模拟眼部正对南方向, 顺时针旋转监测, 每隔6°自动监测一次, 获得大量对应不同地理朝向的眼部暴露紫外辐射数据。

[结果] 东向和西向眼暴露长波紫外光(UVA)分别在上午9:00和下午16:15(~50°太阳天顶角)左右达到最大值, 分别为2324.88 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和2442.68 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 眼暴露中波紫外光(UVB)分别在上午9:45和下午15:50(~40°太阳天顶角)左右达到最大值, 分别为93.83 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和92.54 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; 南向和北向眼暴露UVA和UVB峰值均出现在正午12:00(~7°太阳天顶角)左右, 分别为1056.09 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和61.45 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。眼部暴露紫外辐射最大辐照度在地理朝向上的分布是正东偏北和正西偏北12°左右。东向和西向最大剂量百分比分别出现在9:00—10:00和15:00—16:00, 为19.67%和17.11%, 南向和北向最大剂量百分比均出现在12:00—13:00, 为12.68%和12.98%。

[结论] 不同地理朝向时眼部紫外辐射高暴露的时间段各不同。

关键词: 眼; 头部模型; 紫外辐射; 地理朝向; 分布

引用: 王芳, 刘扬. 基于人体模型模拟三亚市不同地理朝向眼部暴露紫外辐射分布的研究[J]. 环境与职业医学, 2017, 34(3): 202-208. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.16533

Simulation of ocular exposure to ultraviolet spectral irradiance in different geographic directions in Sanya based on a manikin WANG Fang, LIU Yang (School of Public Health, China Medical University, Shenyang, Liaoning 110122, China). Address correspondence to LIU Yang, E-mail: yangliu@cmu.edu.cn
· The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract:

[Objective] To investigate the intensity and time distribution of ocular exposure to ultraviolet spectral irradiance in different geographic directions based on a manikin head model.

[Methods] An on-site monitoring program was conducted in Sanya, China using a spectrometer with high ultraviolet sensitivity installed to a manikin head model to simultaneously measure simulated ocular exposure to ambient ultraviolet spectral irradiance beginning due south and recording data per 6° rotation clockwise.

[Results] For east and west geographic directions, the maximum ocular exposure to ultraviolet A (UVA) irradiance occurred at 9:00 and 16:15 (up to 50° solar zenith angle), being 2324.88 and 2442.68 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ respectively; the maximum ocular exposure to ultraviolet B (UVB) irradiance occurred at 9:45 and 15:50 (up to 40° solar zenith angle), being 93.83 and 92.54 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, respectively. For south and north geographic directions, the maximum ocular exposure to UVA and UVB irradiance both occurred at 12:00 (up to 7° solar zenith angle), namely 1056.09 and 61.45 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, respectively. The maximum ocular exposure to ultraviolet irradiance occurred at east to north 12° and west to north 12°. The maximum ratios of hourly exposure over daily cumulated exposure to ultraviolet occurred at 9:00-10:00, 19.67% for the east direction, and 15:00-16:00, 17.11% for the west; for the south and north, the maximum ratios both occurred at 12:00-13:00, which were 12.68% and 12.98%, respectively.

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(编号: 81273034)

[作者简介] 王芳(1985—), 女, 博士, 讲师; 研究方向: 紫外线生物效应; E-mail: wangf@cmu.edu.cn

[通信作者] 刘扬, E-mail: yangliu@cmu.edu.cn

[作者单位] 中国医科大学公共卫生学院, 辽宁 沈阳 110122

[Conclusion] Time-dependent high-level exposure to ultraviolet spectral irradiance are identified for different geographic directions.

Keywords: oculus; head manikin; ultraviolet; geography direction; distribution

Citation: WANG Fang, LIU Yang. Simulation of ocular exposure to ultraviolet spectral irradiance in different geographic directions in Sanya based on a manikin[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2017, 34(3): 202-208. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.16533

目前在世界范围内已经公认紫外辐射过度暴露会导致眼角膜、结膜、晶体损伤及翼状胬肉等^[1-7],并呈现随到达地面紫外辐射增加而逐渐严重的趋势。眼部紫外辐射暴露的影响因素较多,除了太阳高度角、海拔、地面反射、天空散射和人眼部周围眼眶、眼睑、眉弓、鼻梁、颊部等面部结构的影响^[8-11],人体面向地理朝向对眼部暴露紫外辐射的影响也不容忽视^[12]。之前对眼部暴露紫外辐射的研究有应用水平环境或者不同倾斜角度平面环境紫外辐射等同于眼部暴露紫外辐射的报道^[13]。朝向对眼暴露紫外辐射的影响没有得到足够的重视。

