

引用格式: 卢秀, 李佳, 段平, 等. 基于夜间灯光和土地利用数据的云南沿边地区 GDP 空间差异性分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(3): 455-466. [ Lu X, Li J, Duan P, et al. Spatial difference of GDP in Yunnan border area based on nighttime light and land use data[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(3): 455-466. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180483

## 基于夜间灯光和土地利用数据的云南沿边地区 GDP 空间差异性分析

卢 秀<sup>1,2,3</sup>, 李 佳<sup>1,2\*</sup>, 段 平<sup>1,2</sup>, 李 晨<sup>1,2</sup>, 王金亮<sup>1,2</sup>

1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500;  
3. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023

### Spatial Difference of GDP in Yunnan Border Area based on Nighttime Light and Land Use Data

LU Xiu<sup>1,2,3</sup>, LI Jia<sup>1,2\*</sup>, DUAN Ping<sup>1,2</sup>, LI Chen<sup>1,2</sup>, WANG Jinliang<sup>1,2</sup>

1. College of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing of Resources and Environment of Yunnan Province, Kunming 650500, China; 3. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Yunnan border area is an important geographic location. It is composed of 56 counties in 8 municipalities. Among which, 25 counties are adjacent to Laos, Myanmar, and Vietnam. Land use and nighttime light data were used in this study to explore the spatial pattern of GDP based on the spatialization of GDP in the Yunnan border area. This study was expected to inform policy on reducing economic gaps between regions and promoting regional common development. The land use data was used to spatially fit the Gross Domestic Product (GDP) from the first industry, and the DMSP/OLS nighttime light data was used to fit GDP from the second and third industries. The fitting results were summed up to realize the spatialization of total GDP in the border area of Yunnan province from 1992 to 2013. Based on this, the spatial difference of GDP in the Yunnan border area was analyzed. The results showed that: (1) The land use data could be well used to model the GDP from the first industry, with goodness of fit ( $R^2$ ) being greater than 0.82 in each year and overall relative error being less than 1.12%. The nighttime light data and the classification regression method were used to fit the GDP from the second and third industries. The maximum relative error of fitting was 6.404%, and the fitting accuracy of the sum of the two industries was satisfactory with the maximum relative error being only 4.241%; (2) The 22-phase GDP data of the Yunnan border area was positively correlated in space, presenting an obvious clusters; (3) The distribution of GDP cluster in the county was characterized by High-High values (HH) and Low-Low values (LL). The distribution of Low-High and High-Low values was scattered with no regularity. The clustered high values of GDP were concentrated in Kaiyuan, Mengzi, and other counties, while the clustered low values of GDP were concentrated in Luchun, Ximeng, and other counties; (4) The economic gap between counties in the Yunnan border area gradually increased from 1992 to 1996 followed by a decrease trend afterward. The spatial correlation effect showed a fluctuation of increase and decrease; (5) Results of three-dimensional interpolation in the

收稿日期: 2018-09-24; 修回日期: 2019-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561048)。[ **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41561048. ]

作者简介: 卢 秀(1992-), 女, 江苏淮安人, 博士生, 主要从事资源环境遥感、夜间灯光遥感研究。E-mail: lx\_rsgis@163.com

\*通讯作者: 李 佳(1984-), 女, 湖北公安人, 博士, 讲师, 主要从事近景摄影测量与遥感研究。E-mail: keguigiser@163.com

Yunnan border area presented a topographical pattern of “depression-hill-flat-peak” from the northwest to the southeast. The counties in the southeast corner of the border area such as Jianshui, Gejiu and Kaiyuan and other counties in the Honghe municipality, had the highest GDP. The “hill” terrain was mainly concentrated in Tengchong, Baoshan city, and the southernmost Jinghong area. The terrain of “depression-flat” was mainly distributed in the counties such as Gongshan and Fugong in the northwest corner of the border area, the counties in the southwest corner of Ximen and Menglian, and in the central area, such as Luchun and Jiangcheng counties.

