引文格式：罗建勋,刘卫华,李剑锋,等. 青藏高原电离层TEC时空特性及其对太阳活动的响应[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 114-118. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2024.12.026

青藏高原电离层TEC时空特性及其对太阳活动的响应

罗建勋[1]，刘卫华[1]，李剑锋[2*]，邓力铭[1]，周田园[1]，姜　铭[2]
（1. 中国五冶集团有限公司，四川 成都 610063；2. 成都信息工程大学 资源环境学院，四川 成都 610225）

摘　要：近年来，我国在青藏高原地区开展一系列重大工程建设，对GNSS（global navigation satellite system）高精度位置服务提出更高的要求。本研究旨在探明青藏高原地区特有的下垫面与底层大气活动特征是否导致电离层表现出的特点。利用GNSS电离层探测技术，对2014-2020年青藏高原地区的电离层活动特征进行了分析，探究了电离层TEC（total electron content）的时空特性及其对太阳活动的响应。结果显示：青藏高原地区春季和夏季TEC总体上高于秋季和冬季，电离层TEC与太阳活动指数F10.7 p的相关系数达0.84，呈强相关性，表明青藏高原地区电离层活动受太阳活动的影响显著。与同纬度的成都地区相比，青藏高原地区的TEC在夜间、上升和下降阶段吻合较好，但在峰值区域存在显著差异，峰值TEC较成都地区高5~10 TECU。

关键词：GNSS；青藏高原；大气延迟；电离层探测；时空特性
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）12-0114-05

Spatio-temporal Characteristics of Ionosphere TEC in the Qinghai-Xizang Plateau and Its Response to Solar Activity

LUO Jianxun[1], LIU Weihua[1], LI Jianfeng[2], DENG Liming[1], ZHOU Tianyuan[1], JIANG Ming[2]
(1. China MCC Group Co., Ltd., Chengdu 610063, China;
2. Faculty of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to investigate whether the unique characteristics of underlying surface and underlying atmospheric activity in the Qinghai-Xizang Plateau region leading to the unique ionospheric behavior, we used GNSS ionospheric detection technology to analyze the ionospheric activity in the Qinghai-Xizang Plateau region from 2014 to 2020, and explored the spatio-temporal characteristics of total electron content (TEC) in the ionosphere and its response to solar activity. The results show that the TEC in spring and summer are generally higher than that in autumn and winter. The correlation coefficient between the ionospheric TEC and the solar activity index F10.7p is 0.84, showing a strong correlation, indicating that the ionospheric activity in the Qinghai-Xizang Plateau region is significantly influenced by solar activity. Compared with Chengdu at the same latitude, the TEC in the Qinghai-Xizang Plateau region matches well in the nighttime, rising, and falling stages, but there are significant differences in the peak area, with the peak TEC being 5~10 TECU higher than in Chengdu.

Key words: GNSS, the Qinghai-Xizang Plateau, atmospheric delay, ionospheric sounding, spatio-temporal characteristic

我国在青藏高原地区开展诸如川藏铁路、西电东送、白鹤滩电站等重大工程建设。高精度的位置基准是保障工程施工及营运的关键因素之一[1-5]，这给GNSS精密定位提出了更高的要求。为了削弱GNSS大气误差，提高位置服务质量，有必要探明青藏高原地区的电离层活动特征[6-8]。电离层TEC（total electron content）是衡量电离层延迟的一个重要指标，如果能准确地探测电离层的TEC含量、活动规律及其对空间天气的响应特征，有助于对电离层延迟进行修正，从而提高GNSS的定位精度[9-15]。

1　TEC反演理论及实验策略

1.1　GNSS电离层TEC反演理论

根据GNSS定位原理，利用双频或多频GNSS观测数据即可以获得原始电离层观测信息。根据Appleton-Hartree公式可以推导出电离层相位延迟和码延迟，在实际应用中一般忽略电离层延迟的高阶项。

收稿日期：2023-08-23。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2021YFB3901400）；四川省科技计划资助项目（2023NSFSC0266）；成都信息工程大学科研基金资助项目（KYTZ202114）。
第一作者简介：罗建勋（1981—），本科，高级工程师，研究方向为GNSS精密位置服务及工程应用，E-mail：21955337@qq.com。
通信作者：李剑锋（1985—），博士，讲师，研究方向为GNSS电离层探测及空间天气，E-mail：lijianfeng_ljf@126.com。

$$\delta\rho_{\mathrm{ion},c}=-\delta\rho_{\mathrm{ion},p}=\frac{40.28}{f^2}\mathrm{STEC} \tag{1}$$