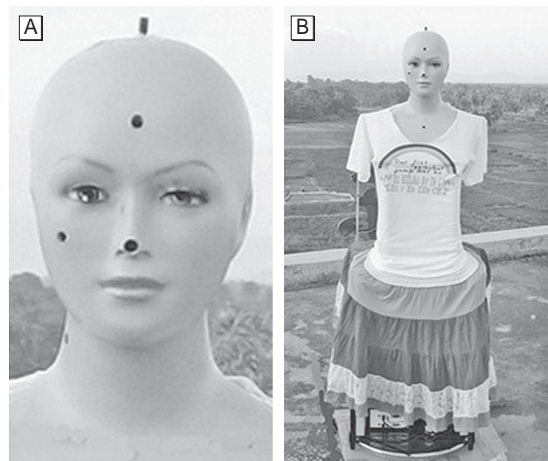
准确测量到达眼部的紫外辐射暴露量是进行眼部暴露危险性评价的重要基础。由于很难应用真人进行类似实验,一些研究者已尝试应用人体模型进行模拟眼部个体紫外辐射暴露研究^[14-16]。类似模型还被应用到模拟头部不同位置^[17]、不同姿势^[18]的紫外辐射暴露,以及面部红斑有效暴露量^[19]等研究。本课题组之前曾对旋转式人体模型眼部最大(正对太阳)、最小(背对太阳)及平均暴露状态下的眼部暴露紫外辐射照度及其与眼部损伤作用光谱相加权后计算得到的眼部暴露生物有效紫外辐射照度(biologically effective UV irradiances)的日间分布进行研究^[20],并对以正对太阳为起点的眼暴露紫外辐射危险角度范围进行探讨,得出正对太阳(0°)为起点顺时针 60° 和逆时针 60° 内均是危险角度^[21]。据查,人体头部模型目前还没有被应用到眼部暴露紫外辐射照度对应不同地理朝向危险性的研究。

本研究应用的人体模型可以再现人体眼周解剖结构对眼暴露紫外辐射照度的影响,旋转方式可以获得一周 360° 范围内每隔 6° 共60个方向的眼暴露紫外辐射数据。为了解较全的太阳天顶角范围的紫外辐射情况,本研究选择了我国的三亚地区作为监测地点,提供中波紫外光(UVB, 300~320 nm)和长波紫外光(UVA, 320~400 nm)在全天不同时间、不同地理朝向眼暴露紫外辐射照度的分布规律,找到高危时间段和高危地理朝向。

1 材料与方法

1.1 监测设备

1.1.1 暴露模型 本研究使用自制的旋转式眼部紫外辐射暴露模型,从上至下由人体头部模型(见图1A)、支架及转盘三部分组成,整体高度约1.70 m(见图1B)。人体模型眼部中心距地面高度约1.6 m,两眼中心水平距离约6 cm,眉弓最高点距瞳孔表面中心位置水平距离约0.6 cm。这种监测方式代表的不是一个个体、一个年龄段或一种职业的暴露状态,而是人群的标准暴露状态。



[注] A : 人体模型头部 ; B : 人体模型整体。

[Note] A : Human model head ; B : Human body model.

图1 旋转式眼部紫外辐射暴露人体模型

Figure 1 Rotating manikin for ocular ultraviolet irradiance exposure

1.1.2 监测仪器 AvaSpec-2048 × 14-2-USB2型光纤光谱仪(AVANTES B.V.公司,荷兰)。该仪器为具有高量子效率和高紫外灵敏度的薄型背照式Charge Coupled Device(CCD)光谱仪。它基于AvaBench-75光学平台,采用对称式Czerny-Turner光路设计,2048 × 14个像素的高紫外灵敏度CCD面阵探测器,尤其适合较弱辐照度和高分辨率方面的应用监测。光谱仪的半波峰宽度为2.0 nm,杂散光小于0.1%,信噪比约为500 dB。光谱仪使用的衍射光栅的光栅线对数为1200线/mm,闪耀波长为250 nm,狭缝宽度为200 μm。该光谱仪配置16位AD转换卡和高速USB2.0接口,可以实现每秒

