

基于光气候区的日照时数特征及变化规律

杨春宇^{1,2}, 汪统岳^{1,2}, 陈 霆^{1,2}, 马俊涛^{1,2}

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 利用 1988—2012 年中国 34 个主要城市的日照时数值, 从光气候分区的视角, 采用线性拟合和累积距平的分析方法, 对我国 I~V 类光气候区近 25 年的日照时数总量年变化和季节变化特征进行研究. 结果表明: 各类光气候区年总日照时数层次分布明显, II 类至 V 类光气候区日照时数呈逐渐减少趋势, 只有 I 类光气候区日照时数呈上升趋势. 各类光气候区四季日照时数分布大体与年总量相似, 各季节分布略有不同, 但气候区四季日照时数的变化速率则各不相同. 该研究为我国各类光气候区的日照时数特征及变化规律提供了一种新的理论研究方法, 也为我国建筑采光照明及节能提供了科学的基础数据.

关键词: 光气候区; 日照时数; 线性拟合; 变化趋势; 变化速率
中图分类号: TU113.5⁺1 **文献标志码:** A

Variation Characteristics of the Sunshine Duration in All Chinese Light Climate Zones

YANG Chunyu^{1,2}, WANG Tongyue^{1,2}, CHEN Ting^{1,2}, MA Juntao^{1,2}

(1. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Using the data of sunshine duration over Chinese 34 main cities from 1988 to 2012, the authors studied the changes in annual and seasonal trends of the sunshine duration by liner trend analysis and accumulative anomalies, from the angle of light climate division. It is found that the annual sunshine duration distributes obviously at different levels and reduces from the 2nd to the 5th light climate zone, except the 1st light climate zone. The characteristics of seasonal sunshine duration are similar with that in the whole year, but the increasing or decreasing amplitude is different between 5 light climate zones. This research provides a new theoretical method to understand the changes of light climate in our

country and there will be of great significance to guide the architectural lighting design and energy conservation in corresponding areas.

Key words: light climate zones; sunshine duration; linear fitting; changing trend; changing rate

日照是气候要素的重要组成部分, 是太阳辐射的直接表现, 也是其他气象要素(温度、风速和降水等)的能量来源^[1]. 我国地域广阔, 各地日照值差异较大^[2], 根据室外天然光年平均总照度值将其划分为 I-V 类光气候区^[3], 不同光气候区对应着不同的日照时数^[4]. 日照时数与人类生产活动及动植物的生长发育密切相关, 直接影响城市规划建设^[5]、建筑室内光环境以及照明能耗, 也影响着人的身体健康和工作效率^[6]. 日照时数指太阳在某地直接辐照度达到或超过 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的时间总和(以 h 为单位)^[7], 是反映太阳辐射时间长短的气候指标, 直接影响到地面所获得辐射能量的多少, 进而影响到其他气象要素. 由于日照时数跟辐射量之间良好的相关关系^[8], 其变化特征的研究对了解全球气候变化背景下太阳辐射的变化规律具有重要意义. 在全球气候变暖^[9]和部分地区空气污染加重^[10]的背景下, 近年来全球太阳辐射发生了明显的变化^[11]. 研究表明, 我国各地近年来日照总量虽略有波动, 但整体呈现下降趋势^[12], 各个地区减少速率不同, 各季节变化也有所差异^[13]. 现有研究大多是对特定城市(如拉萨、成都、银川)、省份(如上海、北京、陕西、重庆、云南、海南)或地区(如东北地区、西北地区、青藏高原、黄河流域、黑河流域、塔里木盆地)的日照时数变化特征进行分析^[14-16], 缺乏从我国光气候分区的方面进行研究, 使得建筑物内部采光、照明设计长期缺乏针对性的理论数据. 我国建筑采光设计标准^[2]

收稿日期: 2016-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51478060)

第一作者: 杨春宇(1953—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑技术科学(建筑光环境). E-mail: ycu11@163.com

通讯作者: 汪统岳(1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为建筑技术科学(建筑光环境). E-mail: wouoptics@163.com

(GB 50033—2013)中有关采光节能计算部分仅给出了典型城市(如拉萨、呼和浩特、北京、上海和重庆)的天然光利用时数,且均为年总量日照时数,缺乏季节性数据.多数地区夏季与冬季日照时数差异较大,冬季可利用日照时数相对较少,夏季日照时数虽长,但并不一定都在建筑有效使用时间段内,且同类光气候区不同城市之间也存在较大的差异.本文从光气候区的视角,将年平均总照度值相似的城市汇总分析,根据 1988—2012 年全国主要城市的日照时数统计,将我国 34 个主要城市按光气候分区分别对应到五大光气候区中,求出各类光气候区内城市样本的日照数据算术平均值作为该气候区的日照代表值,采用线性拟合和累积距平的分析方法,在日照时数年总量的基础上,研究各类光气候区的日照时数季节性分布特征和变化规律,可为建筑采光照明及节能提供更准确的基础数据.本研究为我国各类光气候区的日照时数特征及其变化规律提供了一种新的理论研究方法,其研究结果为我国不同光气候区的建筑采光、照明设计及建筑节能等提供了科学的基础数据.

