

基于HJ-1B的城市热岛季节变化研究 ——以北京市为例

刘 帅¹, 李 琦², 朱亚杰²

(1.燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2.北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要: 基于中国的HJ-1B卫星反演地表温度,通过建立一种2.5维高斯表面模型来对北京城市热岛建模,定量描述热岛的位置、形状和大小,并用这种模型来描述城市热环境及其季节变化。研究发现,北京市热岛效应季节变化明显,夏季市中心形成热岛且强度和范围最大,冬季城区中心变成冷岛。在2009年夏季,北京市热岛区域东西横跨33.92 km,南北横跨40.92 km,面积约为1 090.14 km²。相对的,在冬季,北京市区温度比郊区低,从而形成一个冷岛。研究表明HJ-1B卫星是城市热环境监测中的一个良好的数据源。

关 键 词: 热岛效应;地表温度;HJ-1B;高斯表面模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2014)01-0084-05

由于城市化和工业化,城市热岛已成为21世纪人类面临的最重要的问题之一^[1]。引起热岛效应的原因有很多,比如:辐射表面热性能的差异,密集的交通网络、楼宇和停车场阻止不透水层的蒸腾作用,人为的热排放,以及地表粗糙度的增加阻止热量散失等等^[2-4]。

近20 a来,国内外许多专家利用地面观测或遥感手段对热岛效应进行大量研究,取得了一定的进展^[4-10]。地面观测方法的优点是有较长时间的数据记录,但数据空间分布不连续,难以反映热岛的空间分布^[5]。遥感观测的方法能克服地面定点观测的不连续性,提供大面积的连续且同步的观测。自1972年Rao采用热红外遥感技术研究城市区域的热足迹开始,很多相关研究逐步展开^[6-11]。从这些研究可以看出,Landsat和MODIS影像数据是目前监测热岛较常用的数据,但2个卫星传感器的设计限制了它们的应用。Landsat TM/ETM+影像的空间分辨率相对较高,但由于其16 d才能重复观测,受云雾天气影响,实际很难获取所需要的影像,很难满足在对城市热岛进行动态监测的要求。MODIS影像有很高的时间分辨率,但其空间分辨率相对较低,难以精确刻划城市热岛的空间分布。

HJ-1 卫星(Environment and Disaster monitor-

ing and forecasting Satellite constellation)是由2个光学卫星组成的(HJ-1A和HJ-1B),已于2008年9月发射成功。其中的HJ-1B卫星搭载2个宽幅的多光谱CCD相机和一个红外传感器。在中等分辨率卫星中,HJ-1B卫星有较大的幅宽和较短的重复观测周期,比较适合用于研究城市尺度热岛效应。HJ-1B的红外传感器有4个波段,波长从0.75~12.5 μm,其在热红外波段采集的数据幅宽达720 km。通过两个卫星组成卫星星座,HJ-1的重复观测时间仅2 d。上述这些特点使HJ-1卫星在中国生态环境等问题的监测中起到非常重要作用^[12,13]。

本文以北京市为例,尝试利用HJ-1B卫星影像反演并分析北京热岛的时空分布。并且通过高斯模型计算热岛的强度,分布范围。提供利用国产HJ-1B热红外遥感影像用来提取城市地表温度,并用来监测热岛的变化处理流程和方法。为相关机构制定减缓城市热岛的影响提供理论基础和科学依据。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区域

北京市是世界上最大的城市之一,在过去的几十年中经历快速的城市发展。北京市坐落于华

收稿日期:2013-01-25;修订日期:2013-03-08

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAK13B06)、秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(2012023A234)资助。