450幅光谱的超高速采样速率,每幅光谱图的传输速度为2.24 ms。本研究使用的光纤探头为余弦校正器(CC-UV/VIS),其有效直径为3.9 mm,采用特氟龙(聚四氟乙烯)漫射材料,对200~800 nm谱段优化,可接收180°视场角的光线。光纤光谱仪的一个探头置于模型右眼中心眼表面最前位置,用于进行眼部暴露紫外辐照度的监测。眼部探头的视线低于水平面约10°,眼视角(field of the view, FOV)约139°(上视角约58°,下视角约81°)。光纤光谱仪另一探头位于模型头顶水平位置,用于进行水平环境紫外辐照度的监测。

1.1.3 监测仪器校对 本研究进行的是绝对紫外辐照度的测量,光谱仪需要进行辐射定标。仪器定标由英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL GB)完成,光谱范围为200~400 nm。

1.2 监测方法

1.2.1 监测地点 本实验的监测地点为海南省三亚市海棠湾镇(18.4°N, 109.7°E, 海拔约18 m)。监测地点为五层楼楼顶,楼顶为铺有沥青的水泥地面,视线范围内无遮挡。

1.2.2 监测条件 (1)监测时间:三亚市位于北回归线(23.5°N)以南,其在一年中有两次直射分别出现在5月和7月,5月当地雨水较多,所以本实验选择在7月份进行监测,以获取较全的太阳天顶角范围的紫外辐射数据,本文所用数据监测日期是2010年7月11日。(2)监测天气条件:首选晴朗天气,天空中尽量无云或少云为条件,远方地平线附近的少量云可忽略不计。一天的监测中云少时进行,云多有遮挡暂停监测,待云量减少后进行。本文所用数据监测日当天为晴天。

1.2.3 监测方法 监测开始前将模型转速设定为360°/min且匀速顺时针旋转,相当于6°/s。光纤光谱仪监测模式调整为每隔1秒收集一次数据,且每次监测时长1 min,确保每次监测模型正好旋转1周,并收集到眼和环境各60组不同波长的光谱数据[单位: $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$],代表60个不同地理朝向。在监测时,每次监测人体模型都是以模型眼部正对南方向作为起始位置,并顺时针旋转进行监测。两次监测时间间隔5 min。

1.3 数据处理

1.3.1 数据收集 监测日全天天气晴朗,监测时间为北京时间(Central Standard Time, CST)7:00到18:42,太阳天顶角(solar zenith angle, SZA)覆盖范围为5°~83°。

监测当天空气污染指数为22,总臭氧为276 DU。

1.3.2 数据处理及计算 本实验监测获得的数据由光纤光谱仪自带的“AvaSoft 7.6 for USB2.0”软件处理为Microsoft Excel格式,此时是眼部暴露和环境监测分开表示的数据,本阶段的光谱数据不是间隔1 nm的整波长数据。需要使用OriginPro 8.0数据处理软件计算整波长的光谱数据。在整波长的光谱数据基础上应用OriginPro 8.0软件对300~320 nm和320~400 nm波长紫外辐射积分求得UVB和UVA段紫外辐照度数据。

1.3.3 紫外辐射剂量计算 紫外辐射暴露剂量计算公式如下:剂量= $\int ET$,式中, E 代表监测获得的眼紫外光谱辐照度值, T 代表眼暴露紫外辐射的辐照时间。本研究监测时间从8:00 CST(~75°太阳天顶角)到18:42 CST(~83°太阳天顶角)。全天监测到的太阳天顶角范围从~5°到~83°。

2 结果

2.1 不同朝向眼部暴露紫外辐照度随时间的分布

本研究选择东、南、西、北4个朝向作为代表朝向描述其随时间分布情况。由图2可以看出,在11:00—14:00时间段,4个代表朝向上眼暴露UVA段紫外辐照度几乎相同,且变化很小,本文称之为平台期;在11:00之前东向紫外辐照度高于辐照度值几乎相同的另外3个朝向,且东向在9:00左右达到最大值,约为 $2324.88 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,是同时间点其他3个朝向辐照度均值的3.5倍左右,是平台期均值的2.4倍左右;在14:00之后西向紫外辐照度高于辐照度值几乎相同的另外3个朝向,且西向在16:15左右达到最大值,约为 $2442.68 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,是同时间点其他3个朝向辐照度均值的3.3倍左右,是平台期均值的2.5倍左右。南向和北向眼暴露UVA段紫外辐照度随时间分布呈现正午高早晚低的单峰分布,峰值出现在12:00左右且几乎相同,约为 $1056.09 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