1 研究方法

1.1 数据获取与区域划分

本文数据源于《中国气象年鉴》^[17] 1988—2012 年全国主要城市各月日照时数统计资料,所有数据通过检查和控制,质量良好,个别错误数据进行了插补修正.根据我国最新的《建筑采光设计标准》^[2],将气象年鉴中的 34 个主要城市按照我国光气候分区图分别对应到五大光气候区中,绘制出全国主要城市各类光气候区定位图(图 1). I 类光气候区选取拉萨(1 号)为样本城市, II 类光气候区选取呼和浩特(2 号)、昆明(3 号)、银川(4 号)、西宁(5 号)共 4 个样本城市, III 类光气候区选取北京(6 号)、天津(7 号)、太原(8 号)、沈阳(9 号)、大连(10 号)、郑州(11 号)、西安(12 号)、兰州(13 号)、乌鲁木齐(14 号)、海口(15 号)共 10 个样本城市, IV 类光气候区选取石家庄(16 号)、长春(17 号)、哈尔滨(18 号)、上海(19 号)、南京(20 号)、杭州(21 号)、合肥(22 号)、福州(23 号)、南昌(24 号)、济南(25 号)、青岛(26 号)、武汉(27 号)、长沙(28 号)、广州(29 号)、南宁(30 号)、桂林(31 号)共 16 个样本城市, V 类光气候区选取成都(32 号)、重庆(33 号)、贵阳(34 号)共 3 个样本城市.

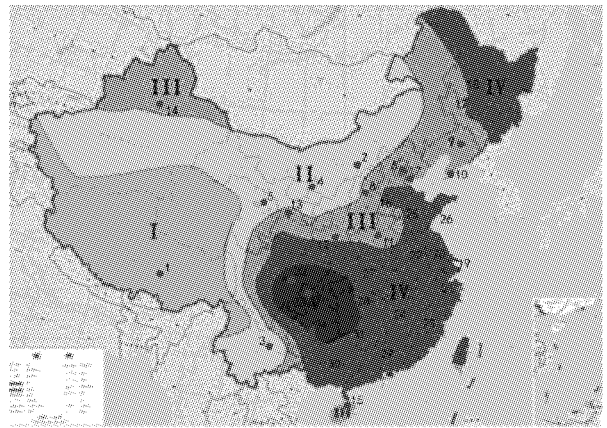


图 1 中国主要城市各类光气候区定位图

Fig.1 Location map for major cities from all kinds of Chinese light climate zones

1.2 分析方法

日照时数的变化规律采用气候倾向率表示,具体为日照时数随年份变化的线性倾向率,可清晰地表达分析对象的总体变化趋势,但不能反映阶段性变化.累计距平曲线可以直观地看出分析对象各阶段的变化趋势、特点和转折点等.本研究采用两种方法,更便于找出我国不同光气候区日照时数特征及其变化规律.

1.2.1 气候倾向率

将日照时数、温度、降水等气候要素的变化趋势用一次线性方程定量描述^[16],即

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (1)$$

式中: Y 为气象要素的拟合值; X 代表年份;把 $a_1 \cdot 10$ 称为气候倾向率,表示气候要素每 10 年的变化速率;为确定 a_0 和 a_1 ,利用“最小二乘法原理”,将实测值 Y_i 与利用计算值 Y_j ($Y_j = a_0 + a_1 X$) 的离差 ($Y_i - Y_j$) 的平方和最小作为“优化判据”;利用 Origin 软件对日照时数和年份序列的散点图进行线性拟合,且拟合值均通过了置信度 95% 的显著性检验,绘制出日照时间关于年份变化的趋势线(图 2).

