

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.016



# 建筑节能分析太阳总辐射模型研究综述

刘大龙<sup>1,2</sup>, 杨 柳<sup>1,2</sup>, 霍旭杰<sup>1,2</sup>, 刘加平<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 2. 陕西省西部绿色建筑协同创新中心, 西安 710055)

**摘要:** 太阳辐射是建筑节能分析的重要基础气象参数, 实测数据远远不能满足需求, 理论计算是目前获取辐射数据的主要途径。将常用水平面太阳总辐射模型归纳为气象参数、空间插值和基于 DEM 三类, 详述了各自的原理和计算方法。对三类模型在建筑节能分析中的适用性进行了分析, 展望了建筑节能分析用太阳辐射模型的发展趋势: 气象参数模型与 DEM 模型的融合。

**关键词:** 水平面太阳总辐射; 气象参数模型; 空间插值模型; DEM 辐射模型

**中图分类号:** TU111.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0101-08

## Review of globe solar radiation model for building energy efficiency analysis

Liu Dalong<sup>1,2</sup>, Yang Liu<sup>1,2</sup>, Huo Xujie<sup>1,2</sup>, Liu Jiaping<sup>1,2</sup>

(1. Architecture school, Xi'AN University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, P. R. China;

2. Shaanxi provincial collaborative innovation centre of green building in western, 710055 Xi'an, P. R. China)

**Abstract:** The solar radiation is an important fundamental meteorological parameter for building energy efficiency analysis. Since the measured radiation data can not meet the demand for analysis, the theoretical calculation is the critical. The widely used horizontal solar radiation models were classified into three categories including meteorological parameter model, spatial interpolation model, DEM solar model. Principles and calculation methods of three type model were presented. The applicability of three models in building energy efficiency field was analyzed. The future of solar radiation for building energy efficiency analysis was predicted.

**Key words:** horizontal globe solar radiation; meteorological parameter model; spatial interpolation model; DEM solar model

太阳辐射数据是建筑节能设计、暖通空调设计、建筑采光设计、城市规划和景观设计等领域的重要气象参数。实测数据是获取太阳辐射最准确的途径, 但中国对太阳辐射数据的测量台站少, 测量历史

短, 测量项目少。中国幅员辽阔, 地形复杂, 下垫面条件多样, 使得各地辐射条件相差悬殊, 导致各地的太阳辐射强度相差很大。现有的测量太阳辐射数据远远不能满足工程和科研需要。

**收稿日期:** 2014-10-25

**基金项目:** “十二五”国家科技计划项目(2013BAJ03B04-01); 博士后基金面上项目(2014M552419)

**作者简介:** 刘大龙(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑能耗模拟研究, (E-mail) coffeercv@xauat.edu.cn.

**Received:** 2014-10-25

**Foundation item:** “Twelfth Five Year Plan” National Science and Technology Plan Project(No. 2013BAJ03B04-01); Post Doctoral Science Fund Projects(No. 2014M552419)

**Author brief:** Liu Dalong(1976-), PhD., associate professor, main research interest: building energy simulation, (E-mail) coffeercv@xauat.edu.cn.

太阳辐射模型是根据相关原理构建数学模型来获取太阳辐射数据的理论计算方法。该方法不受测量条件和时空限制是弥补太阳辐射数据不足的有效途径<sup>[1]</sup>。太阳辐射模型包括水平面总辐射模型、直散分离模型、逐时辐射模型等,主要对水平面日总辐射模型进行归纳整理。

## 1 水平面太阳总辐射计算模型

水平面太阳总辐射模型种类众多,根据与太阳辐射的关联方式和计算原理的不同,将其归纳为气象参数模型、空间插值模型和基于 DEM 的辐射模型三类,下面对其分别进行论述。

### 1.1 气象参数模型

1.1.1 计算原理 组成气候系统的各气象要素之间相互关联,太阳辐射是气候的主动因素,它对其他气象参数产生影响,而这些参数反过来也反映了太阳辐射的特征。因此,选择与太阳辐射关联密切且便于测试的气象要素,构建其与太阳辐射之间的函数关系,就可计算出太阳辐射值,这是气象参数辐射模型的计算原理。用于构建太阳辐射模型的主要气象参数有日照时数、温差、云量。此外,使用相对湿度、降雨量、露点温度等要素也能够建立水平面太阳总辐射模型,但这类气象要素与太阳辐射的关系较弱,不能单独完成辐射的计算,必须与前 3 个要素中的一个或多个共同构建总辐射模型。云量与辐射具有重要相关性,但云量的单独辐射模型很少,且应用也少,多数情况是和其他气象参数共同构成总辐射模型,因此,文中没有列出云量的单独辐射模型,详细内容可参考文献[2-3]。