由图3可以看出,在11:00到14:00,4个代表朝向上眼暴露UVB段紫外辐照度几乎相同,且变化很小,本文称之为平台期;在11:00之前东向紫外辐照度高于辐照度值几乎相同的另外3个朝向,且东向在9:45左右达到最大值,约为 $93.83 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,是同时间点其他3个朝向辐照度均值的2.3倍左右,是平台期均值的1.6倍左右;在14:00之后西向紫外辐照度高于辐照度值几乎相同的另外3个朝向,且西向在15:50左右达到最大值,约为 $92.54 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,是同时间点其他

3个朝向辐照度均值的2.3倍左右,是平台期均值的1.6倍左右。南向和北向眼暴露UVB段紫外辐照度随时间分布呈现正午高早晚低的单峰分布,峰值出现在12:00左右且几乎相同,约为61.45 μW/cm²。

2.2 眼部暴露紫外辐照度随太阳天顶角分布

4个代表朝向上眼暴露UVA和UVB段紫外辐照度随太阳天顶角分布见图4,东向在上午25°~85°太阳天顶角有一个峰,西向在下午25°~85°太阳天顶角

有一个峰,且东西向峰值基本重合。UVA和UVB段峰值分别对应约50°和40°太阳天顶角,对其进行拟合均符合2次函数分布。南向和北向全天以及东向排除上午25°~85°太阳天顶角,西向排除下午25°~85°太阳天顶角对应紫外辐照度分布,所有朝向紫外辐照度值基本重合,呈现随太阳天顶角变大而降低的分布,对其进行拟合符合二次函数分布,拟合方程和拟合系数见表1。

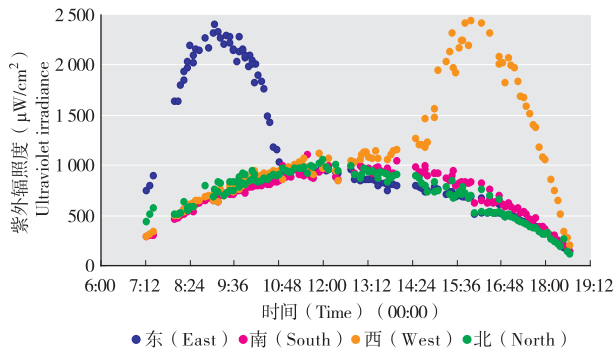


图2 眼部暴露UVA的紫外辐照度随朝向和时间的分布
Figure 2 Diurnal and directional variations of ocular UVA irradiance exposure

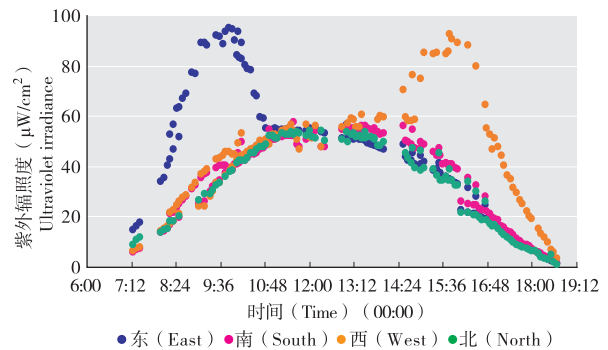
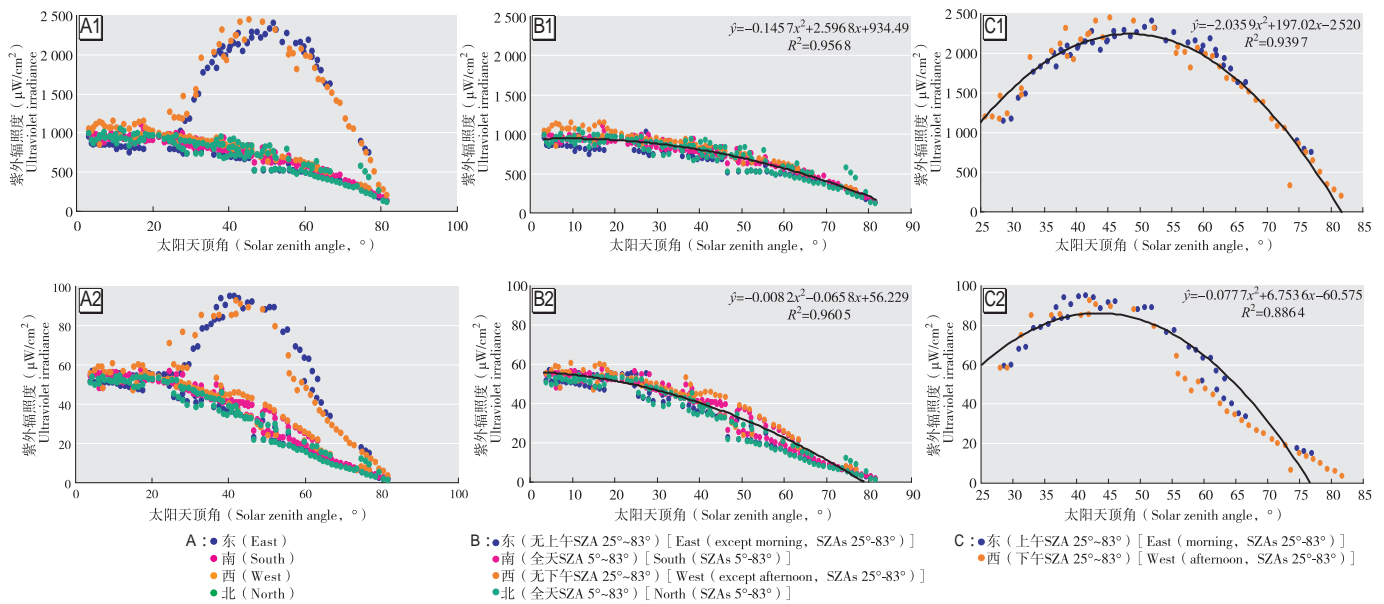


