省级太阳辐射模拟可视化查询平台设计

陆标标[1]　刘德刚[1]　陈永鑫[1]　成驰[2]

（1 中国地质大学（武汉），武汉 430074；2 湖北省气象服务中心，武汉 430205）

摘要：分析太阳辐射状况是光伏电站项目评估的重要举措，针对分析过程中涉及的各类数据计算和可视化查询，设计实现了省级太阳辐射模拟可视化查询平台。平台根据主要功能划分为数据处理子系统和查询分析子系统，数据处理子系统采用MODIS云量数据、气象站与辐射站历年数据，计算生成具有共同基准的多要素辐射相关数据；查询分析子系统将地图影像与实际数据结合显示，让数据模拟更直观、数据分析更合理。数据处理子系统使用了Qt进行开发，查询分析子系统使用ArcGIS Desktop、ArcGIS Server和MySQL数据库软件，结合Dojo、C#、ASP.NET MVC技术进行开发。使用Python作为“粘合剂”连接两个子系统，让数据成图和发布自动化。平台集数据处理和可视化查询为一体，能够以1 km×1 km的精度模拟分析出省级范围太阳辐射的分布情况，为光伏数据分析和光伏电站建设工作提供及时、有效、科学的技术支撑。

关键字：太阳辐射，模拟分析，可视化查询，光伏电站

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2020.01.009

Design of Visualization Query Platform for Provincial Solar Radiation Simulation

Lu Biaobiao[1], Liu Degang[1], Chen Yongxin[1], Cheng Chi[2]

(1 China University of Geosciences, Wuhan 430074; 2 Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205)

Abstract: The analysis of solar radiation is an important basis for the evaluation of photovoltaic power station projects. Aiming at the calculation and visualization of various kinds of data in the analysis process, this paper designed and implemented the provincial solar radiation simulation visualization query platform. The platform is divided into data processing subsystem and query analysis subsystem according to main functions. Using MODIS cloud amounts data and historical data in weather stations and radiation stations, the data processing subsystem calculates multi-element radiation-related data with common standard. The query analysis subsystem combines map image with real data to make data simulating more intuitive and the analysis more reasonable. The data processing subsystem uses Qt as the development tool. Query analysis subsystem uses ArcGIS Desktop, ArcGIS Server and MySQL database software, combining with Dojo, C #, ASP.NET MVC technology to develop it. The platform uses Python as a “glue” to connect two subsystems to automate data processing and publishing. Platform combines data processing and data visualization, which can simulate and analyze the solar radiation at provincial level with an accuracy of 1 km×1 km, and provide timely, effective and scientific technical support for photovoltaic data analysis and photovoltaic power station construction.

Keywords: solar radiation, simulation analysis, visual query, photovoltaic power station

0　引言

为了合理地利用太阳能资源，对太阳辐射进行可视化分析在光伏电站项目选址、发电量估计方面有着重要的意义。2013年底，国家能源局出台了光伏电站暂行管理办法，其中里面第12条明确规定，项目开发前期必须要有现场实测数据，或者有代表性的实测数据[1]。目前，很多气象部门已经建立了气象数据相关的查询平台，但是这些平台多是用于气象预报、信息查询等业务，在太阳辐射数据模拟和分析方面的针对性不强[2-4]。国内具有多年观测资料的辐射站点数量有限，而且观测站大多设在开阔地段，采集到的数据覆盖面较窄。单靠这些站点的实测资料分析全省的太阳辐射分布，显然是不充分的[5-6]。鉴于这些原因，利用气象局提供的历年气象、辐射数据和MODIS遥感云量数据，设计实现了省级太阳辐射模拟可视化查询平台。

收稿日期：2019 年 1 月 3 日；修回日期：2019 年 6 月 4 日
第一作者：陆标标（1995—），Email：1061248840@qq.com

1　平台总体框架

平台总体上按照主要功能分为数据处理子系统和查询分析子系统（图1）。数据处理子系统以遥感云量数据作为基础，建模计算出辐射相关数据。查询分析子系统利用计算得到的各类数据，完成可视化查询、统计分析、数据存储等功能需求。