1.1.2 日照时数模型 日照时数模型是气象参数模型,是所有水平面太阳总辐射模型中使用最广泛、计算结果最准确且计算参数最容易获得的一类模型。在该类模型中,很多情况以日照百分率( $S/S_0$ )为参数进行计算,日照百分率是实际日照时数与日最大日照时数的比值。最早提出日照时数模型的是 Ångström<sup>[4]</sup>,该模型如式(1)所示,直观简洁地给出了月均日总辐射量与晴天日总辐射量的比值同日照百分比之间的线性关系。孙治安等<sup>[5]</sup>指出 Ångström 模型在晴天条件下太阳总辐射计算值的误差最小。

$$\frac{G}{G_c} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (1)$$

式中: $G$ 为月均日总辐射量; $G_c$ 为月均日晴天总辐射量; $S$ 为测量的月均日日照时数; $S_0$ 为月均日最大可能日照时数; $a$ 、 $b$ 为回归系数。

系数  $a$  和  $b$  是使用 Ångström 模型的关键问题。可在已知辐射和日照时数的情况下通过回归获得系数  $a$  和  $b$ ,然后将其用于气候相近地区计算当地的未知辐射值。不同地域的系数  $a$ 、 $b$  不同。高国栋等<sup>[6]</sup>以该模型计算了我国不同地区的  $a$ 、 $b$  值,指出两系数的分布与地理条件和气候状况有密切。两个系数反映了辐射与日照率关系模型具有较强的地域性。系数  $a$ 、 $b$  不仅具有地域特性,而且还具有季节特性,Soler<sup>[7]</sup>根据欧洲 100 个气象站的辐射数据,通过回归给出了每个月不同的系数  $a$ 、 $b$ ,见表 1。鞠晓慧等<sup>[8]</sup>根据我国建站 30 年以上的辐射资料研究也表明,需按不同月份确定系数  $a$ 、 $b$ 。

表 1 Soler 模型中各月份的系数  $a$ 、 $b$   
Table 1 The coefficient  $a$  &  $b$  of each month in Soler model

月份	$a$	$b$	月份	$a$	$b$
1	0.18	0.66	7	0.23	0.53
2	0.20	0.60	8	0.22	0.55
3	0.22	0.58	9	0.20	0.59
4	0.20	0.62	10	0.19	0.60
5	0.24	0.52	11	0.17	0.66
6	0.24	0.53	12	0.18	0.65

有学者发现了 Ångström 模型中系数  $a$ 、 $b$  与日照百分率之间存在函数关系,Rietveld<sup>[9]</sup>给出了如下关系。

$$a = 0.10 + 0.24\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (2a)$$

$$b = 0.38 + 0.08\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (2b)$$

Bahel<sup>[10]</sup>给出了式 3 所示的关系。

$$a = 0.395 - 1.247\left(\frac{S}{S_0}\right) + 2.680\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - 1.674\left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad (3a)$$

$$b = 0.395 + 1.384\left(\frac{S}{S_0}\right) - 3.249\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + 2.055\left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad (3b)$$

该模型在使用中月均日晴天总辐射量较难获得。Prescott 等<sup>[11]</sup>对该模型进行了修正,如式(4)所示,将日晴天总辐射量用天文辐射替换。天文辐射根据纬度、赤纬角等信息便于计算。王炳忠等<sup>[1]</sup>提出采用理想大气日总辐射量代替天文辐射量,原因是理想大气辐射量的计算中考虑了海拔和纬度的因素,而海拔因素是影响辐射的重要因素。

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (4)$$

式中: $G_0$ 为月平均日天文总辐射量

有学者根据当地气候特征,将日照时数模型发展为非线性关系。Newland<sup>[12]</sup>在模型中引入了对数关系,如式(5)所示。Bakirci<sup>[13]</sup>提出了指数关系的日照时数模型,如式6所示。

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + c \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (5)$$

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + c \cdot \exp\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (6)$$

Ogelman将日照时数模型发展成了二次完全非线性关系<sup>[14]</sup>,如式7所示。

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + c\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 \quad (7)$$

Bahel等<sup>[15]</sup>在Ogelman模型基础上将日照时数模型发展成为了三次非线性模型。日照时数模型变得越来越复杂,随着模型复杂性的提高,其地域的适用性比计算准确性的改善更为显著,即高次非线性的日照时数模型能够在更广泛的地区适用<sup>[3]</sup>。

1.1.3 温差模型 日照时数模型虽然准确度较高,但是日照时数并不是常用的气象参数,其数据获取有一定的局限性,这一点限制了该模型的广泛应用。气温是最常见、也最方便测量的气象参数,但是研究表明,最容易获取的平均气温与水平面日总辐射之间并无有效的函数关系<sup>[16]</sup>,而日最高与最低气温之差与总辐射之间具有函数关系。