图3 眼部暴露UVB的紫外辐照度随朝向和时间的分布
Figure 3 Diurnal and directional variations of ocular UVB irradiance exposure



[注] 1: UVA; 2: UVB. [Note] 1: UVA; 2: UVB.

图4 眼部在不同朝向时紫外辐照度随太阳天顶角分布及拟合曲线

Figure 4 Ocular irradiance exposure at different SZAs and fitted regression curves

表1 UVA和UVB段紫外辐照度随太阳天顶角(SZA)变化的拟合方程和拟合系数

Table 1 Fitted equations and coefficients of ocular exposure to UVA and UVB irradiance at different solar zenith angles

波段(Wavelength)	拟合方程(Fitted equation)	拟合系数(R ²)	朝向和SZAs范围(Geographic direction and solar zenith angle)
UVA	$y = -0.1457x^2 + 2.5968x + 934.49$	0.9568	东(无上午SZA 25°~83°) [East(Except morning, solar zenith angle 25°~83°)], 南(全天SZA 5°~83°) [South(Solar zenith angle 5°~83°)], 西(无下午SZA 25°~83°) [West(Except afternoon, solar zenith angle 25°~83°)], 北(全天SZA 5°~83°) [North(Solar zenith angle 5°~83°)]
UVB	$y = -0.0082x^2 - 0.0658x + 56.229$	0.9605	
UVA	$y = -2.0359x^2 + 197.02x - 2520$	0.9397	东(上午SZA 25°~83°) [East(Morning, solar zenith angle 25°~83°)], 西(下午SZA 25°~83°) [West(Afternoon, solar zenith angle 25°~83°)]
UVB	$y = -0.0777x^2 + 6.7536x - 60.575$	0.8864	

2.3 眼部暴露紫外辐照度在圆周地理朝向的分布

图5展示的是水平环境UVA和UVB段紫外辐照度在圆周地理朝向上的分布。环境紫外辐照度在圆周上的分布呈现接近正圆的分布,水平环境紫外辐照度不受地理朝向的影响。所有监测日紫外辐照度最大值均出现在正午12:00(CST)左右。