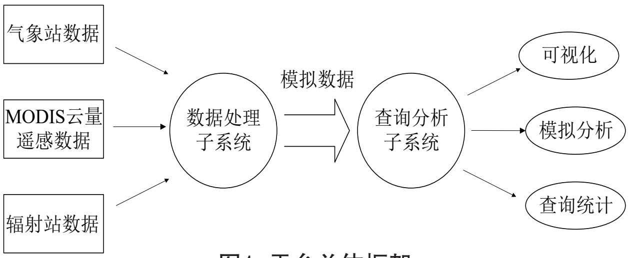

图1 平台总体框架

Fig.1 General framework of the platform

数据处理子系统采用C/S架构，直接从本地读取遥感数据进行计算。根据Andrzej[7]对比MODIS云量和地面观测数据的结果，证明在温带的MODIS云量数据比其他卫星数据更接近真实值。所以，平台采用MOD06_L2卫星上采集的云量数据作为基础资料[8]，MODIS传感器的空间分辨率有250 m、500 m和1000 m三种，统一采用1 km×1 km的分辨率为标准。为了得到日照百分率和清晰度的模型系数，采用省内的气象站实测的历年云量、日照数据和辐射站实测的历年辐射数据来进行反演计算。通过对高精度的MODIS云量数据和反演系数建立计算模型，系统所模拟辐射数据的空间分辨率可达到1 km×1 km。

查询分析子系统框架采用B/S架构，以ArcGIS作为基础，实现多要素数据可视化查询。通过在内网中架设服务器，系统提供模拟分析、统计查询等功能，辅助用户对光伏发电资源进行综合分析，为光伏电站建设提供依据。

2 数据处理子系统设计

2.1 数据处理子系统框架设计

数据处理子系统使用Qt编程实现，系统架构分为数据预处理层和和数据处理层（图2）。

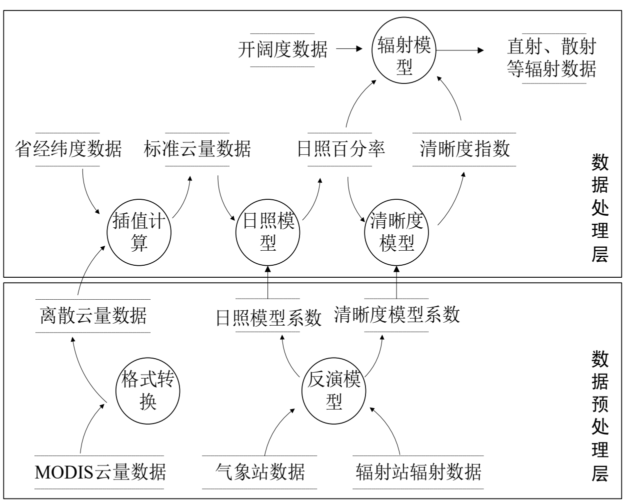

图2 数据流图

Fig.2 Data flow

数据预处理层的主要功能有两个。一个功能是对MODIS数据进行格式转：MODIS数据原始格式为矩阵形式，矩阵大小为408×270。根据计算要求，将矩阵形式的数据转换成表格格式的离散云量数据[9]。另一个功能是反演模型系数：通过气象站和辐射站实测得到的大量历史数据，反演出日照模型系数和清晰度模型系数，这些系数将会作为日照模型和清晰度模型的计算参数[10]。

数据处理层以离散云量数据作为基础，提供了日照百分率和清晰度指数两种系数来计算水平面辐射。最长数据流经过插值计算、日照模型、清晰度模型、辐射模型四个步骤，最终得到直射、散射、总辐射、地形修正辐射等多种辐射数据。四个步骤的详细过程如下：