Hargreaves等人<sup>[17]</sup>提出了一个温差的非线性模型,如式8所示。式中系数 $a$ 体现了地域性差异,内陆地区 $a$ 取值0.16,沿海地区取值0.19。Allen<sup>[18]</sup>发展了Hargreaves模型,在模型中考虑了大气压的影响,如式9所示。

$$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (8)$$

$$\frac{G}{G_0} = K_r \left(\frac{P_s}{P_0}\right)^{0.5} \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (9)$$

式中: $K_r$ 为经验系数; $P_s$ 为当地大气压,kPa; $P_0$ 为标准大气压,101.3 kPa。

Annandale等<sup>[19]</sup>引入了海拔参数对Hargreaves模型进行了修改,模型如式(10)所示。

$$\frac{G}{G_0} = a(1 + 2.7 \times 10^{-5} Z) \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (10)$$

Bristow等<sup>[20]</sup>提出了指数形式温差辐射模型,如式(11)所示。Meza等<sup>[21]</sup>将公式中的系数 $a$ 设为0.75, $c$ 设为2,系数 $b$ 仍为经验系数,对Bristow模型进行了具体化,这样可以降低计算误差。

$$\frac{G}{G_0} = a[1 - \exp(-b \cdot (T_{\max} - T_{\min})^c)] \quad (11)$$

陈仁生等<sup>[22]</sup>提出对数形式的温差辐射模型,如式12所示。

$$\frac{G}{G_0} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b \quad (12)$$

1.1.4 多参数模型 除了日照时数、温差等单气象参数以外,还有多参数构成的日总辐射模型,这类模型是以日照时数或者温差为主要参数,综合了云量、大气压、相对湿度等参数对太阳辐射的影响。

Garg等<sup>[23]</sup>采用气温和降雨对Ångström模型的经验系数 $a$ 、 $b$ 进行了拟合,如式(13)所示。

$$a = 0.3791 - 0.0004T - 0.0176P \quad (13a)$$

$$b = 0.4810 + 0.0043T + 0.0097P \quad (13b)$$

式中: $T$ 为气温,°C; $P$ 为降雨量,cm。

陈仁生等<sup>[22]</sup>提出了温差和日照时数的非线性辐射模型,如式(14)所示。曹雯等<sup>[24]</sup>将该模型中参数 $c$ 设定为1。

$$\frac{G}{G_0} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b\left(\frac{S}{S_0}\right)^c + d \quad (14)$$

Swartman等<sup>[25]</sup>提出了日照百分率和相对湿度的辐射模型,如式(15)所示。

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + cRH \quad (15)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为经验系数; $RH$ 为相对湿度。

Jong等<sup>[26]</sup>提出了温差和降雨量两参数组合的辐射模型,如式(16)所示。

$$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^b(1 + cP + dP^2) \quad (16)$$

Supit等<sup>[27]</sup>提出了温差和云量两参数组合的辐射模型,如式(17)所示。

$$G = G_0[a\sqrt{T_{\max} - T_{\min}} + b\sqrt{(1 - C/8)}] + c \quad (17)$$

式中: $C$ 为云量

Abdalla等<sup>[28]</sup>提出了日照时数,平均气温和相对湿度三类参数的辐射模型,如式(18)所示。

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + cT + dRH \quad (18)$$

Ojosu等<sup>[29]</sup>提出了日照时数,气温极值和相对湿度三类参数的辐射模型,如式(19)所示。

$$\frac{G}{G_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + c\left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}}\right) + d\left(\frac{RH}{RH_{\max}}\right) \quad (19)$$

## 1.2 空间插值模型

1.2.1 计算原理 空间插值辐射模型是无辐射测量地域获取辐射数据的另一类重要方法。在一定区域内当气候具有较好的相似性,而获得气象参数较为困难时,空间插值模型是计算太阳辐射数据的较好途径。空间插值模型对于观测台站十分稀少而台站分布又非常不合理的地区具有十分重要的实际意义<sup>[30]</sup>。

空间位置上越靠近的点,越可能具有相似的特征值;而距离越远的点,其特征值相似的可能性越小<sup>[31]</sup>,这是“地理学第一定律的假设”,是最早的几何空间插值技术基本原理,距离权重法(Distance Weighting)属于几何空间插值法。空间统计学被引入了空间插值方法,用统计的概念去研究空间中的相近性问题,提出空间相似的程度是通过点对的平均方差度量的<sup>[32]</sup>。克里格法(Kriging)属于空间统计法的空间插值。样条插值法(Spline methods)属于函数类空间插值方法,通过构造平滑的函数曲线来进行插值,不需要对空间结构进行预估计,也不需要做统计假设<sup>[30]</sup>。空间插值法多种多样,但将任何一种插值技术应用于太阳辐射的计算,必须充分考虑其辐射资源的相似性,插值技术理论假设和应用条件等因素。