1.2.2 累计距平

先求出气候要素值与多年平均值的偏差,然后逐年累加,得到累计距平序列^[18],即

$$X_j = \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x}), j \leq n \quad (2)$$

式中: X_j 为气象要素的累计距平值; j 为年份; n 为序列长度; x_i 为特定年份的气候要素值; \bar{x} 为气候要素的多年平均值;将 34 个全国主要城市按照光气候区分类,求出各类光气候区内城市样本的日照数据算术平均值作为该气候区本年度的日照时数代表值,再算出多年来各类光气候区年日照时数代表值

的平均值,然后分别将年日照时数代表值与对应气候区的平均值的差值逐年累加,得出累积距平序列,最后绘制出各类光气候区逐年日照时数累计距平曲线(图 3)。

2 研究分析

2.1 我国各类光气候区年日照时数的变化规律和特征分析

近 25 年来各类光气候区年日照时数略有波动,但层次分布明显,呈缓慢变化趋势。I 类光气候区年日照时数总量最多,一般是 3 000 h 左右;其次是 II 类光气候区,年日照时数稳定在 2 500 h; III 类光气候区与 II 类光气候区整体差距不大,日照时数在 2 250 h 左右波动; IV 类光气候区年日照时数稳定在 1 900 h; V 类光气候区年日照时数最少,仅有约 950 h;整体而言, I ~ IV 类光气候区之间日照时数梯级变化明显,其中 II、III 类光气候区日照时数较贴近, V 类光气候区与其他光气候区相比差距很大(图 2)。

根据绘制出的各类光气候区逐年日照时数累计距平曲线图(图 3), I 类光气候区近年来距平值一直为负,日照时数急剧上升且增长速率达到了 $78.86 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$, 1988—1997 年累积距平值基本稳定为 0,日照时数变化不大,1997 年后累积距平值急剧下降,至 2004 年达到谷底,之后又迅速上升,说明年日照时数在 1997 年后经历了骤降后又急剧上升的

变化,具体原因还有待分析;其余各类光气候区的日照时数整体呈下降趋势,尤其是 IV 类光气候区下降速率最快,达到了 $58.55 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ 。II、III 类光气候区年日照时数变化趋势相似,分别自 2007 年、2003 年开始由正距平转变为负距平,整体呈现缓慢减少趋势,近几年来略有反弹,日照变化率分别为 -27.94 、 $-14.91 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$; IV、V 类光气候区累计距平值一直为正,日照变化率分别为 -58.55 、 $-49.33 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$,明显呈现减少趋势。日照时数的变化是云量、大气污染物、水汽等因素综合作用的结果,与温度、风速、降水量密切相关^[13]。有研究表明:人口稠密、生产活动频繁的东部地区,大气污染严重、气溶胶浓度增加是导致日照下降的主要原因;南部地区在气候湿润化的大背景下,低云和水汽的增加则是主导因素^[5]。这些因素在不同地区的各阶段,甚至是不同的季节,对日照下降的影响能力也不尽相同。特别是随着城市空气污染、雾霾严重等因素,对日照时数和照度值的影响是不可忽视的,但由于情况复杂,其变化原因还有待深入分析。

2.2 我国各类光气候区四季日照时数的变化规律和特征分析

2.2.1 我国各类光气候区四季日照时数特征分析

通过对各类光气候区 25 年来各季节的日照时数统计,取其平均值绘制成各类光气候区四季平均日照时数统计图(图 4)。各类光气候区四季的日照平

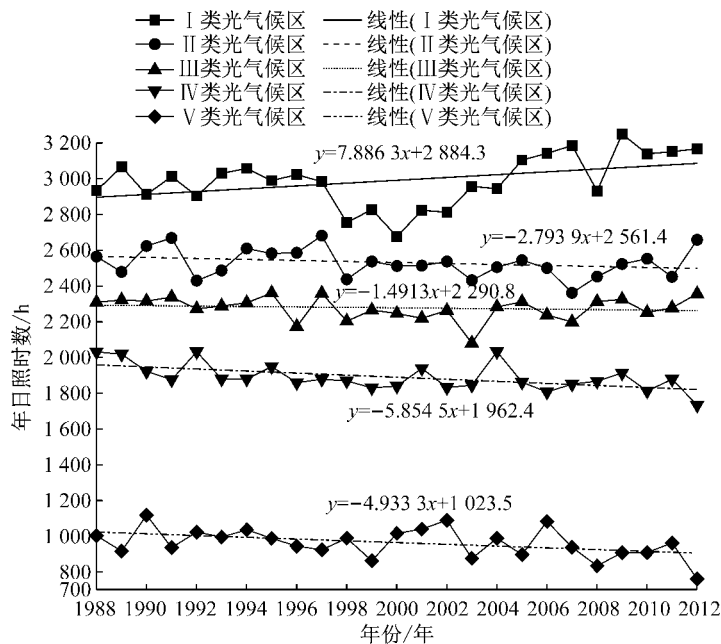


图 2 各类光气候区年日照时数变化趋势图

Fig.2 Tendency chart for annual sunshine time of all kinds of Chinese light climate zones