1）系统是采用从DEM提取出的开阔度和省经纬度数据作为基准点，所以离散云量使用的地理坐标系（WGS84）与DEM中的地理坐标系（GCS_WGS_1984）不同。为了将云量转换到基准坐标系上，系统从离散云量中取出距离基准点最近的四个云量值插值计算，得到省经纬度下的标准云量数据。

2）根据云量与日照百分率良好的负相关关系，建立日照百分率估算模型，为一元线性拟合。具体公式如下：

$$SR_g = a + b \cdot CL$$

其中，SR_g为日照百分率；CL为对应经纬度下的云量值；a、b为气象站实测数据通过预处理层反演得到的系数[11]。

3）与日照百分率计算模型相似，根据日照百分率与清晰度的负相关性，利用反演得到的清晰度模型系数，进一步计算出清晰度指数[12]。

4）辐射模型主要用于求解总辐射、直接辐射、散射辐射和地形修正辐射。系统利用太阳总辐射气候学评估方法，以日照百分率作为基础，建立水平面太阳总辐射模型[13]。使用日照百分率和清晰度指数资料，采用成分分解法建立水平面太阳直接辐射模型。利用水平面直接辐射、散射辐射与总辐射的闭合关系，在散射辐射各向异性的情况下，建立太阳散射辐射模型[14]。利用开阔度与直接辐射的线性关系，建立地形修正辐射模型[15]。

图3给出了2014—2016年3年平均的四川7个辐射站总辐射模拟结果与实测结果的对比。7个站点依次对应甘孜（31.37°N，100.00°E）、红原（32.48°N，102.33°E）、绵阳（31.27°N，104.45°E）、成都（30.40°N，104.01°E）、峨眉山（29.31°N，103.20°E）、攀枝花（26.35°N，101.43°E）、纳溪

（28.77°N，105.38°E）。由于站点所处的海拔不同，模拟数据与实测数据会有一些波动，但模拟数据依然能够较为准确地反映实际辐射状况。

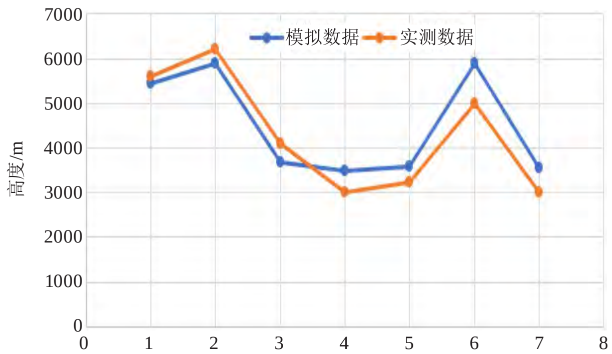

图3 辐射模拟数据与实际数据对比

Fig.3 Comparison of radiation simulation data with actual data

2.2 数据成图与发布

得到的各类数据主要提供给查询分析系统使用，在给查询分析系统使用之前，还需要进行数据可视化处理。平台使用ArcGIS将数据制作成地图影像进行可视化，发布为ArcGIS Server，通过ArcGIS Server提供不同的API给查询分析系统，实现数据的可视化查询。

得到地图影像需要将所有数据转换为栅格数据，存储栅格文件到ArcGIS空间数据库。数据处理子系统中的数据文件统一以表格格式存储（.csv），平台先将数据文件转换为shapefile文件格式（.shp），然后转换为栅格文件，最后保存文件到工作空间。ArcGIS Server通过ArcGIS Desktop中的ArcCatalog来管理，使用agsadmin组中的账户登陆，再发布工作空间中的影像数据。