作者简介:刘 帅(1982-),男,河南周口人,讲师,主要研究方向为资源环境遥感、遥感图像处理。E-mail:liushuai@ysu.edu.cn

北平原北部,全市面积为 16 410.54 km²,人口为 1 755 万。本区域的气候属于温带季风气候,四季分明。夏季湿润多雨,冬季阴冷干燥。年平均温度为 11.8℃,年均降水量为 640 mm,降水量 85%集中在夏季^[14]。植被覆盖率达到 40%,自然保护区的面积占到整个区域面积的 26%,在该地区占主导地位的是落叶阔叶林和温带针叶林。近 20 a 来,中心城市的建成区扩大 223%,人口增加 104%,快速城市化对城市热环境产生很大的影响。通过提取和分析北京市热岛,对理解日益恶化的城市气候问题有重要的意义。

1.2 数据来源及预处理

本文采用的实验数据为北京市 2009 年 12 个月的环境卫星遥感影像数据。从 200 多幅遥感影像中选取其中质量较好的,包括 24 幅 HJ-1B/CCD 的可见光-近红外数据,24 幅 HJ-1B/IRS 的热红外数据,用来反演地表温度。采用其中的 2009 年 4 月 27 日、2009 年 8 月 13 日、2009 年 10 月 22 日、2009 年 1 月 4 日的 CCD 和 IRS 影像建立春、夏、秋、冬的 2.5 维高斯模型。

HJ-1B 卫星的主要参数列在表 1 中,包括 30 m 分辨率的 CCD 数据和 300 m 分辨率的热红外数据。热红外波段的光谱响应函数如图 1 所示。

表 1 HJ-1B 卫星的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of HJ-1B satellite

参数	IR	CCD
幅宽(km)	720	360
空间分辨率(m)	300(10.5~12.5 μm) 150(其余波段)	30
波段	4	4
波长(μm)	0.75~12.5	0.43~0.9
重访周期(d)	4	2 (HJ-1 A/B)

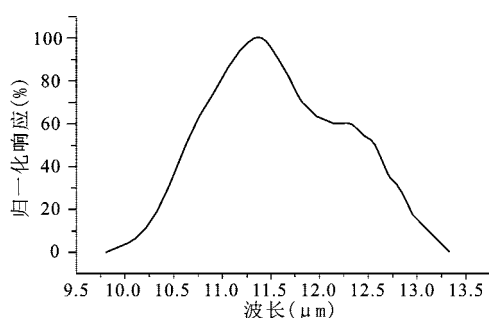


图 1 HJ-1B 热红外波段的光谱响应函数

Fig.1 Spectral response function of HJ-1B thermal band

反演地表温度前要进行一些预处理工作。先

对原始影像进行图像拼接、几何校正、辐射校正,并选择研究区域进行裁剪。遥感图像投影统一为 UTM/WGS84,几何校正的总体误差保持 1 个像素。然后将 DN 值转化为光谱辐射,公式如下:

$$L_{\text{sensor}} = (D_{\text{DN}} - b) / g \quad (1)$$

其中, g 是增益系数, b 是偏移系数, D_{DN} 表示像元的亮度值。HJ-1B 的辐射校正参数来自中国卫星资源应用中心,其中 $g=61.472 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $b=-44.598$ 。从 HJ-1B 的热红外波段提取地表温度需要进行大气辐射校正,本文采用 ENVI-FLAASH 大气校正模块对 CCD 影像和热红外影像进行大气校正。

2 研究方法

2.1 地表温度提取算法

HJ-1B 和 TM5 的热红外波段很相似,同时由于 HJ-1B 只有一个适合的热红外波段用于提取地表温度,在文献[15]提出的单窗算法基础上,针对环境卫星进行改进。地表温度 LST(下式表示为 L_{LST})计算公式:

$$L_{\text{LST}} = \frac{T_B}{1 + (\lambda \times T_B / C) \ln \varepsilon} \quad (2)$$

从上述公式提取 LST,需要 4 个输入参数:亮度温度 T_B 、有效波长 λ 、 C 和地表发射率 ε 。对 HJ-1B 影像, C 是固定的,取 $14\,387.686\,9 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。 T_B 从普朗克定律计算而来,单位是 Kelvin (K):

$$T_B = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[1 + \frac{c_1}{\lambda^5 L_{\text{sensor}}} \right]} \quad (3)$$