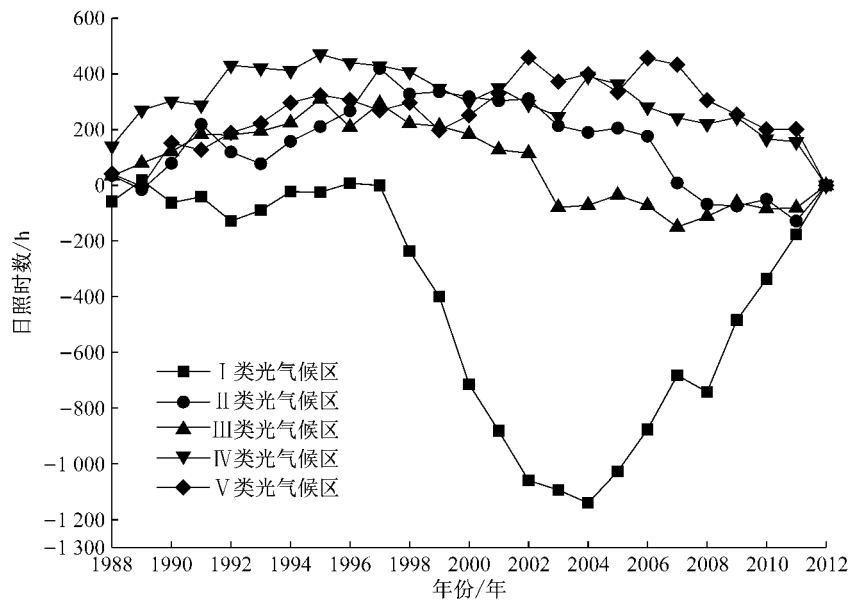


图 3 各类光气候区逐年日照时数累计距平曲线图

Fig.3 Accumulative anomaly curve for annual sunshine time of all kinds of Chinese light climate zones

均时数分布特征与年总量相似,结构层次明显,各个季节之间的差距有所不同. I类光气候区四季日照均匀,相差不大,春秋两季最高,冬季次之,夏季日照时数最少; II类光气候区四季日照时数差距开始扩大,春季日照时数最高,夏季次之,秋冬季节最少; III类光气候区四季日照时数差距更大,春夏季日照时

数最高,秋季次之,冬季最少; IV类光气候区四季日照时数差距也较大,其中夏季日照时数最高,春秋季节次之,冬季最少; V类光气候区日照时数四季悬差最大,夏季最高,春季次之,秋季更少,冬季最少,四季日照时数呈现梯级减少趋势. 各类光气候区四季日照时数变化率统计图见图 5.

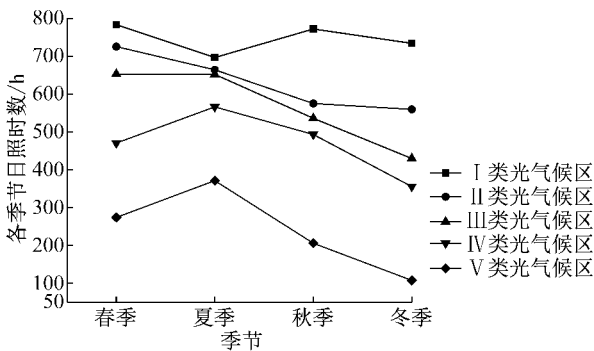


图 4 各类光气候区四季平均日照时数统计图

Fig.4 Cartogram for average sunshine time at all seasons of all kinds of Chinese light climate zones

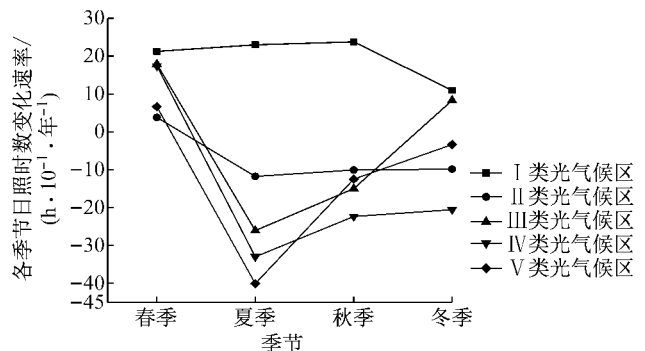


图 5 各类光气候区四季日照时数变化率统计图

Fig.5 Cartogram for gradient of average sunshine time at all seasons of all kinds of Chinese light climate zones