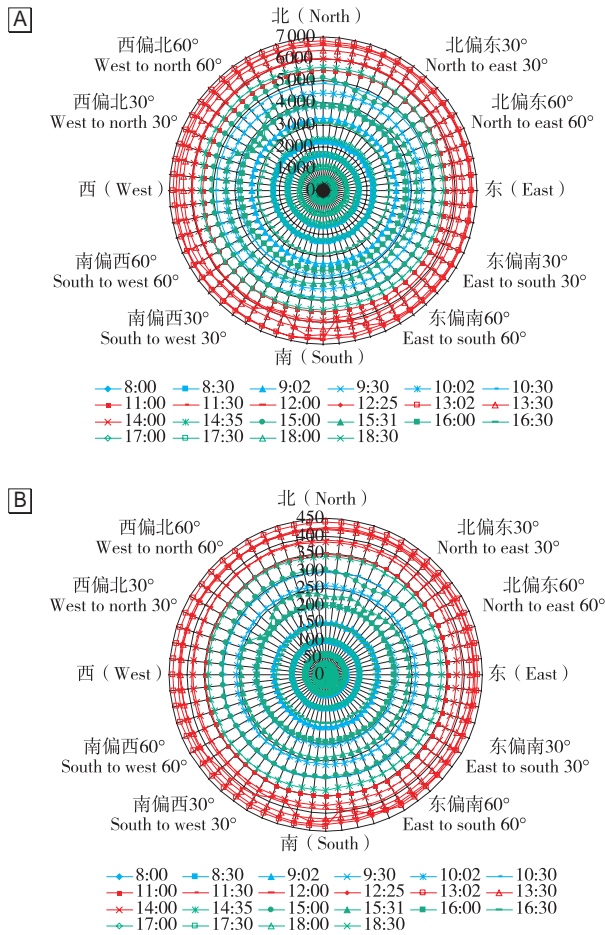
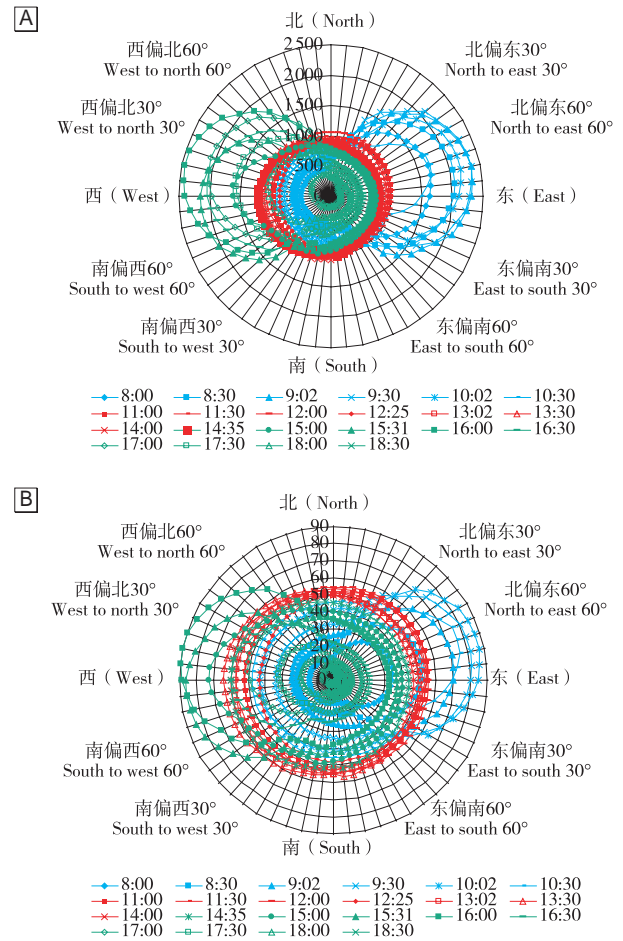


图5 水平环境UVA(A)和UVB(B)圆周地理朝向分布
Figure 5 Ambient UVA(A) and UVB(B) irradiance at different geographic directions

眼部暴露紫外辐照度在圆周地理朝向上的分布与水平环境分布不同。图6中数据时间选择是从监测开始到监测结束,每间隔0.5h作为代表时间。一周内眼暴露UVA和UVB段紫外辐照度分布均呈现以南北向为轴的轴对称分布。眼部暴露UVA和UVB最大辐照度在地理朝向上的分布是正东偏北和正西偏北12°

左右,分别对应10:00CST和16:00CST。



[注]蓝色:11:00以前;红色:11:00—14:00;绿色:14:00以后。雷达图每0.5h间隔所取数据。
[Note] Blue: before 11:00; red: 11:00-14:00; green: after 14:00. Data are recorded with a half-hour interval.

图6 眼部暴露UVA(A)和UVB(B)段紫外辐照度在圆周地理朝向分布
Figure 6 Distribution of ocular exposure to UVA(A) and UVB(B) irradiance at different geographic directions

2.4 辐照剂量百分比分布

由表2可见,东向最大百分比出现在9:00—10:00时间段,约为19.67%,9:00—10:00之前和之后时间段百分比呈逐渐降低的趋势;西向最大百分比出现在15:00—16:00时间段,约为17.11%,15:00—16:00之前和之后时间段百分比呈逐渐降低的趋势;南向和北向最大百分比均出现在12:00—13:00时间段,分别约为12.68%和12.98%,12:00—13:00之前和之后时间段百分比呈逐渐降低的趋势。南向和北向最大百分比明显低于东向和西向最大百分比。