对于 HJ-1B 影像, $c_1=1.191\,04 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4)/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, $c_2=14\,387.7 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

λ 是 TIR 波段的有效波长,由下列公式计算^[15]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\int \lambda f(\lambda) d\lambda}{\int f(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

地表发射率(ε)是热能从地表传送到大气的效率, $f(\lambda)$ 表示波谱响应函数。本文采用 NDVI 作为阈值进行提取^[16]。地表可简单看作是由不同比例的植被和裸土组成,这种方法以 NDVI(量符号表示为 N_{NDVI})作为阈值来区分土壤像素($N_{\text{NDVI}} < N_{\text{NDVI}_t}$, N_{NDVI_t} 表示可视作土壤像素的 NDVI 最大值),植被像素($N_{\text{NDVI}} > N_{\text{NDVI}_t}$, N_{NDVI_b} 表示可视作植被像素的 NDVI 最小值),以及植被和土壤的混合像素($N_{\text{NDVI}_t} \leq N_{\text{NDVI}} \leq N_{\text{NDVI}_b}$)。地表发射率由以下公式计算得出:

$$\varepsilon = \varepsilon_v p_v + \varepsilon_s (1 - p_v) + d_\varepsilon \quad (5)$$

式中, ε_v 是植被的发射率, ε_s 是土壤的发射率, d_ε 是自然表面几何分布的影响, 平坦区域可以忽略, p_v 表示植被覆盖率, 由以下公式得出:

$$p_v = \left(\frac{N_{NDVI} - N_{NDVI_s}}{N_{NDVI_v} - N_{NDVI_s}} \right)^2 \quad (6)$$

本文的阈值采用 Sobrino 提出的 $N_{NDVI_v}=0.5$ 和 $N_{NDVI_s}=0.2$ ^[17]。 N_{NDVI} 由 CCD 数据的第 4 波段和第 3 波段计算而来。 $p_v=1$ 表示像元完全由植被覆盖, $p_v=0$ 表示像元完全由裸土覆盖。

2.2 高斯模型的建立

为更好测量热岛的范围和强度, 且能直观的显示热岛的变化, 本文建立一种 2.5 维高斯模型, 通过对遥感影像的测量来得到城市热岛的强度和空间范围。文中主要对北京市单中心热岛进行描述, 将城市分为城区和郊区两大区域, 根据北京城区发展的具体情况, 以北京市五环路为界划分城区和郊区。根据城市热岛的定义, 热岛的像素阈值取郊区地表平均温度加上 1°C ^[18]。城市热岛参数的测量, 这里采用最小二乘方法将热岛表面逼近一个 2.5 维高斯表面^[19]。本文采用 IDL(Interactive Data Language)编程建立模型, 公式如下:

$$T(x, y) = T_0 + A_1 x + A_2 y +$$

$$A_0 \exp\{-(x-x_0)\cos\phi - (y-y_0)\sin\phi\}^2/2a_x^2 - [(x-x_0)\sin\phi + (y-y_0)\cos\phi]^2/2a_y^2\} \quad (7)$$

式中, $2a_x$ 和 $2a_y$ 分别表示热岛的两个轴长, A_0 表示热岛强度。参数 T_0 , A_1 和 A_2 定义了一个二维表面。 x_0 和 y_0 表示热岛的中心位置。旋转 ϕ 是可选的, 可以设置为 0, 使椭圆的长轴和短轴平行于坐标轴的 x 轴和 y 轴。根据城市热岛强度的定义, 热岛强度由以下公式计算:

$$I_{\text{mag}} = I_{\text{max}} - I_{\text{mean}} = A_0 \quad (8)$$

式中, I_{mag} 表示热岛强度, I_{max} 表示高斯表面上的最高温度, I_{mean} 表示郊区的平均温度。热岛所占区域的面积可以由下公式计算:

$$U_{\text{UHI}_{\text{extent}}} = \pi a_x a_y \quad (9)$$

式中, $U_{\text{UHI}_{\text{extent}}}$ 表示热岛覆盖的面积, a_x 和 a_y 分别表示热岛的 2 个半轴长。

3 结果与分析

3.1 北京市热岛空间分布

从图 2 上可以看出北京市存在一个明显的高温区域。在夏季, 地表温度从郊区到市中心逐步

升高, 变化范围从 $28\sim 44^\circ\text{C}$ 。在图中可以发现城区地表温度的峰值主要集中在首都功能核心区(东城、西城)及城市功能拓展区(海淀、朝阳、丰台、石景山), 形成明显的岛型高温区。

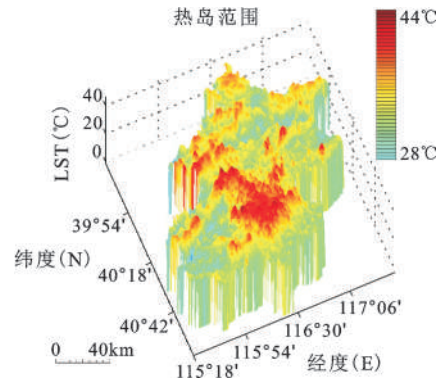


图2 北京市热岛空间分布模式

Fig. 2 3D UHI patterns of Beijing using HJ-1

3.2 城市热岛季节变化趋势

从地表温度的变化趋势来看, 城区和郊区存在着季节有规律的变化趋势。从图 3 可以看出 2009 年北京市城区和郊区的平均地表温度的年度变化。城区和郊区地表温度的差异在 7~8 月达到最大, 有 7.14°C 的温差; 12 月到 1 月, 城区温度约比郊区温度低 3.09°C ; 2~11 月, 城区温度比郊区温度高。夏季热岛强度最大, 冬季城区形成冷岛, 与夏季相比, 其强度和范围都比较小。

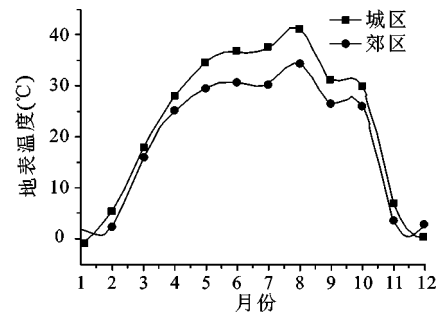
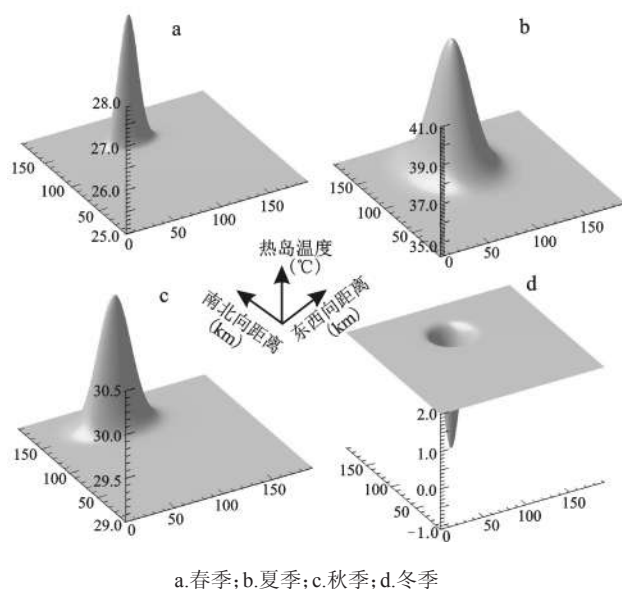