尽管各类光气候区的四季平均日照时数分布特征与年总量相似,但各季节的日照情况存在一定的差异. 春季,各光气候区日照时数折线图层次分布明显,由 I类到 V类光气候区逐渐减少,其中 I、II、III类光气候区日照时数折线图相对贴近,个别年份有所交叉,IV、V类光气候区相差较大(图 6). 夏季,各光气候区日照时数折线图层次相对混乱,尤其是 I类光气候区日照时数波动较大,个别年份低于 IV类

光气候区,2003 年以前普遍低于 II、III类光气候区,2003 年以后迅速回升,一直保持最高的状态; II、III类光气候区日照时数虽略有波动,但一直很贴近; IV类光气候区日照时数较 V类光气候区高出一大截,结构层次分布明显(图 7). 秋季,各光气候区日照时数折线图也相对混乱,但与夏季层次有所不同; I类光气候区日照时数远高出其他光气候区,相反 V类光气候区日照时数远低于其他光气候区, I类、V类

光气候区之间的 II、III、IV 类光气候区日照时数曲线比较贴近, II 类光气候区日照时数保持在较高状态, III 类光气候区次之,除了个别年份低于 IV 类光气候区,普遍高于 IV 类光气候区(图 8)。冬季,各光气候区

日照时数折线图分布层次最明显,虽有所波动,但是从 I 类到 V 类光气候区逐渐减少,成为对应光气候区四季日照时数最少的季节(图 9)。

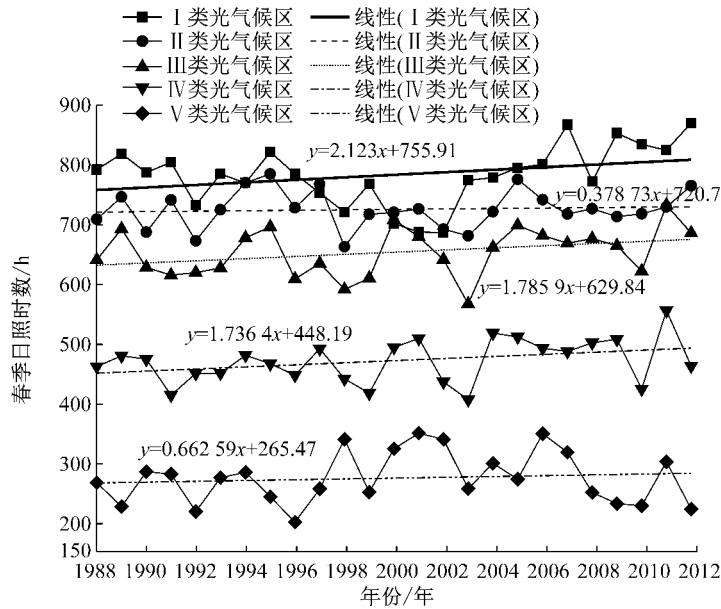


图 6 各类光气候区春季日照时数统计图

Fig.6 Cartogram for average sunshine time in spring of all kinds of Chinese light climate zones

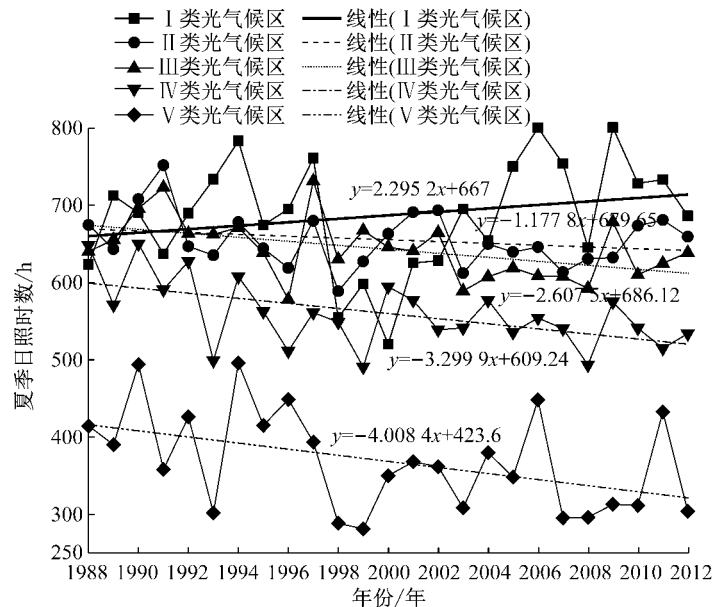


图 7 各类光气候区夏季日照时数统计图

Fig.7 Cartogram for average sunshine time in summer of all kinds of Chinese light climate zones