针对以上的每一个操作，ArcGIS都提供了相应的Python接口，平台使用Python让这些操作联系起来，使得整个成图和服务发布的流程自动化[16]。

3 查询分析子系统设计

3.1 主要功能

查询分析子系统主要功能如下：

1）模拟分析功能。在地图上的位置模拟光伏电站，统计在该位置的各类辐射数据。通过计算不同倾角下的斜面辐射量，分析出光伏电站对太阳能资源的利用情况。

2）站所数据管理功能。对省内的辐射站、气象站、光伏电站的实测历史数据进行管理，便于用户对实测数据的查询和分析。

3）图层管理功能功能。对每一个月的影像数据进行分层管理，方便用户进行对比和分析。

4）管理用户信息功能。对系统管理提供了管理用户、导出平台数据等功能。

此外，还有一些常用的地理信息系统功能，比如放大、缩小、面积量算等操作，以及指定行政区、地名、显示背景地图等简单功能。

3.2 架构设计

查询分析子系统总体上分为数据层、逻辑层、应用层等三层架构（图4）。

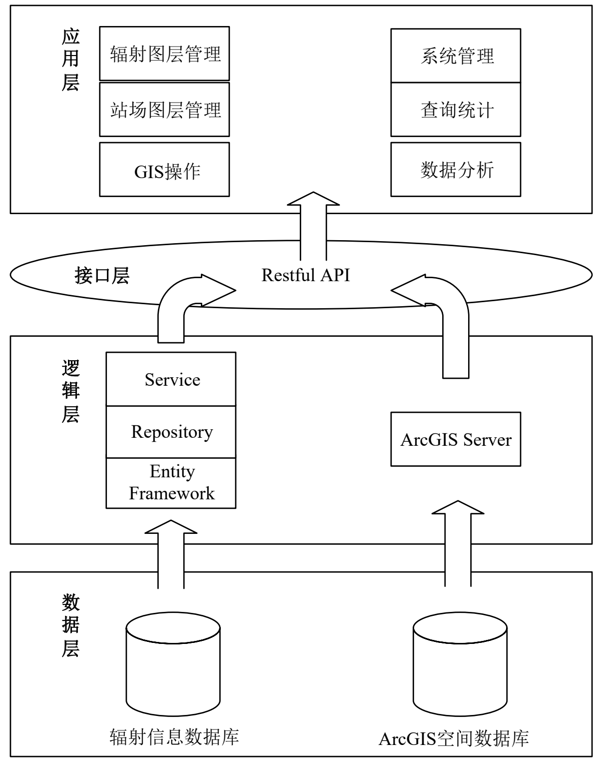

图4 查询分析系统架构

Fig.4 Architecture of the query analysis subsystem

在数据层中，通过辐射信息数据库和ArcGIS空间数据库存储数据。辐射信息数据库使用MySQL存储观测站历年数据、处理后的辐射相关数据和用户信息；ArcGIS空间数据库存储ArcGIS工作空间中的栅格影像数据。

逻辑层分包含两条业务流，一条业务流使用ASP.NET MVC框架，实现数据查询、用户管理等业务逻辑。在ASP.NET MVC架构中，使用EF（Entity Framework）对数据库进行访问，经过Repository逻辑处理提供服务。另一条业务流使用ArcGIS Server，完成GIS相关的交互逻辑。逻辑层的两个服务，分别提供不同的restful API给应用层，实现与应用层的交互。

应用层负责界面交互，根据用户的操作，调用不同的Restful API。要在保证界面美观、简洁的同时，还要让平台具备较好的兼容性。

4 关键技术实现

数据处理子系统需要三年及以上的数据量作为基础，以确保数据的可靠性和准确性。按照程序正常计算速度，完成这个数据量的处理，至少需要3天时间。平台进一步采用Qt多线程解决这一问题，让一个程序同时处理多个文件，极大地缩短了数据处理时间。在实际插值计算时，使用了三年云量数据，一天的存储量约60万条。正常速度下，计算一个月的平均云量需要6 h，处理完成所有数据则需要72 h。使用Qt多线程之后，将一台机器设置6个线程，处理完成所有的数据只需要12 h，将数据处理时间缩短了6倍。