图3 城区与郊区地表温度的季节变化

Fig. 3 Temporal variations of ground temperature in urban and rural area

由于 2.5 维模型比二维平面能更好地展示热岛的形状和位置, 我们用 IDL 创建一系列的 2.5 维网格模型来分析 UHI 及其随季节的变化情况。这种方法不仅能够直观地测量地表热岛效应的影响范围, 而且可以度量热岛的强度。从图 4 可以清楚

地看到北京市夏季热岛的面积和强度是最强的。通过公式(7)和(8)的计算,在夏季,北京市热岛区域东西横跨 33.92 km,南北横跨 40.92 km,面积约为 1 090.14 km²。相对的,在冬季,研究表明北京城区温度比郊区温度低,从而形成一个冷岛,与相关研究比较表明冬季冷岛为北京市冬季的典型现象^[20,21]。春季和秋季热岛的面积介于夏季和冬季之间,分别是 244.87 km²和 500.14 km²。北京的热岛强度在夏季达到最大(6.72℃),其次是秋季(3.71℃),春季(1.52℃)和冬季(-3.09℃)。



a.春季;b.夏季;c.秋季;d.冬季

图4 城市热岛的季节变化

Fig.4 Seasonal variations of the day-time surface UHIs

4 结论与讨论

本文以 HJ-1B 数据反演地表温度,利用 2.5 维高斯模型模拟分析北京市热岛的季节变化,通过本文的研究可以得出以下结论:

1) 北京市热岛现象季节变化明显,热岛强度表现为夏季最强,春、秋次之,冬季形成冷岛。

2) 2.5 维高斯模型能量化的模拟、测量热岛的形状、位置、范围、强度。结果显示北京市夏季热岛的面积和强度是最强的,冬季城区温度比郊区温度低,形成冷岛。目前本文的高斯模型仅对单中心热岛进行描述,在多中心热岛应用方面,可以对每个热岛中心建模,然后再进行叠加。

3) 在中等分辨率卫星中,HJ-1B 在研究城市热岛效应时有较大的幅宽和较短的重访周期。与 Landsat TM 比较,HJ-1B 的热红外波段与其相似,

但影像重访周期缩短为 4 d,影像幅宽增长为 720 km。HJ-1B 的热红外波段反演的温度可以很好地反映一个区域温度场的分布规律,能够为城市热环境质量评价和热源调查提供准确、丰富的信息,为城市规划等决策部门提供宏观数据支持。

参考文献:

- [1] Rizwan A,Dennis L,Liu C.A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island[J].Journal of Environmental Sciences,2008,**20**(1):120-128.
- [2] Oke T R.The energetic basis of the urban heat island[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1982,**108**(455):1-24.
- [3] Pu R,Gong P,Michishita R,et al.Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval[J].Remote Sensing of Environment,2006,**104**(2):211-225.
- [4] Stathopoulou M,Cartalis C.Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece[J].Solar Energy,2007,**81**(3):358-368.
- [5] 张佳华,孟倩文,李 欣.北京城区城市热岛的多时空尺度变化[J].地理科学,2011,**31**(11):1349-1354.
- [6] Gallo K,McNab A,Karl T,et al.The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect[J].Journal of Applied Meteorology,1993,**32**(5):899-908.
- [7] Roth M,Oke T R,Emery W J.Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology[J].International Journal of Remote Sensing,1989,**10**(11):1699-1720.
- [8] 徐永明,覃志豪,朱 焱.基于遥感数据的苏州市热岛效应时空变化特征分析[J].地理科学,2009,**29**(4):529-534.
- [9] Zhang X,Zhong T,Feng X,et al.Estimation of the relationship between vegetation patches and urban land surface temperature with remote sensing[J].International Journal of Remote Sensing,2009,**30**(8):2105-2118.
- [10] Rajasekar U,Weng Q.Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing,2009,**64**(1):86-96.
- [11] 唐 菲,徐涵秋.旧城改造与城市热岛效应关系的遥感研究——以福州市苍霞片区为例[J].地理科学,2011,**31**(10):1228-1234.
- [12] 王 玲,田庆久,包 颖.基于 HJ 卫星 IRS 遥感数据的农作物秸秆火点提取模式研究[J].地理科学,2011,**31**(6):661-667.
- [13] 夏 颢,李云梅,吴传庆.基于 HJ-1 号卫星数据的太湖悬浮物浓度空间分布和变异研究[J].地理科学,2011,**31**(2):197-203.
- [14] Li F,Wang R,Paulussen J,et al.Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing,China[J].Landscape and Urban Planning,2005,**72**(4):325-336.
- [15] Jiménez-Muñoz,Sobrino.A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J].Journal of Geophysical Research,2003,**108**(D22):4688-4697.