2.2.2 我国各类光气候区四季日照时数变化规律

通过对各光气候区 25 年来每月的日照时数统计分析,利用线性拟合的方法,得出各光气候区四季及每月的日照时数变化率,绘制成图 5 和表 1。从各类光气候区四季日照时数变化率统计图中可以看出, I 类光气候区四季的日照时数均有所上升,其中

秋季日照时数增长速率最快,对年日照时数的急剧增长贡献最大,冬季日照时数增长速率最低(图 5);具体而言,8、9 月份的日照时数增长速率最快,分别为 20.48、12.93 h · 10⁻¹ · 年⁻¹,只有 1 月、7 月、10 月份的日照时数呈现缓慢下降趋势(表 1)。II 类光气候区只有春季的日照时数略有增长,增长速率为

3.79 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 其余季节日照时数均呈现减少趋势, 下降速率分别为 -11.78、-10.08、-9.87 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 对年日照时数的减少起决定作用(图 5); 整体而言, 9、12 月份的下降速率最快, 分别为 -13.64、-8.09 h · 10⁻¹ · 年⁻¹(表 1). III 类光气候区年日照时数呈现缓慢下降趋势, 其中春季、冬季日照时数略有增长, 分别为 17.86、8.31 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 夏季日照时数减少最快, 下降速率为 -26.08 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 对年日照时数的减少起决定作用(图 5); 具体而言, 6~9 月份均呈现下降趋势, 3 月份的上升速率最快, 达到了 12.70 h · 10⁻¹ · 年⁻¹(表 1). IV、V 类光气候区各季节日照时数变化情况相

似, 只有春季日照时数呈现上升趋势, 增长速率分别为 17.36、6.63 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 其余季节均为下降趋势, 夏季的日照时数下降速率最快, 分别为 -32.99、-40.08 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 对年日照时数的减少趋势贡献最大(图 5); 具体而言, IV 类光气候区 6、7、10 月份的日照时数减少速率最快, 分别为 -15.35、-10.94、-9.74 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 仅 3、4、5 月份呈现增长趋势(表 1); V 类光气候区仅有 2、3、4 月份呈现增长趋势, 其中 3 月份上升速率最快为 10.09 h · 10⁻¹ · 年⁻¹, 其余月份均呈现下降趋势, 尤其是 6、7 月份日照时数下降速率较快, 达到了 -19.95、-12.20 h · 10⁻¹ · 年⁻¹(表 1).

表 1 我国各类光气候区每月日照时数变化速率

Tab.1 Cartogram for gradient of average sunshine time monthly of all kinds of Chinese light climate zones

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
I类光气候区	-0.53	9.10	9.52	7.77	3.95	4.44	-1.97	20.48	12.93	-1.80	12.60	2.37
II类光气候区	-4.65	2.88	4.04	2.47	-2.72	-4.07	-3.80	-3.90	-13.64	4.35	-0.79	-8.09
III类光气候区	2.29	-2.35	12.70	1.83	3.33	-6.97	-8.47	-10.64	-10.32	-5.37	0.69	8.37
IV类光气候区	-0.19	-2.01	8.80	5.43	3.14	-15.35	-10.94	-6.91	-3.81	-9.74	-8.81	-4.79
V类光气候区	-4.64	3.38	10.09	2.10	-5.56	-19.95	-12.20	-7.93	-1.77	-4.35	-6.38	-2.12

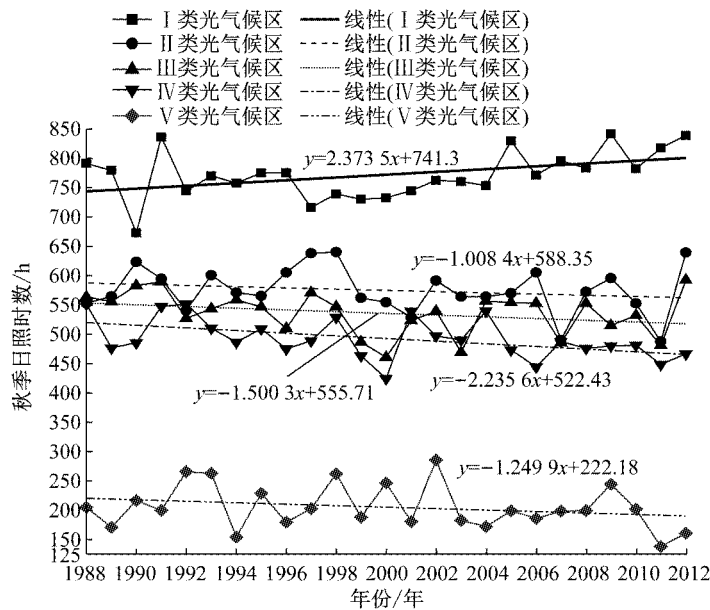


图 8 各类光气候区秋季日照时数统计图

Fig.8 Cartogram for average sunshine time in autumn of all kinds of Chinese light climate zones