1.2.2 距离权重法 距离权重法较为简便,只以两地距离为依据进行插值,如式(20)所示<sup>[33]</sup>。该方法的实质是以插值点与采样点间距离为权重的一种加权平均法,其权重赋予离插值点越近的采样点赋予估值权重越大。这对于与纬度、海拔等多种因素相关的太阳辐射不太合适。

$$Z = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^2} \right] - \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right] \quad (20)$$

式中: $Z$ 为计算站点的太阳总辐射; $Z_i$ 为第 $i$ 个站点的太阳总辐射。

Nalder 等<sup>[33]</sup>提出了距离权重法的改进方法—梯度距离平方反比法(Gradient Plus Inverse Distance Squared)。在距离权重的基础上,本方法考虑了气象要素随海拔和经纬向的梯度变化。

$$Z = C_x \frac{\sum_{i=0}^n \frac{(X - X_i)}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} + C_y \frac{\sum_{i=0}^n \frac{(Y - Y_i)}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} + C_e \frac{\sum_{i=0}^n \frac{(E - E_i)}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (21)$$

式中: $Z$ 为计算站点的气象要素; $X, X_i$ 为计算站点与参考气象站点的经度; $Y, Y_i$ 为气象站点的 $Y$ 轴纬度; $E, E_i$ 为气象站点的海拔高度; $C_x, C_y$ 和 $C_e$ 为经纬度与海拔高度对应的回归系数; $d_i$ 为计算站点到第 $i$ 站点的大地球面距离; $n$ 为用于插值的气象站点的数目; $Z_i$ 为气象站点的气象要素测量值。

### 1.2.3 普通克里格法

普通克里格法来源于地统计学中<sup>[34]</sup>,以区域化变量理论为基础,半变异函数为分析工具,能提供最

佳线性无偏估计而逐渐被广泛运用于需要空间插值的诸多领域,但是计算复杂且计算量大。其插值公式如式 22 所示。

$$Z = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (22)$$

式中: $\lambda_i$ 为气象要素的 $Z(x_i)$ 的权重; $Z(x_i)$ 为测试值权重系数由“克里格方程组”决定,如式(23)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C(X_i, X_j) - \mu = C(X_i, X') \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $C(X_i, X_j)$ 为采样点间的协方差; $C(X_i, X')$ 为采样点与插值点间的协方差; $\mu$ 为极小化处理时的拉格朗日乘子

### 1.2.4 样条插值法

样条插值是根据已知点值来拟合出平滑的样条函数,然后使用样条函数值作为插值结果。样条函数易操作,计算量不大,多用于气象要素的时间序列插值。它适合于已知点密度较大的情况,缺点是难以对误差进行估计,点稀时效果不好。样条插值是函数逼近的方法,3次样条函数和薄盘光滑样条函数是两类常用的样条函数。

3次样条函数的定义是<sup>[35]</sup>:已知平面上 $n$ 个点 $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),其中 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ ,这些点称为样本点。如果某函数 $S(x)$ 满足下面3个条件,则称 $S(x)$ 为经过这 $n$ 个点的三次样条函数。

1)  $S(x_i) = y_i, (i=1, 2, \dots, n)$ ,

2)  $S(x)$ 在每个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上为3次多项式

$$S(x) = c_{i1}(x - x_i)^3 + c_{i2}(x - x_i)^2 + c_{i3}(x - x_i) + c_{i4} \quad (24a)$$

3)  $S(x)$ 在整个区间上有连续的一阶及二阶导数。

则三次样条插值模型如式(24)所示<sup>[36]</sup>。

$$Z = \sum_{i=1}^n S^i(x) \cdot Z(x_i) \quad (24b)$$

薄盘光滑样条函数是对样条函数法的曲面扩展,常用于不规则分布数据的多变量平滑插值。利用光滑参数来达到数据逼真度和拟合曲面光滑度之间的优化平衡,保证了插值曲面光滑连续,且精度可靠。它除通常的样条自变量外,允许引入线性协变量子模型。薄盘光滑样条函数如式(25)所示<sup>[37]</sup>。

$$Z = f(x) + b^T y + e \quad (25)$$

式中: $Z$ 为位于空间点的插值结果; $x$ 为样条独立变量矢量; $f$ 为要估算的关于 $x$ 未知光滑函数; $y$ 为独立协变量矢量; $b$ 为 $y$ 的向量系数; $T$ 为转置符号; $e$ 为自变量随机误差。