- [16] Sobrino J A, Jimenez-Muoz J C, Soria G, et al. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, **46** (2): 316-327.
- [17] Sobrino J. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, **90**(4): 434-440.
- [18] Streutker D. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas[J]. Remote Sensing Of Environment, 2003, **85** (3): 282-289.
- [19] Streutker D. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, **23**(13): 2595-2608.
- [20] 王建凯, 王开存, 王普才. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析[J]. 遥感学报, 2007, **11**(3): 330~339.
- [21] 杨沈斌, 赵小艳, 申双和, 等. 基于 Landsat TM/ETM+ 数据的北京城市热岛季节特征研究[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(4): 427~435.

Study on Seasonal Variation of Urban Heat Island with HJ-1B Satellite Imagery: A Case Study of Beijing

LIU Shuai¹, LI Qi², ZHU Ya-jie²

(1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This article presents an urban heat island retrieval and analysis method with HJ-1B satellite imagery. The study area is Beijing, one of the largest cities in the world, which has experienced a rapid urban expansion over the last two decades. Accelerated urbanization has created serious impacts on its thermal environment. Retrieval and quantitative analysis of UHI patterns in Beijing is significant to understand the worsening urban climate problem in the area. More than 200 HJ-1B images of the study area were acquired and analyzed. Then 48 least-clouded scenes were selected to generate LST maps. The digital number (DN) values of the HJ-1B TIR band were converted from their recorded DN to spectral radiance. In order to perform the extraction, temperature images are created by masking out all areas of clouds and open water. To eliminate atmospheric interference on HJ-1B images, atmospheric correction of the red and near infrared reflectance band of HJ-1 image was carried out using ENVI FLAASH atmospheric correction module. The wavelength of the TIR band of HJ-1B is similar to the thermal band of TM5, and the spectral response curves of the two TIR bands matched well. Because HJ-1B has only one suitable thermal band to retrieval LST, so we adopted single-channel algorithm to retrieve LST from TIR band of the HJ-1B satellite. Land surface emissivity (ε) can effectively transmit thermal energy across the surface into the atmosphere, which was obtained through the NDVI thresholds method. A 2.5-dimensional Gaussian surface approximation was modeled to quantitatively describe the location, shape and size of the heat island, and to describe the urban heat environment and its seasonal variation. The algorithmic procedure for UHI analysis was performed in IDL (Interactive Data Language). The input data of UHI extraction were the HJ-1B LST imagery, as described above. The average suburban LST plus a threshold value (1°C) were regarded as potential heat island pixels. It was found that the daytime UHI demonstrated distinctive seasonal variation, with the maximum during summer and the minimum during winter. A series of 2.5-D model were created to analyze the UHI and its seasonal variation. Through monitoring and analyzing the UHI effect, the results illustrated that the spread of the UHI in Beijing extended for 33.92 km in longitude direction, 40.92 km in latitude direction and 1 090.14 km² in footprint area in summer, respectively. The urban area surface temperature was lower than the rural area temperature in winter, which has become an urban cooling island. On the basis of the accurately retrieval and analysis of Beijing UHI with HJ-1B satellite imagery, it was concluded that the HJ-1B TIR image is an ideal source for UHI study.

Key words: heat island effect; land surface temperature; HJ-1B; Gaussian surface model