式中，$\delta\rho_{\mathrm{ion},c}$ 为电离层码延迟；$\delta\rho_{\mathrm{ion},p}$ 为电离层相位延迟；f 为信号频率；STEC 为信号斜路径上的电子总含量。为了消除误差，通过频率间差分可以构建无几何影响的观测值，如式（2）和式（3）。

$$\left(P_j^i\right)_4=\left(P_j^i\right)_1-\left(P_j^i\right)_2=40.28\times\left(\frac{1}{f_1^2}-\frac{1}{f_2^2}\right)\times \mathrm{STEC}+\mathrm{DCB}^i+\mathrm{DCB}_j+\xi_P \tag{2}$$

$$\left(L_j^i\right)_4=\left(L_j^i\right)_1-\left(L_j^i\right)_2=-40.28\times\left(\frac{1}{f_1^2}-\frac{1}{f_2^2}\right)\times\mathrm{STEC}-\lambda\left[\left(b_j^i\right)_1-\left(b_j^i\right)_2\right]-\lambda\left[\left(N_j^i\right)_1-\left(N_j^i\right)_2\right]+\xi_L \tag{3}$$

式中，DCB 分别为卫星和接收机的差分码偏差；b 为卫星和接收机的硬件相位偏差；ξ 为多路径效应、观测噪声等误差组合；N 为模糊度；λ 为波长；P 为伪距观测值；L 为载波相位观测值。由于伪距观测值噪声远大于载波相位观测值，但其不受模糊度条件制约。因此，可以应用载波调平码方法，得到相位平滑伪距观测值$P_{4,\mathrm{sm}}$，如式（4）。

$$\begin{cases}P_{4,\mathrm{sm}}(t)=\varpi_t P_4(t)+\left(1+\varpi_t\right)P_{4,\mathrm{prd}}(t),(t>1)\\ P_{4,\mathrm{prd}}(t)=P_{4,\mathrm{sm}}(t-1)+\left[L_4(t)-L_4(t-1)\right],(t>1)\end{cases} \tag{4}$$

式中，t为历元数；ϖ为与历元相关的权重因子，结合前式，可以得到相位平滑伪距观测值的表达式，如式（5）。

$$P_{4,\mathrm{sm}}=40.3\times\left(\frac{1}{f_1^2}-\frac{1}{f_2^2}\right)\times\mathrm{STEC}+\mathrm{DCB}^i+\mathrm{DCB}_j \tag{5}$$

式中，i 为卫星号；j 为测站号。在电离层单层模型假设下，倾斜路径电子含量需要转换为穿刺点处垂直总电子含量（vertical total electron content，VTEC），如式（6）。

$$\begin{cases}\mathrm{VTEC}=M\left(Z^{'}\right)\times\mathrm{STEC}\\ M\left(Z^{'}\right)=\cos\left[\arcsin\left(\dfrac{R_e}{R_e+H}\cos E\right)\right]\end{cases} \tag{6}$$

式中，M 为投影函数；$Z^{'}$ 为穿刺点的天顶距；R_e 为地球平均半径；H 为电离层薄层假设的高度，一般为300~500 km；E 为卫星高度角。最终可以得到电离层VTEC的函数表示，如式（7）所示。

$$\mathrm{VTEC}=\cos\left[\arcsin\left(\frac{R_e}{R_e+H}\cos E\right)\right]\times\frac{f_1^2f_2^2}{40.309\left(f_2^2-f_1^2\right)}\times\left(P_{4,sm}-\mathrm{DCB}^l-\mathrm{DCB}_j\right) \tag{7}$$

GNSS电离层二维建模以TEC为研究对象。假设电离层自由电子集中在某一指定高度无限薄的球面上，然后对该球面上的TEC分布进行建模。二维模型建模方法多采用函数法，常用的函数有球谐函数、多项式函数、三角级数函数、球冠谐函数等。其中，使用多项式函数进行建模在小区域范围内具有较好的精度和适用性。

$$\mathrm{VTEC}=\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=0}^{m}E_{ik}\left(\varphi\varphi_0\right)^i\left(S-S_0\right)^k \tag{8}$$