表2 不同朝向每1h的辐射剂量占全天剂量百分比(%)
Table 2 Percentage of 1-hour over all-day cumulated irradiance at different geographic directions

北京时间(Period)	东(East)	南(South)	西(West)	北(North)
8:00—9:02	18.94	7.19	4.86	8.07
9:02—10:02	19.67	9.08	6.04	9.94
10:02—11:00	13.52	10.31	7.29	11.29
11:00—12:00	8.95	12.34	8.34	12.92
12:00—13:02	8.81	12.68	8.38	12.98
13:02—14:00	7.54	11.84	9.16	11.86
14:00—15:00	7.28	11.36	10.04	11.15
15:00—16:00	6.63	10.99	17.11	9.57
16:00—17:00	4.84	8.06	16.08	6.96
17:00—18:00	3.82	6.16	12.7	5.25

3 讨论

本研究使用旋转式紫外辐射暴露模型对中国三亚(18.4°N)地区眼部暴露紫外辐照度进行监测,以获取较全的太阳天顶角范围的紫外辐照度数据,研究不同时间点以及不同朝向对眼暴露的影响,确定高危时间和高危朝向。本文研究结果显示,4个代表朝向眼暴露UVA和UVB段紫外辐照度的日间分布规律中,眼暴露UVA以及UVB段紫外辐照度在11:00CST到14:00CST几乎相同,变化很小,处于平台期,且低于上下午峰值,这可能是因为在正午11:00CST—14:00CST太阳天顶角较小。受模型眼视角的影响,在太阳天顶角较大的上午和下午眼部接收的紫外辐射有直射、散射和地面反射;而正午太阳天顶角较小时,眼部接收到的紫外辐射只有散射和地面反射,会导致暴露量的减少。在眼暴露UVA和UVB段紫外辐照度随太阳天顶角变化结果显示,东向上午和西向下午眼暴露UVA和UVB段辐照度最大值分别出现在太阳天顶角50°和40°左右,并不是常识认为的正午太阳天顶角最小时辐照度最大,这是因为应用人体模型模拟眼部紫外暴露情况,模型的额部、鼻部及眼睑结构均对测量结果产生影响;UVA和UVB段辐照度最大值出现的太阳天顶角不同也可能是由于在空气中气溶胶、颗粒物、粉尘等对UVA和UVB段紫外辐射的散射率和地面对UVA和UVB段紫外辐射的反射率不同所致^[22]。

眼部暴露紫外辐射在上午和下午的高辐照度值分别接近正东、正西偏北12°左右。这种现象是由三亚地理位置决定的。三亚位于北纬18.4°,在北回归线和赤道之间,一年会有两次直射,本研究的监测日太阳运行到北纬22°左右,在三亚的北面,所以导致

监测日最大辐照度对应朝向角度偏北向。这一结果是对公众认为南向是最危险朝向的一个挑战。按我们的旋转式眼暴露模型的基本假设,即人们暴露于360度各朝向概率相等,但上下班多数都是在早晚出行,假设一个人以早东晚西的朝向上下班出行,另一个人则以早西晚东的朝向出行,早(8:00—9:00)晚(17:00—18:00)各1h暴露,最高暴露和最低暴露的差异可以达到4倍左右。

世界卫生组织在2003年提倡在正午前后4h应尽量避免外出^[23]。本研究发现对于夏季危险时间段东向出现在上午的9:00—10:00CST,西向出现在下午的15:00—16:00CST。南和北向均出现在12:00—13:00CST。因此,不应该仅在正午期间采取对眼紫外暴露的防护,也应该考虑在上午和下午环境辐射较低时采取防护措施。

实际监测中很难在太阳直射当天遇到晴好天气,这对于完整观察太阳天顶角的范围有一定的偏差;另外,本研究结果是基于均匀旋转速度的模型,它是一个面向各个朝向的眼暴露紫外辐射的平均分布状态。其模型眼视角是固定的,是一种模型的基本状态,若在眼视角不同的情况下其结果会根据光线与眼视角几何关系的改变而改变。虽然本研究所采集的只有一天的监测数据,但是其是在晴好天气条件下进行监测,反映的是眼部紫外辐射最大暴露的情况,最大限度地降低了其他气象条件对紫外辐射数据的影响。因此,本研究在防止眼部紫外辐射过度暴露方面,指导公众正确认知眼部紫外辐射暴露在地理朝向上的危险时段,有效避免紫外辐射所致眼部损伤方面有积极的指导意义。