### 1.3 基于数字高程的辐射计算模型

#### 1.3.1 计算原理

地形对太阳辐射具有重要影响,坡度、坡向以及周围地形的遮蔽都会显著影响水平地面接收到的总辐射,前面介绍的气候模型和空间插值模型都不能解决复杂地形下的辐射计算问题。随着地理信息系统技术的发展,数字高程技术被用于复杂地形条件下的辐射计算。

数字高程模型(Digital Elevation Model,简称DEM)是对地球表面地形属性为高程时的一种离散的数字表达。通过DEM可以直接获得地形的坡度、坡向等地形信息,用于计算地形遮挡状态下的地面接收到的水平总辐射数据。数字高程的优势表现在坡度、坡向、地形遮蔽度的计算以及模拟结果可视化表达方面。采用DEM技术辐射模型主要是考虑地形对辐射的遮蔽作用,用地形遮蔽因子来体现,不同的DEM辐射计算模型主要是地形遮蔽因子的计算方法不同,遮蔽因子可作用于散射或者反射分量的计算。图1是采用数字高程模型进行总辐射计算的流程图。

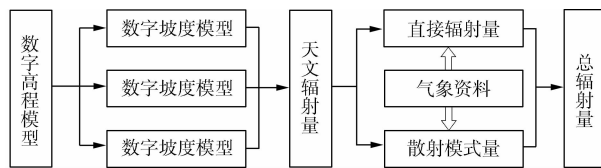


图1 采用数字高程模型进行总辐射计算的流程图<sup>[43]</sup>

Fig. 1 The flow chart of global radiation calculation using DEM

#### 1.3.2 DEM辐射模型

Dozier<sup>[38]</sup>最早提出了利用数字高程模型模拟太阳辐射的方法。中国基于DEM的辐射模型起源于对山地地形辐射计算模型的研究。傅抱璞<sup>[39]</sup>对于任意地形条件下太阳辐射进行了开创性研究。翁笃鸣、李占清<sup>[40-41]</sup>等发展了这一方法,之后李新<sup>[42]</sup>、杨昕<sup>[43]</sup>等开展了基于DEM技术的复杂地形辐射计算

$$K_d = \frac{\cos \alpha \left[ 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2 h'_i \right] - \sin \alpha \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h'_i + 0.5 \sin 2h'_i) \cos \Psi_i \right]}{\cos \alpha \left[ 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2 h_i \right] - \sin \alpha \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i + 0.5 \sin 2h_i) \cos \Psi_i \right]} \quad (27c)$$

式中: $h'_i$ 为周围地形对坡地的遮蔽角; $\Psi_i$ 为坡地的相对方位角; $h_i$ 为坡地自身形成的遮蔽角;

## 2 辐射模型的适用性分析

### 2.1 其他模型分析

除过文中介绍的气象参数模型、空间插值模型

模型研究。

李新等<sup>[42]</sup>提出了依据DEM技术计算我国任意地形条件下太阳辐射模型,模型中利用计算机图形学的光线追踪算法生成形状因子计算地形对坡面的反射辐射。其模型如式(26)所示。

$$G = G_{\text{dir}} + G_{\text{dif}} + G_{\text{ref}} \quad (26a)$$

式中: $G$ 为水平面总辐射; $G_{\text{dir}}$ 为直射辐射; $G_{\text{dif}}$ 为散射辐射; $G_{\text{ref}}$ 为反射辐射。

其中某个坡元 $j$ 的反射辐射计算模型为:

$$G_{\text{ref},j} = \sum_{i=1}^n A_i^t (G_{\text{dir},i} + G_{\text{dif},i}) F_{ij} \quad (26b)$$

式中: $F_{ij}$ 为坡元 $i$ 到坡元 $j$ 的形状因子; $A_i^t$ 为周围坡面第 $i$ 个坡元的坡面反射率; $G_{\text{dir},i}, G_{\text{dif},i}$ 为坡元 $i$ 接收到的直射辐射和散射辐射。

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \varphi_i \cos \varphi_j}{\pi r^2} \text{HID} dA_i dA_j \quad (26c)$$

式中: $F_{ij}$ 为坡元 $i$ 到坡元 $j$ 的形状因子; $A_i, A_j$ 为坡元 $i, j$ 的面积; $r$ 为坡元 $i, j$ 间的距离; $\varphi_i, \varphi_j$ 为坡元 $i, j$ 法线与它们连线的夹角; $\text{HID}$ 为取值0或1,取决于第 $i$ 个坡元能否“看到”第 $j$ 个坡元,采用光线追踪法计算。