式中，m 和 n 为多项式模型的阶数；E_{ik} 为多项式模型的系数；φ 和 φ_0 分别为穿刺点处和拟合区域中心的地理维度 S 和 S_0 分别为穿刺点处和你和区域中心的太阳时角。

1.2　实验数据与策略

基于地基CORS观测数据对青藏高原地区的电离层TEC进行反演，研究区区域范围为10°~60°N，70°~140°E，观测数据包括西藏CORS部分测站以及四川CORS川西高原地区部分测站，共24个高海拔测站，以及成都CORS的6个低海拔测站，测站分布如图1所示。观测数据均包括GPS、Galileo、BDS的多星座数据，采样频率为30 s，卫星高度截止角为15°。采用相位平滑伪距法反演电离层TEC，电离层单层模型高度设置为450 km，并采用4阶多项式函数模型（见式8）同步估算TEC和硬件延迟。

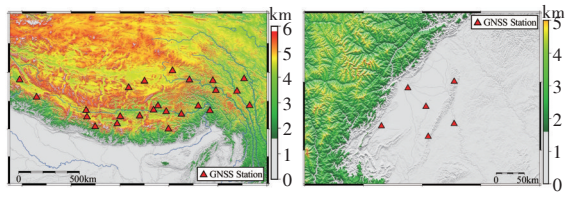


图1　青藏高原地区和成都地区的CORS测站分布图

审图号：GS(2020)4619

通过解算青藏高原地区的TEC，分析其时间变化趋势和空间分布特征，并与同纬度的成都地区的电离层活动特征进行对比，探究研究区域电离层活动的差异性特征。同时，分析了2014—2020年青藏高原地区TEC活动规律与太阳活动指数（F10.7）的相关性，探索了研究区域TEC对太阳活动的响应特征。

2　青藏高原地区TEC时空特性

2.1　时间特性

2.1.1　周日特性

考虑到夏季太阳辐射强度较高，电离层周日活动特征更为显著，本文利用西藏CORS 2020年7月

18日—28日（Doy200~210）连续10 d的观测数据反演TEC，分析了电离层的周日特性，并将同纬度的成都地区作为对照实验。TEC的其时间序列如图3所示。图2中红色线条为青藏高原地区天顶方向TEC时间序列，黑色线条为成都地区天顶方向TEC时间序列。

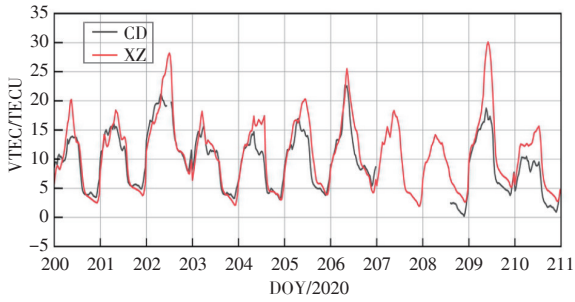


图2 电离层TEC日变化分析对比图

从图2中可以看出，成都地区和青藏高原地区电离层VTEC周日变化趋势基本一致，呈现显著的周期性特征，日间电子浓度先增加，达到峰值后开始降低，而夜间变化平缓。另外，从每日的VTEC的最大值可以发现，青藏高原地区的峰值VTEC比成都地区峰值更高，约高出5~10个TECU。

2.1.2 季节性特征

分别选择2014年与2019年不同季节的TEC作为分析对象，并绘制不同季节的TEC的日均值，如图3所示。

在太阳活动高年（2014年），春季的TEC值最大，秋季次之，接着是冬季，夏季最低。春季、秋季和冬季TEC浓度显著升高，在不同季节均呈现出与太阳活动低年的明显差异。在太阳活动低年（2019年），由于太阳活动较弱，各季节的TEC含量基本一致。2019年冬季的TEC值在4个季节中最小，符合电离层常规特征。