参考文献

- [1] Young RW. The family of sunlight-related eye diseases [J]. *Optom Vis Sci*, 1994, 71(2): 125-144.
- [2] 杨明建, 郑燕, 申海玉, 等. 中波紫外线致雄性小鼠生殖系统损伤 [J]. *环境与职业医学*, 2012, 29(6): 347-350.
- [3] 张秀珍, 陈中华, 巨荣菊, 等. 姜黄素对紫外线致NIH3T3细胞损伤的保护作用 [J]. *环境与职业医学*, 2009, 26(3): 267-270.
- [4] Sliney D H. Geometrical assessment of ocular exposure to environmental UV radiation-implications for ophthalmic epidemiology [J]. *J Epidemiol*, 1999, 9(6 Suppl): S22-S32.
- [5] 刘扬, 孙炜. 紫外线致白内障的流行病学研究现状 [J]. 中

- 国公共卫生, 2002, 18(1): 109-110.
- [6]Oriowo OM, Cullen AP, Chou BR, et al. Action spectrum and recovery for in vitro UV-induced cataract using whole lenses [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2001, 42(11): 2596-2602.
- [7]夏旭霞, 刘扬. 环境紫外线辐射与老年性白内障[J]. 中国公共卫生, 2012, 28(7): 992-994.
- [8]Birt B, Cowling I, Coyne S. UVR reflections at the surface of the eye[J]. J Photochem Photobiol B : Biol, 2004, 77(1-3): 71-77.
- [9]Birt B, Cowling I, Coyne S, et al. The effect of the eye's surface topography on the total irradiance of ultraviolet radiation on the inner canthus[J]. J Photochem Photobiol B : Biol, 2007, 87(1): 27-36.
- [10]Matthews YJ, Halliday GM, Phan TA, et al. Wavelength dependency for UVA-induced suppression of recall immunity in humans[J]. J Dermatol Sci, 2010, 59(3): 192-197.
- [11]Javitt JC, Taylor HR. Cataract and latitude[J]. Doc Ophthalmol, 1995, 88(3/4): 307-325.
- [12]Hoepe P, Oppenrieder A, Erianto C, et al. Visualization of UV exposure of the human body based on data from a scanning UV measuring system[J]. Int J Biometeorol, 2004, 49(1): 18-25.
- [13]Schouten P, Parisi AV. Direct comparison between the angular distributions of the erythematous and eye-damaging UV irradiances : A pilot study[J]. J Photochem Photobiol B : Biol, 2010, 102(2): 146-155.
- [14]Ono M. Studies on ultraviolet radiation and health effects : ocular exposure to ultraviolet radiation[J]. Dev Ophthalmol, 2002, 35 : 32-39.
- [15]胡立文, 高倩, 高娜, 等. 雪环境中人体模型不同解剖部位的紫外线暴露剂量[J]. 环境与职业医学, 2013, 30(1): 1-4.
- [16]胡立文, 高倩, 徐文英, 等. 皮肤紫外线暴露剂量旋转人体模型方法测量[J]. 中国公共卫生, 2012, 28(9): 1207-1209.
- [17]Slaney DH. UV radiation ocular exposure dosimetry[J]. J Photochem Photobiol B : Biol, 1995, 31(1/2): 69-77.
- [18]Parisi AV, Kimlin MG, Lester R, et al. Lower body anatomical distribution of solar ultraviolet radiation on the human form in standing and sitting postures[J]. J Photochem Photobiol B : Biol, 2003, 69(1): 1-6.
- [19]Kimlin MG, Parisi AV, Wong JCF. The facial distribution of erythematous ultraviolet exposure in south-east Queensland[J]. Phys Med Biol, 1998, 43(2): 231-240.
- [20]Gao N, Hu LW, Gao Q, et al. Diurnal variation of ocular exposure to solar ultraviolet radiation based on data from a manikin head[J]. Photochem Photobiol, 2012, 88(3): 736-743.
- [21]Hu LW, Gao Q, Xu WY, et al. Diurnal variations in solar ultraviolet radiation at typical anatomical sites[J]. Biomed Environ Sci, 2010, 23(3): 234-243.
- [22]Tanskanen A, Manninen T. Effective UV surface albedo of seasonally snow-covered lands[J]. Atmos Chem Phys, 2007, 7(10): 2759-2764.
- [23]World Health Organization. Sun protection and schools : How to make a difference[R]. Geneva : WHO, 2003.

(收稿日期 : 2016-10-13 ; 录用日期 : 2016-11-16)

(英文编辑 : 汪源 ; 编辑 : 洪琪 ; 校对 : 丁瑾瑜)