**Key words:** GDP; spatial difference; Yunnan border area; DMSP/OLS nighttime light data; land use data

**\*Corresponding author:** LI Jia, E-mail: keguigiser@163.com

**摘要:**云南沿边地区包括8个地州,共56个县,其中有25个县市与老挝、缅甸和越南直接毗邻,具有重要的地缘位置。本研究利用土地利用数据和夜间灯光数据在实现云南沿边地区GDP空间化的基础上,对GDP的空间分布格局进行深入探讨,这对缩小区域经济差异及促进地区共同发展具有一定的指导意义。采用土地利用数据对国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)数据的第一产业进行空间化拟合,采用DMSP/OLS夜间灯光数据对GDP的第二、三产业进行拟合,将第一产业和第二、三产业空间化拟合的结果相加,实现云南沿边地区1992–2013年的GDP的空间化拟合。在此基础上对云南沿边地区GDP空间分布差异进行分析。结果表明:①土地利用数据对第一产业建模的效果较好,拟合的多期数据的相对误差均低于1.12%,采用夜间灯光数据,基于“分类回归”方法对第二、三产业拟合相对误差最大仅为6.404%,最终二者之和拟合的GDP拟合精度都较好,相对误差最大仅为4.241%;②22期GDP数据在空间分布上均呈现正的相关性,且均为显著集聚;③GDP空间分布局部集聚的高值-高值区域集中在开远、蒙自等县域,低值-低值地区集中在绿春、西蒙等地区;④云南沿边地区县域之间的经济差异在1992–1996年逐渐增强,1996年之后,经济差异波动缩小,空间关联效应呈现波动式的增强和减弱;⑤云南沿边地区的三维插值结果均呈现出西北至东南一线的“洼地-丘陵-平地-高峰”地势变化格局,沿边地区的东南角地区即红河州的建水、个旧和开远等县市的GDP最高,“丘陵”地势主要集中在腾冲、保山市以及最南部的景洪地区,“洼地-平地”地势主要分布在沿边地区西北角的贡山和福贡等县域、西南角的西蒙和孟连等县及中部区域的绿春和江城等县地区。

**关键词:**GDP;空间差异性;云南沿边地区;DMSP/OLS夜间灯光数据;土地利用数据

## 1 引言

国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)是衡量区域经济发展水平,反映区域规划和城市发展状况的重要指标之一<sup>[1]</sup>。长期以来,经济地理学主要基于省、市、县等行政区划单元对GDP等的统计数据采集、存储和分析<sup>[2]</sup>。如董晓菲等<sup>[3]</sup>以东北地区的哈大交通经济带13个地级市作为研究单元,以人均GDP作为衡量经济差异的指标,对经济带内的多年间的经济发展数据进行总体差异分析,并进一步对差异来源按照行政单元进行分解,分析影响差异的内外原因。刘保强等<sup>[4]</sup>运用ESDA-GIS方法,分析县域单元人均GDP数据的空间演化格局及其驱动因素。但是,以行政区划为主要单元研究GDP数据存在一定的问题,Zhao等<sup>[5]</sup>指出,使用行政区划单元的统计数据,数据在区划单元内均一化,难以反映单元内部更加精细的经济差异性,也无法与自然环境等栅格影像数据进行叠加等空间分析<sup>[6]</sup>。因此本研究以空间化的GDP数据作为衡量区域经济发展差异及空间分布格局特征的指标。