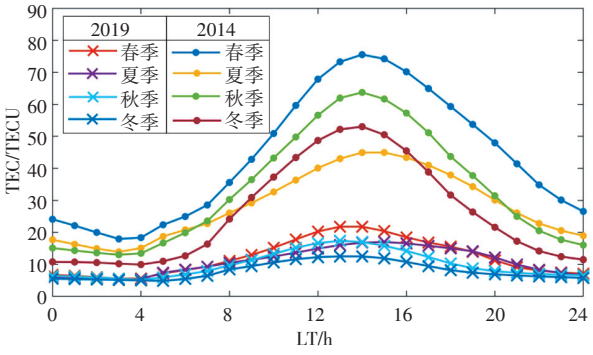


图3 2014年与2019年各季节的日间变化

为了探究研究区域日间及夜间的电离层差异，结合研究区域的地方时将电离层TEC分为日间和夜间两部分，并绘制2014年和2019年的TEC昼夜比，如图4所示。

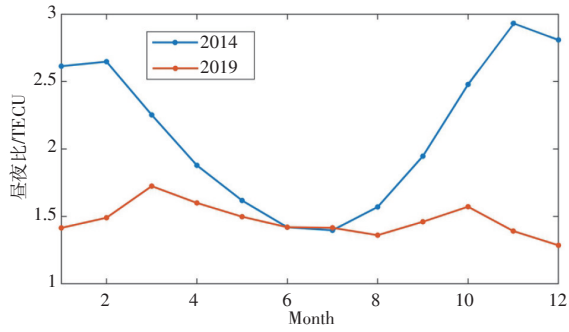


图4 2014年与2019年的TEC昼夜比

2.2 空间特性

由于现有电离层模型均存在一定的模型误差，为了客观展示青藏高原地区电离层TEC的空间分布特征，直接使用每颗卫星的穿刺点（ionospheric pierce point，IPP）的TEC来反映不同季节的电离层空间分布特征。图4~6分别展示了青藏高原地区2020年4个季节分别在日间（LT 14：00）、夜间（LT 23：00）的TEC空间分布，图中三角形表示北斗同步轨道卫星（GEO）的穿刺点，圆点表示非同步轨道卫星的穿刺点。

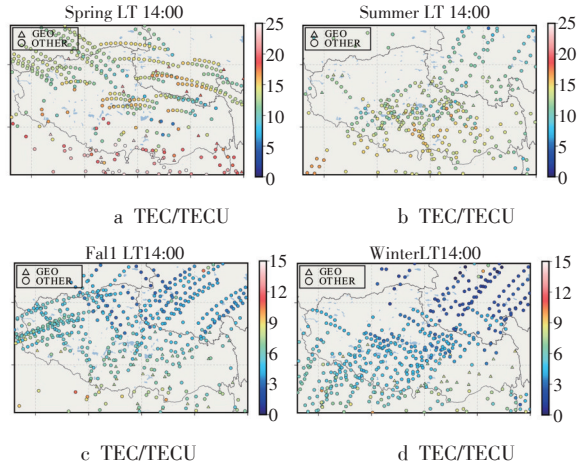


图5 2020年不同季节日间的TEC空间分布

审图号：GS(2020)4619

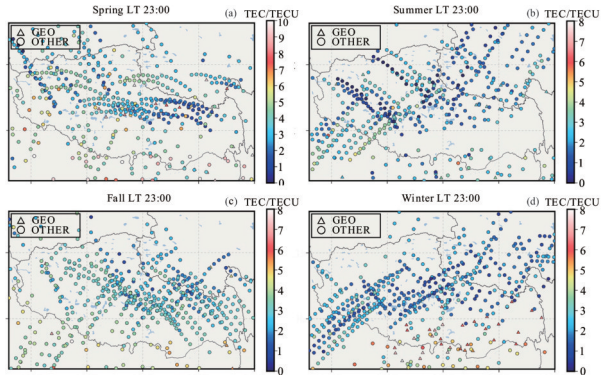
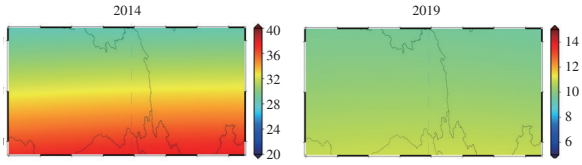