在数据查询分析子系统中，前端采用Dojo Toolkit做开发，Dojo使开发HTML和JavaScript Web应用变得更为容易，解决了很多Web 应用普遍存在的跨浏览器不兼容的矛盾。更为重要的是，ArcGIS提供的Web开发库ArcGIS API for JavaScript是基于Dojo的。后端使用了C#开发，采用语言集成查询（Language Integrated Query）方法访问MySQL数据库。

ArcGIS Server和MVC服务通过Windows 的IIS发布，访问服务地址即可进入平台。图5a～5c 的太阳能板图标模拟了新增的光伏电站，模拟的电站会给出一年内的各类辐射数据的变化情况，提供表格和柱状图等多种展示方式（图6）。其还给出了理论最佳倾角作为参考，提供不同倾角下的辐射数据计算工具。通过计算结果，帮助用户分析光伏电站的太阳能资源丰富程度，评估出光伏电站建设完成后的发电效率。

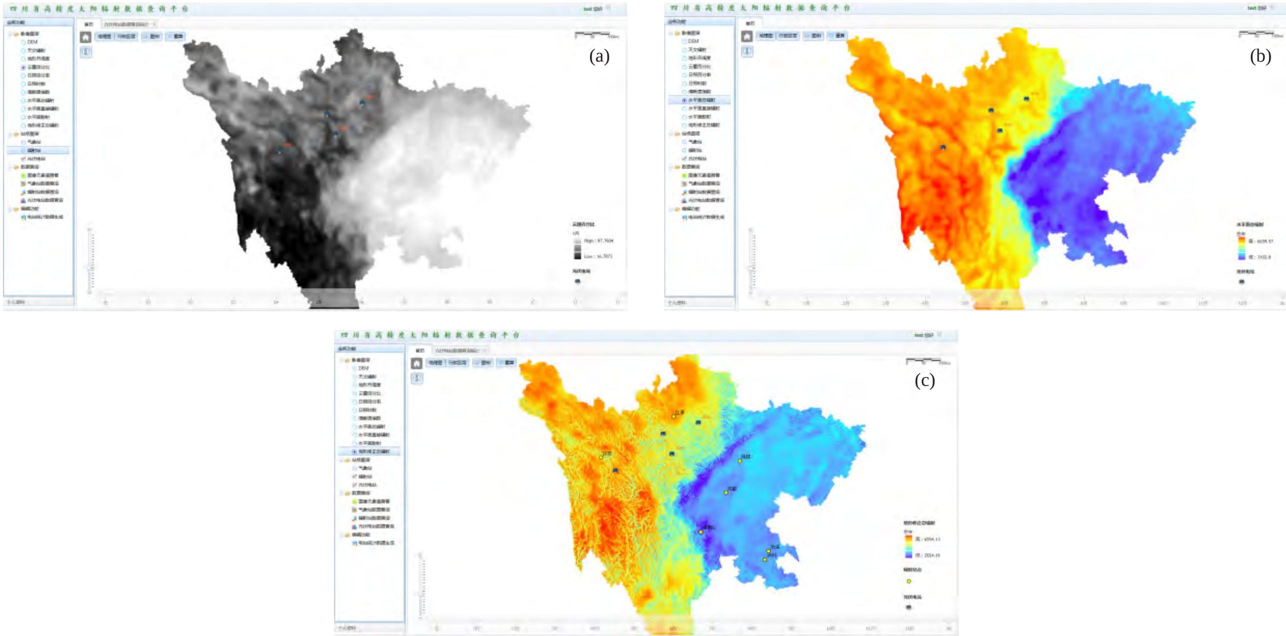

图5 云量图层（a）、水平面总辐射图层（b）和地形修正辐射图层（c）
Fig.5 Cloud amount layer (a), total radiation layer of the horizontal plane (b), and terrain correction radiation layer (c)