杨昕等<sup>[43]</sup>提出了基于DEM的山地总辐射模型,给出了地形遮蔽度因子的计算公式,将其用于散射辐射的计算。模型如式(27)所示。

$$G = S + D + R + r \quad (27a)$$

式中: $G$ 为水平面总辐射; $S$ 为直射辐射; $D$ 为天空散射辐射; $R$ 为周围地形的短波反射辐射; $r$ 为研究点与遮蔽物间空气散射辐射(程辐射)。

其中,天空散射辐射计算模型为(27b):

$$D = K_d \left[ D_0 \cos^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) + 35.1 F(n) \cos(1.09h') \times \sin(1.42\alpha) \cos(\beta - A') \right] \quad (27b)$$

式中: $K_d$ 为地形遮蔽度因子; $D_0$ 为水平面散射辐射通量密度; $\alpha$ 为坡度; $\beta$ 为坡向; $F(n)$ 为云量函数; $h', A'$ 为正午时刻太阳高度角和方位角。

和基于DEM的辐射模型之外,还有概率统计模型和卫星遥感模型。概率统计模型以人工神经网络方法<sup>[44]</sup>和时间序列方法<sup>[45]</sup>为主要代表,其模型的计算需要大量实测辐射数据作为输入,以统计学原理从海量数据中构造出经验模型。卫星遥感模型是根据统计反演法或者物理反演法采用卫星的可见光和红

外光波段测量数据建立的<sup>[46]</sup>,主要用于研究太阳辐射的垂直空间分布和大气对辐射吸收等问题。上述两类辐射模型尚处于发展阶段,技术趋待完善,且因计算复杂计算结果存在较大的不确定性,因此,很少应用于建筑节能分析。

## 2.2 辐射模型节能计算的适用性分析

太阳辐射数据在建筑节能领域应用广泛,而且具有重要作用,面对众多辐射计算模型,对模型的选择是个重要问题。从计算简便性和准确性来看,气象参数辐射模型最简单,而且其计算准确度也高,刘大龙等<sup>[47]</sup>比较了日照时数和梯度距离平方反比法模型,研究表明日照时数模型在我国地域内更为准确。该模型由左大康最早应用于中国<sup>[48]</sup>,并得到广泛应用,已成为中国气象行业的标准辐射计算方法<sup>[49]</sup>。邓艳君等<sup>[50]</sup>采用中国实测辐射数据对三种气象参数辐射模型进行了对比,日照百分率和温差模型精度高,但经典日照模型更为稳定,而温差模型误差较大。如果测量的气象参数具有较长的时间序列,则可得到长时间序列的辐射值,这是气象参数模型的另一优点。

日照时数等气象参数类模型主要是用于晴天条件下辐射的计算,非晴天条件下该类模型误差较大<sup>[5]</sup>。当需要计算有辐射值的相近站点的辐射值时,空间插值模型是较好的选择。空间插值计算辐射有直接法和间接法两种应用方式,直接法就是对辐射数据进行插值;间接法可以对气象参数模型中的相关参数进行插值,然后应用再通过计算得到辐射数据。然而,在众多的气象要素空间插值方法中,并没有一种适合每一个气象要素的普适的最佳插值方法<sup>[51]</sup>。梯度距离平方反比法包含了经纬度和海拔信息,比较适合辐射的直接插值;普通克立格法能够准确控制计算误差,但计算较为复杂,研究表明在温度插值时其准确度和梯度距离平方反比法相当<sup>[51]</sup>;样条插值比较适合气温和气象要素的时间序列插值。

当缺乏用于计算辐射的气象参数时,且地形对辐射具有重要影响时可采用基于 DEM 的辐射模型,这类模型根据天文辐射和地理要素可计算出不同季节、不同时刻的辐射值,而且还便于计算直射辐射和散射辐射。DEM 辐射模型已成为我国研究复杂地形辐射数据主要方法<sup>[52-53]</sup>。DEM 辐射模型具有一个非常适合建筑节能分析的特点,就是能够计算建筑周围微环境的辐射值。建筑节能分析绝大多数情况需要的是建筑周围微环境的辐射数据。建筑更多的集中于城市,人为因素导致城市中出现了特殊的城市气候,而城市气候一个显著特点就是差异

性、下垫面、建筑布局、绿化等众多因素导致城市不同区域具有明显不同的微气候环境,这就是城市气候的差异性。因此,准确计算建筑周围微环境对于建筑节能分析具有重要作用。

## 2.3 节能分析用辐射模型展望

建筑节能技术主要应用于城市建筑,因此,城市中微环境的辐射数据成为节能分析用辐射数据的重点。随着我国气象观测能力的增强,辐射台站密度有显著增加,但其与城市的快速扩张速度相比相差甚远,因此城市中微环境的辐射数据获取依然离不开模型计算方法。节能分析用太阳辐射模型的发展趋势是建筑周边微气候的辐射计算,辐射模型将会走气象参数模型与 DEM 模型相结合的道路。通过气象参数获得大范围、长时间序列的基本辐射数据,然后从 DEM 中依据地形、考虑建筑间的遮挡进行微环境、小尺度空间的精确化辐射计算。在采用 DEM 模型时,将坡元对辐射的影响用相邻建筑来替代,这是城市环境辐射计算的新特征。