图6 2020年不同季节夜间的TEC空间分布

审图号：GS(2020)4619

如图5和图6所示，青藏高原地区4个季节的TEC

空间分布符合电离层日变化特征——日间TEC浓度高于夜间，且春、夏季节的TEC浓度显著高于秋、冬季节。在空间上也大体呈现出南高北低的趋势，总体上符合电离层随纬度降低而升高的变化趋势。表明青藏高原地区的电离层TEC在空间分布上没有显著的区域性特征。



a TECU　　b TECU

图7　青藏高原2014与2019年TEC均值的空间分布

审图号：GS(2020)4619

同样，利用IGS电离层分析分析中心CODE的GIM产品，对比了太阳活动高年（2014）和太阳活动低年（2019），青藏高原地区TEC均值的空间分布，如图7所示。可以发现，无论是太阳活动高年还是低年，研究区域的TEC均随纬度降低而增大。此外，2014年为TEC均值约30~40 TECU，而2019年的TEC在仅约10 TECU，亦表明太阳活动高年的TEC浓度显著高于太阳活动低年。

3　TEC对太阳活动的响应

为了研究电离层TEC的变化对太阳活动的响应，分析了连续多年的太阳活动指数F10.7p（太阳的10.7 cm波段辐射通量，单位：sfu）与电离层TEC的变化趋势，如图8所示。

从图8可知，从2014—2020年，F10.7p指数和TEC均呈现整体下降的趋势，但电离层活动表现出更显著的周期性特征。为了进一步分析二者之间的关联特征，利用公式（9）计算了F10.7p指数和TEC之间的相关系数，并绘制出两者的散点图，如图9所示。

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i-X)(Y_i-Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i-X)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(Y_i-Y)^2}} \tag{9}$$

图9中，红色直线为F10.7p指数和TEC的散点分布拟合线，二者的相关系数R达到了0.84，满足强相关性特征（$0<R\le0.5$：弱相关，$0.5<R\le0.8$：显著性相关，$0.8<R\le1$：强相关）。表明青藏高原地区的电离层活动与太阳活动有显著的内在关系，即太阳活动能够显著驱动该地区的电离层变化。

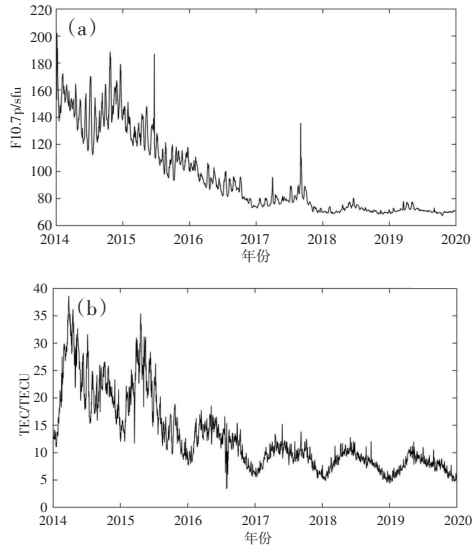


图9　2014至2020年F10.7p与TEC日均值变化曲线

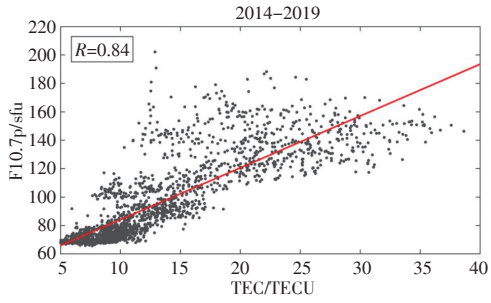


图10　太阳活动F10.7p与青藏高原地区TEC的相关性

4　结　论

为了服务于青藏高原地区的重大工程建设，提高GNSS位置服务质量，利用2014–2020年观测数据分析了青藏高原地区电离层的时空特征及其对太阳活动的响应，从而为构建适用于青藏高原区域的精细化电离层模型奠定基础。相关研究结论如下：

1）青藏高原地区的TEC在夜间、上升和下降阶段均与同纬度的成都地区吻合较好，但在峰值区域存在显著差异，峰值TEC较成都地区高5~10 TECU。

2）青藏高原地区春季和夏季TEC总体上高于秋季和冬季，在空间上也大体呈现出南高北低的趋势，总体上符合电离层随纬度降低而升高的变化趋势。

3）研究区域电离层TEC与太阳活动指数F10.7p的相关系数达0.84，呈强相关性，表明该地区电离层活动受太阳活动的影响显著。在太阳活动高年，青藏高原地区电离层电子浓度显著增加，依然表现出与太阳活动较强的关联性。