5 结论

平台是辅助省级光伏数据分析的专业系统，采用MODIS遥感数据、气象站和辐射站数据等，以较高精度模拟出了全省的太阳辐射分布情况。具备辐射相关数据的管理能力，实现了辐射相关数据的存储、统计、分析、可视化等功能。

目前，平台采用了四川省7个辐射站从1994年至今的观测数据、157个气象站建站以来的气象数据、2014—2016年MODIS云量数据，在四川省建成并投入业务运行一年多的时间。各个部分的功能模块运行稳定、可靠，平台的计算结果得到了四川省电力系统评审的认可，取得了良好的应用效果。

参考文献

[1] 中国气象局. 太阳能电站项目选址评估技术指南. 北京:中国气象局, 2012.
[2] 黄毅梅, 陈跃, 周毓荃, 等. 基于ArcGIS的人工影响天气综合分析平台. 气象, 2007, 33(12): 116-120, 140.
[3] 刘旭林, 赵文芳, 刘国宏. 基于WebGIS的气象信息显示和查询系统. 应用气象学报, 2008, 19(1): 116-122.
[4] 董妍, 陈闯, 李星敏, 等. 秦岭大气科学试验基地气溶胶综合观测平台. 气象, 2018, 44(3): 449-454.
[5] Louche A, Notton G, Poggi P, et al. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. Solar Energy, 1991, 46(4): 261-266.
[6] Rehman S, Ghori S G. Spatial estimation of global solar radiation using geostatistics. Renewable Energy, 2000,21: 583-605.
[7] Andrzej Z, Kotarba. A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations. Journal of Atmospheric Research, 2009, 92: 522-530.

（下转68页）

次的实景天气观测系统，为气象、媒体、旅游、交通等多行业提供实景天气直播和本地气象数据采集功能于一体的整体解决方案。

4.2 打造全新视频产品加工平台实现产品自动化生产

目前，实景天气采集系统已形成全新视频产品加工平台，实现产品自动化生产，负责视频资源自动合成处理（水印添加、标题条添加等）、快速播放视频制作设置、延时视频自动生成、图片采集频次设置、天气日历生成配置、短视频制作等，可应用于气象图文类节目业务生产，为融媒体内容生产提供基础支撑。

4.3 创立气象媒资众筹新概念支撑全媒体气象服务

积极与地方气象部门、中国铁塔公司等单位进行沟通，共建实景天气采集系统。逐步形成了天气网眼的规模化部署，为社会化观测资源的扩展和后续视频大数据应用提供了基础支撑。并积极参与中国气象局综合观测司组织的社会化观测行动，完成《志愿气象观测行动计划（2018—2020年）》和《社会气象观测发展指导意见》的编制工作。

实景天气采集系统加工生产的媒资资源可满足电视媒体、网站和移动新媒体等不同媒体的实际需求，进行产品开发及设计制作，实现产品营销和媒资运营。创立气象媒资众筹新概念，为社会化观测提供有效采集与汇传渠道，可用于解决气象灾害报道素材和气象信息服务数据支撑不足的难题。

4.4 实景天气服务产品接入国家级业务平面

实景天气系统相关产品也主动与中国气象局实时业务系统对接：2018年6月，天气网眼入驻国家信息中心天镜系统；12月，实景天气直播视频流接入中央气象台会商室，同时实景天气图片与中央气象台Micpas系统4.5版本进行对接，为预报员天气分析和业务服务提供现场第一手素材，服务于实时业务。

参考文献

[1] 杨涛, 张常亮, 朱墨. 地面气象观测场实景监控系统设计. 成都信息工程学院学报, 2013(4): 336-340.
[2] 李珍, 贾晨刚. 基于流媒体技术的实景监测系统在气象系统中的应用. 中国科技博览, 2005(5): 266 -266.
[3] 梁海河, 孟昭林, 张春晖, 等. 综合气象观测运行监控系统. 气象, 2011, 37(10): 1292 -1300.
[4] 江旭东, 黄云峰. 上海市气象局天气实景监测系统. 第四届长三角科技论坛论文集（下册）, 2007(11): 529-532.
[5] 王昊, 杨雷, 张大为, 等. 基于Internet的远程视频监控在自动站观测系统中的应用. 气象与环境学报, 2009, 25(4): 58-60.
[6] 沈萍月, 马琰钢. 基于Google Maps的“全球眼”视频监控系统的气象应用. 气象科技, 2013, 41(2): 274-277.