## 参考文献:

- [1] 王炳忠. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报, 1980,1(1):1-9.  
Wang B Z. Solar Energy resources in China [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1980,1(1):1-9. (in Chinese)
- [2] Black J N. The distribution of solar radiation over the earth's surface [J]. Archiv fur Meteorologie, Geophysik, und Bioklimatologie Serie A Meteorologie und Geophysik 1956,7:165-189.
- [3] Besharat F, Ali A, Dehghan A R, et al. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,21:798-821.
- [4] Ångström A. Solar and terrestrial radiation [J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1924,50:121-125.
- [5] 孙治安, 施俊荣, 翁笃鸣. 中国太阳总辐射气候计算方法的进一步研究[J]. 南京气象学院学报, 1992,15(2):21-28.  
Sun Z A, Shi J R, Weng D M. A further research on the climatological calculation method of the global solar radiation over China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1992,15(2):21-28. (in Chinese)
- [6] 高国栋, 陆瑜蓉. 中国地表面辐射平衡与热量平衡[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [7] Soler A. Monthly specific Rietveld's correlations [J]. Solar and Wind Technology, 1990,7:305-312.
- [8] 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论[J]. 南京气象学院学报, 2005,28(4):516-521.

- Ju X H, Tu Q P, Li Q X. Discussion on the Climatological calculation of solar radiation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(4): 516-521. (in Chinese)
- [9] Rietveld M. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine [J]. Agricultural Meteorology, 1978, 19: 243-252.
- [10] Zabara K. Estimation of the global solar radiation in Greece [J]. Solar and Wind Technology, 1986, 3(4): 267-272.
- [11] Prescott J A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation [J]. Transactions of the Royal Society of Australia, 1940, 46: 114-121.
- [12] Newland F J. A study of solar radiation models for the coastal region of South China [J]. Solar Energy, 1988, 31: 227-235.
- [13] Bakirci K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey [J]. Energy, 2009, 34: 485-501.
- [14] Ogelman H, Ecevit A, Tasdemiroglu E. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data [J]. Solar Energy, 1984, 33: 619-625.
- [15] Bahel V, Bakhsh H, Srinivasan R. A correlation for estimation of global solar radiation [J]. Energy, 1987, 12: 131-135.
- [16] 刘大龙. 区域气候预测与建筑能耗演化规律研[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [17] Hargreaves G H, Samani Z A. Estimating potential evapotranspiration [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1982, 108(IR3): 223-230.
- [18] Allen R. Evaluation of procedures of estimating mean monthly solar radiation from air temperature [R]. Rome: FAO, 1995.
- [19] Annandale J G, Jovanic N Z, Benade N, et al. Software for missing data error analysis of penman-monteith reference evapotranspiration [J]. Irrigation Science, 2002, 21: 57-67.
- [20] Bristow K L, Campbell G S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1984, 31: 159-166.
- [21] Meza F, Varas E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature [J]. Agric. For Meteorol., 2000, 100: 231-241.
- [22] Chen R, Ersi K, Yang J, et al. Validation of five global radiation models with measured daily data in China [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 1759-69.
- [23] Garipey J. Estimation of global solar radiation [R]. International Report, Service of Meteorology, Government of Quebec, Canada; 1980.
- [24] 曹雯, 申双和. 我国太阳日总辐射计算方法的研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 587-591.
- Cao W, Shen S H. Estimation of daily solar radiation in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(4): 587-591. (in Chinese)
- [25] Swartman R K, Ogunlade O. Solar radiation estimates from common parameters [J]. Solar Energy, 1967, 11: 170-172.
- [26] Jong D R, Stewart D W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1993, 73: 509-518.
- [27] Supit I, Kappel V R R. A simple method to estimate global radiation [J]. Solar Energy, 1998, 63: 147-160.
- [28] Abdalla Y A G. New correlation of global solar radiation with meteorological parameters for Bahrain [J]. International Journal of Solar Energy, 1994, 16: 111-120.
- [29] Ojoso J O, Komolafe L K. Models for estimating solar radiation availability in south western Nigeria [J]. Nigerian Journal of Solar Energy, 1987, 6: 69-77.
- [30] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 260-264.
- Li X, Chen G D, Lu L. Comparison of spatial interpolation methods [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 260-264. (in Chinese)
- [31] 乌仔伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统原理方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [31] Wu Z L, Liu Y, Zhang J, et al. Geographic Information System: Principle, Method and Application [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [32] Goovaerts P. Geostatistics for natural resource evaluation [M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [33] Nalder I A, Wein R W. Spatial interpolation of climate normals: test of a new method in the Canadian boreal forest [J]. Agric. For Meteorol., 1998, 92: 211-225.
- [34] Journel A G, Huijbregts C J. Mining Geostatistics [M]. London: Academic Press, 1978.
- [35] 樊天锁, 芮兵. 样条插值的 MATLAB 实现[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2011, 29(2): 238-210.
- Fan T S, Rui B. The realization of spline interpolation based on MATLAB [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2011, 29(2): 238-210. (in Chinese)
- [36] Bi C X, Geng L, Zhang X Z. Cubic spline interpolation-based time-domain equivalent source method for modeling transient acoustic radiation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332: 5939-5952.
- [37] 郑小波, 罗宇翔, 于飞. 西南复杂山地农业气候要素空间插值方法比较[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 458-