总之，青藏高原地区的电离层活动除了满足中纬

度地区电离层的普遍特征外，还表现出特有的电离层行为特征：TEC的每日峰值较同纬度区域显著升高。因此在对青藏高原地区的TEC模型进行精化时，有必要考虑该区域的特殊性。

参考文献

[1] 吴风波,吴仁攀,任晓东. 综合多种方法分析中国区域TEC时空变化特征[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(5):75-81

[2] 孙伟,乔炜,周凯,等. 基于地基GPS的武汉地区电离层TEC建模和变化分析[J]. 城市勘测,2016(4):114-118

[3] 廖章回,吴北平,申兴林,等. 广西及周边地区电离层时空特性分析[J]. 测绘科学,2018,43(9):40-45

[4] 靳婷婷,丁克良,王喜江,等. 京津冀地区电离层时空特性分析[J]. 测绘科学,2020,45(8):57-63

[5] 张松. 成都上空电离层特性分析[D]. 成都:电子科技大学,2021

[6] 徐振中,王伟民,张韧,等. 第23太阳活动周武汉站电离层TEC特征分析[J]. 空间科学学报,2013,33(1):28-33

[7] 邓忠新,冯健,甄民,等. 南极长城站周边地区电离层TEC变化特性[J]. 电波科学学报,2015,30(5):951-958

[8] 严志文,李征,杨腾飞. 基于GNSS数据的地震电离层扰动探测分析[J]. 地理空间信息, 2022, 20(4):134-138

[9] 王睿,黄张裕,卞晓晨,等. 基于BDS三频数据的周跳探测与修复[J]. 地理空间信息, 2019, 17(3):48-50

[10] 严悦. 电离层残差法探测与修复周跳特性分析[J]. 地理空间信息, 2010, 8(4):118-120

[11] Mao T, Wan W, Yue X, et al. An Empirical Orthogonal Function Model of Total Electron Content over China[J]. Radio Science, 2008, 43(2):35-39

[12] Bouya Z, Terkildsen M, Neudegg D. Regional GPS-based Ionospheric Tec Model over Australia Using Spherical Cap Harmonic Analysis[C]// Cospar Scientific Assembly,2010

[13] Habarulema J B, Mckinnell L A , Opperman B D L. TEC Measurements and Modelling over Southern Africa During Magnetic Storms: a Comparative Analysis[J]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics, 2010, 72(5-6): 509-520

[14] Lean J L, Meier R R, Picone J M, et al. Ionospheric Total Electron Content:Global and Hemispheric Climatology[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics, 2011, 116, A10318. DOI:10. 1029/2011JA016567

[15] Kowski N J, Que M M H, Yer C M. A New Global TEC Model for Estimating Transionospheric Radio Wave Propagation Errors[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(12):965-974

（上接第97页）

tation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(18):5 186-5 214

[20] Song S, Liu J, Pu H, et al. The Comparison of Fusion Methods for Hsrrsi Considering the Effectiveness of Land Cover (Features) Object Recognition Based on Deep Learning [J]. Remote Sensing, 2019, 11(12):1 435

[21] Dalla Mura M, Vivone G, Restaino R, et al. Global and local Gram-schmidt Methods for Hyperspectral Pansharpening[C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2015:37-40

[22] 宋师然. 高分遥感城市建筑物对象化识别方法研究[D]. 北京:北京建筑大学,2020

[23] 于秩彬,王春芳,周钊正,等. 青岛地区四季天气对光伏发电量的影响[J]. 广东电力,2019,32(6):48-54

[24] 轩振华. 泰州地区粉土路基填筑技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2012

[25] 成驰,陈正洪,孙朋杰. 光伏阵列最佳倾角计算方法的进展[J]. 气象科技进展,2017,7(4):60-65

[26] Klein S A, Theilacker J C. An Algorithm for Calculating Monthly-average Radiation on Inclined Surfaces [J]. 1981: 29-33

[27] 王晋. 光伏建筑一体化在城市住宅中应用潜力的研究[D]. 天津:天津大学,2012

[28] Wei H, Liu J, Yang B. Cost-benefit Comparison Between Domestic Solar Water Heater (DSHW) and Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems for Households in Urban China [J]. Applied energy, 2014, 126:47-55

[29] 苏翠霞,邢艳艳,林奕,等. 我国建筑屋顶光伏应用潜力分析[J]. 浙江建筑,2021,38(3):59-60