同一季节各类光气候区之间的变化情况也有所不同(图 5). 春季各气候分区日照时数均呈现增长趋势, 只是上升速率各不相同; 夏季仅有 I 类光气候区日照时数增加, 其他光气候区均呈现减少趋势, 其中 V 类光气候区下降最快; 秋季与夏季相似, 仅有 I 类光气候区日照时数增加, 其他光气候区均呈现缓慢下降趋势, 且减少速率非常贴近; 冬季日照时数除 I、III 类光气候区保持稳定增长外, II、IV、V 类光气

候区日照时数均呈现减少趋势.

3 结论

从光气候区的角度对我国近年来日照时数的变化特征进行分析, 得出以下结论:

(1) 我国各类光气候区日照时数年总量层次分布明显, 从 I 类到 V 类光气候区逐渐减少, I 类年日

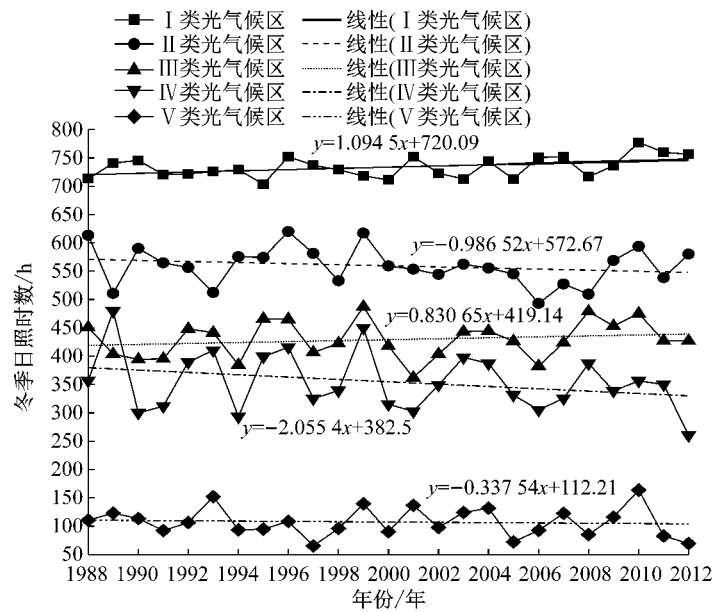


图9 各类光气候区冬季日照时数统计图

Fig.9 Cartogram for average sunshine time in winter of all kinds of Chinese light climate zones

照时数最多,达到了3 000 h; V类光气候区最少,仅有950 h左右。I类光气候区年日照时数急剧上升,增长速率达到了 $78.86 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$,其他光气候区呈现减少趋势,下降速率分别为 -27.94 、 -14.91 、 -58.55 、 $-49.33 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$,尤其是IV类光气候区下降最快。各类光气候区年日照时数的变化趋势各不相同,相应地区的建筑采光照明设计应考虑到太阳辐射的变化,有针对性地进行调整。

(2) 我国各类光气候区四季日照时数分布大体与年总日照时数相似。春季、冬季层次明显且保持相对稳定;夏季, I类光气候区日照时数波动较大,最多可达到870 h,个别年份仅为686 h,甚至少于III类光气候区,近年来一直高于其他光气候区, II、III类光气候区日照时数较接近;秋季, II、III、IV类光气候区日照时数很贴近, I类光气候区始终最多,保持在770 h左右, V类光气候区始终最少,保持在205 h左右。

(3) 我国各类光气候区四季的日照时数变化速率各不相同。I类光气候区四季均呈现上升趋势,秋季增长最快,达到了 $23.74 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$,冬季最慢,仅为 $10.95 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$; III类光气候区春季、冬季日照时数缓慢上升,增长速率分别为 17.86 、 $8.31 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$,夏季、秋季明显下降,减少速率分别为 -26.08 、 $-15.00 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$; II、IV、V类光气候区四季变化特征相似,除了春季日照时数有所增长,其他季节尤其是夏季显著下降,减少速率分别为 -11.78 、 -33.00 、 $-40.08 \text{ h} \cdot 10^{-1} \cdot$

年 $^{-1}$ 。各类光气候区四季日照时数的变化会导致该地区特殊季节的太阳辐射量的变化,尤其是寒冷地区和炎热地区,在建筑采光、照明设计以及节能保温设计中应该考虑其影响。