462.  
Zheng X B, Luo Y X, Yu F. Comparisons of spatial interpolation methods for agro-climate factors in complex mountain areas of southwest China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(4): 458-462. (in Chinese)
- [38] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data [J]. IEEE Transaction on Geo-science and Remote Sensing, 1990, 28(5): 963-969.
- [39] 傅抱璞, 虞静明, 卢其尧. 山地气候资源与开发利用 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1996. 8-39.
- [40] 翁笃鸣. 中国辐射气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1997, 250-278.
- [41] 李占清, 翁笃鸣. 丘陵山地总辐射的计算模式 [J]. 气象学报, 1988, 46(4): 461-468.  
Li Z Q, Weng D M. A numerical approach toward global radiation over rugged areas [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1988, 46(4): 461-468. (in Chinese)
- [42] 李新, 程国栋, 陈贤章, 等. 任意地形条件下太阳辐射模型的改进 [J]. 科学通报, 1995, 44(9): 993-998.  
Li X, Chen G D, Chen X Z, et al. Improvements of solar radiation models in terrain conditions [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 44(9): 993-998. (in Chinese)
- [43] 杨昕, 汤国安, 王雷. 基于 DEM 的山地总辐射模型及实现 [J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 41-44.  
Yang X, Tang G A, Wang L. Modeling of global radiation over rugged areas based on DEM [J]. Geography and Geo-information Science, 2004, 20(5): 41-44. (in Chinese)
- [44] Yadav A K, Chande S S. Solar radiation prediction using Artificial neural network techniques: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33(5): 772-781.
- [45] Voyant C, Paoli C, Muselli M, et al. Multihorizon solar radiation forecasting for mediterranean locations using time series models [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 28(12): 44-52.
- [46] 申彦波. 近 20 年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估中的应用综述 [J]. 气象, 2010, 36(9): 111-115.  
Shen Y B. Review of applications of satellite remote sensing data to solar energy resources assessment in China in recent 20 years [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(9): 111-115. (in Chinese)
- [47] Liu D L, Yang L, Liu J P. Compared Predict Model of Global Solar Radiation [R]. Solari-S 2008, Hongkong, 2008. 12, .
- [48] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征 [J]. 气象学报, 1963, 33(1): 78-96.  
Zuo D K, Wang Y X, Chen J S. Characteristics of the distribution of total radiation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1963, 33(1): 78-96. (in Chinese)
- [49] 中华人民共和国气象行业标准 QX/T89-2008, 太阳能资源评估方法 [S]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [50] 邓艳君, 邱新法, 曾燕, 等. 几种水平面太阳总辐射量计算模型的对比分析 [J]. 气象科学, 2013, 33(4): 371-377.  
Deng Y J, Qiu X F, Zeng Y, et al. Comparison of horizontal global solar radiation models [J]. Journal of Meteorological Sciences, 2013, 33(4): 371-377. (in Chinese)
- [51] 林忠辉, 莫兴国, 李宏, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值 [J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47-55.  
Lin Z H, Mo X G, Li H, et al. Comparison of three Spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 47-55.
- [52] 李净, 李新. 基于 DEM 的坡地太阳总辐射估算 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 905-911.  
Li J, Li X. Estimation solar radiation on slope using DEM [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(8): 905-911. (in Chinese)
- [53] 张海龙, 刘高焕, 姚玲, 等. 复杂地形任意天气情形下太阳直射辐射量模拟 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1409-1407.  
Zhang H L, Liu G H, Yao L, et al. Direct solar radiation simulation in all-weather and complex terrain conditions [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1409-1407. (in Chinese)

(编辑 胡 玲)