（上接57页）

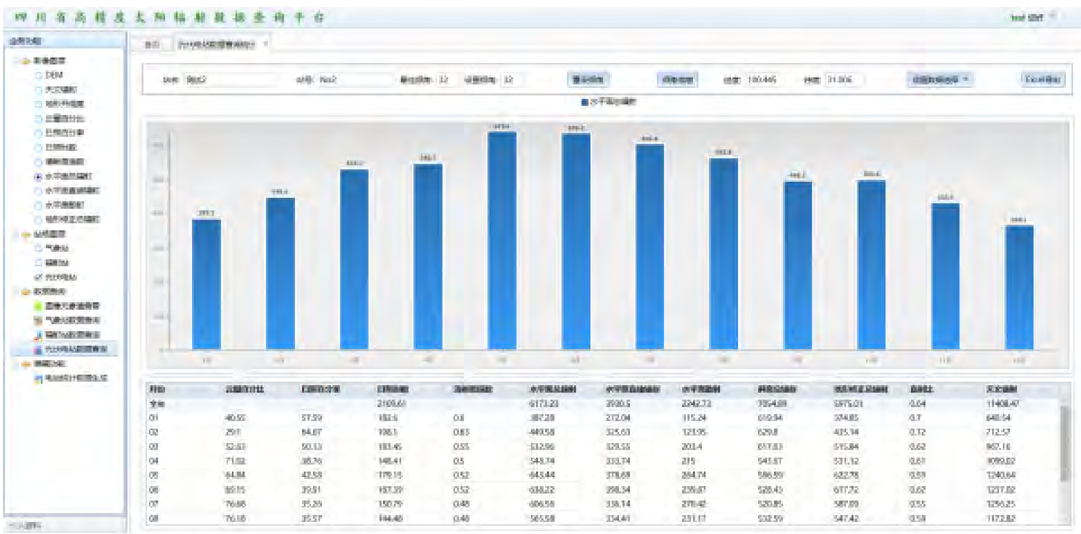

图6 模拟光伏电站辐射分析
Fig.6 Radiation analysis of simulated photovoltaic power station

[8] Rossow W B, Walker A W, Garder I C. Comparison of ISCCP and other cloud amounts. Journal of Climate, 1993, 6: 2394-2418.
[9] 翁笃鸣, 韩爱梅. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析. 应用气象学报, 1998, 9(1): 32-37.
[10] 白建辉, 王庚辰. 影响太阳总辐射各主要因子的分析. 高原气象, 1994, 13(4): 683-884.
[11] 王可丽, 江灏, 陈世强. 青藏高原地区的总云量——地面观测、卫星反演和同化资料的对比分析. 高原气象, 2001, 20(3): 252-257.
[12] 魏丽, 钟强, 侯萍. 中国大陆卫星反演云参数的评估. 高原气象, 1996, 15(2): 147-156.
[13] 李占清, 翁笃鸣. 丘陵山地总辐射的计算模式.气象学报, 1988, 46(4): 461-468.
[14] Wong L T, Chow W K. Solar Radiation Model. Applied Energy, 2001, 69: 191-224.
[15] 李新, 程国栋, 程贤章, 等. 任意地形条件下太阳辐射模型的改进. 科学通报, 1999, 44(9): 993-998.
[16] 何丽娴, 甘淑, 陈应跃. 基于Python语言的空间数据处理. 价值工程, 2014(36): 207-208, 209.