参考文献:

- [1] 程炳岩,孙卫国,孙仕强,等. 重庆地区太阳总辐射的气候学计算方法研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(9):94.
CHENG Bingyan, SUN Weiguo, SUN Shiqiang, et al. Study on the climatological calculation methods of total radiation in chongqing area[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2011, 33(9):94.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑采光设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for daylighting design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Publishing Press, 2012.
- [3] 何荣,林勇. 用P-G-D图表研究我国光气候状况[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1):107.
HE Ying, LIN Yong. Analysis of China's day lighting climate with P-G-D diagram[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1):107.
- [4] 林若慈,赵建平. 新版《建筑采光设计标准》主要技术特点解析[J]. 照明工程学报, 2013, 24(1):5.
LING Ruoci, ZHAO Jianping. Analysis of main technical characteristics to the new version "standard of daylighting design of buildings" [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(1):5.
- [5] 赵东,罗勇,高歌,等. 1961年至2007年中国日照的演变及其关键气候特征[J]. 资源科学, 2010, 32(4):701.

- ZHAO Dong, LUO Yong, GAO Ge, *et al.* Long-term changes and essential climatic characteristics of sunshine duration over China during 1961—2007 [J]. *Resources Science*, 2010, 32(4):701.
- [6] 赵建平,肖辉乾,罗涛,等. 建筑采光照明技术研究进展[J]. *建筑科学*, 2013,29(10):48.
ZHAO Jianping, XIAO Huiqian, LUO Tao, *et al.* Technology progress of day lighting and artificial lighting [J]. *Building Science*, 2013,29(10):48.
- [7] 中国气象局. 地面气象观测规范[S]. 北京:气象出版社,2003.
China Meteorological Administration. The ground meteorological observation specification [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [8] 翁笃鸣. 我国辐射气候[M]. 北京:气象出版社,1997.
WENG Duming. Chinese radiation climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997.
- [9] STANHILL G, COHEN S. Global dimming: a review of the evidence of a widespread and significant reduction in global radiation with discuss of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001,107(4):255.
- [10] 王志娟,韩力慧,陈旭锋,等. 北京典型污染过程 PM2.5 的特性和来源[J]. *安全与环境学报*, 2012,12(5):122.
WANG Zhijuan, HAN Lihui, CHEN Xufeng, *et al.* Characteristics and sources of PM2.5 in typical atmospheric pollution episodes in Beijing [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012,12(5):122.
- [11] 申彦波,赵宗慈,石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008,23(9):915.
SHEN Yanbo, ZHAO Zongci, SHI Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climate effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2008,23(9):915.
- [12] DING Yihui, REN Guoyu, ZHAO Zongci. *et al.* Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress [J]. *Advances in Atmospheric science*, 2007,24(6): 954.
- [13] 虞海燕,刘树华,赵娜,等. 我国近 59 年日照时数变化特征及其与温度、风速、降水的关系[J]. *气候与环境研究*, 2011,16(3):389.
YU Haiyan, LIU Shuhua, ZHAO Na, *et al.* Variation characteristics of the sunshine duration and its relationships with temperature, wind speed, and precipitation over recent 59 years in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011,16(3):389.
- [14] 陈碧辉,张平,郝克俊,等. 近 50 年成都市日照时数变化规律[J]. *气象科技*, 2008,36(6):760.
CHEN Bihui, ZHANG Ping, HAO Kejun, *et al.* Variation characteristics of sunshine duration in chengdu in recent 50 Years [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(6):760.
- [15] ZHANG Y L, QIN B Q, CHEN W M. Analysis of 40 year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing, and Hangzhou in Eastern China [J]. *Theor. Appl. Climatol*, 2004, 78(4): 217.
- [16] 华维,范广洲,周定文,等. 青藏高原四季日照时数年际、年代际变化趋势分析[J]. *自然资源学报*, 2009,24(10):1810.
HUA Wei, FAN Guangzhou, ZHOU Dingwen, *et al.* Analysis on the variation trend of interannual and interdecadal seasonal sunshine duration over tibetan plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009,24(10):1810.
- [17] 中国气象年鉴编辑部. 中国气象年鉴[M]. 北京:气象出版社,1988.
China Meteorological Yearbook Newsroom. China meteorological yearbook [M]. Beijing: Meteorological Press, 1988.
- [18] 沈瑛,曾燕,肖卉,等. 江苏省日照时数的气候特征分析[J]. *气象科学*, 2007,27(4):425.
SHEN Zhen, ZENG Yan, XIAO Hui, *et al.* Changes of sunshine hours in the recent 40 years over Jiangsu Province [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(4): 425.