GDP数据是由第一产业、第二产业、第三产业构成,第一产业中农业、林业、牧业和渔业直接依赖于自然界部门,与土地利用数据中耕地、林地、草地和水域4个一级地类之间存在显著相关性<sup>[7]</sup>,而DMSP/OLS夜间灯光数据具有很强的光电放大能力,可以直观地反映人类活动,可以较好地反映第二、三产业,例如Sutton等<sup>[8]</sup>首次利用DMSP/OLS夜间灯光数据实现全球1 km<sup>2</sup>格网的GDP估算。近几年,学者为获得更高精度的GDP空间化结果,从夜间灯光影像本身存在的饱和问题、构建拟合指数等方面进行探索。张怡哲等<sup>[9]</sup>利用夜间灯光数据和植被指数构建人居指数拟合非农业GDP模型,基于土地利用数据拟合农业GDP数据,实现中国海岸带地区的GDP空间化,结果表明该方法不仅降低夜间灯光影像像元饱和问题,并且提高了非农业GDP的估算精度。郑子豪等<sup>[10]</sup>引入单元路网长度,构建单元路网长度指数的去饱和算法,该指数能够修正原始灯光数据过饱和问题,凸显城市中心区的灯光强度细节,校正后的夜间灯光数据对GDP、耗电量的拟合优度提高。这些拟合GDP的方法集中在对夜

间灯光影像自身存在的问题的纠正,缺乏从模型构建角度来提高GDP空间化拟合精度的研究。

综上所述,本研究首先采用土地利用数据对第一产业进行空间化建模,基于DMSP/OLS夜间灯光数据采用“分类回归”方法对第二、三产业进行空间化建模,然后将第一产业空间化拟合结果与第二、三产业空间化拟合结果进行叠加,最后实现云南沿边地区1992–2013年长时间序列的GDP空间化拟合,并在此基础上探讨和分析云南沿边地区的GDP空间分布格局和内部经济差异。

## 2 研究区概况及数据来源

### 2.1 研究区概况

选择云南沿边地区作为研究区,云南沿边地区包括红河州、德宏州、怒江州、西双版纳州、保山市、普洱市、文山市、临沧市8个地州,共56个县市(图1),图1(b)是2010年夜间灯光分布影像。随着云南沿边地区不断地开发开放以及兴边富民工程的实施,特色农业、旅游业等产业加快发展,经济实力随之增强。相关政策的实施以及关于加快沿边地区开发开放文件的出台给云南沿边地区经济发展提供了新的契机,但同时也面临着基础设施相对落后、产业结构不合理、经济聚集度较低等诸多挑战和困难,且各县市之间的经济发展水平存在较大差异<sup>[4]</sup>。

### 2.2 数据来源及预处理

(1) DMSP/OLS夜间灯光数据。采用DMSP/

OLS夜间灯光数据的时间范围为1992–2013年,共34期影像。数据集下载网址为: <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>, 该数据集存在同一年有多个传感器获取的灯光影像、不同传感器获取的不同灯光影像间缺乏连续性和可比性、传感器通道的光谱分辨率使影像像元DN值限制在0~63范围导致的城市中心区域存在像元DN值饱和现象<sup>[11–12]</sup>等问题。因此结合Elvidge等<sup>[12]</sup>、Wu等<sup>[13–14]</sup>、Liu等<sup>[15]</sup>方法对夜间灯光数据进行饱和、相互校正、年内融合、年际间校正、投影变换为Albers投影、分辨率统一重采样为1000 m等预处理。

(2) 土地利用数据。土地利用数据采用中国科学院环境科学数据中心提供的1990–2010年每隔5年一期的中国土地利用现状遥感监测数据,该遥感监测数据的分辨率为1000 m<sup>[16–17]</sup>。由于存在一些年份的GDP数据无对应的土地利用数据,因此利用已有年份的土地利用数据代替缺乏的相近年份的土地利用数据对第一产业进行拟合,选择依据是由每年第一产业数据和土地利用数据的最优拟合优度确定。土地利用数据用于第一产业拟合的数据设置如下:1990年的土地利用数据用于1992–1993年的第一产业拟合;1995年的土地利用数据用于1994–1997年的第一产业拟合;2000年的土地利用数据用于1998–2003年的第一产业拟合;2005年的土地利用数据用于2004–2008年的第一产业拟合;剩下年份的第一产业拟合基于2010年土地利用数据。

(3) GDP统计数据。GDP统计数据源于1992–2013年《云南省统计年鉴》国内生产总值统计数据<sup>[18]</sup>。

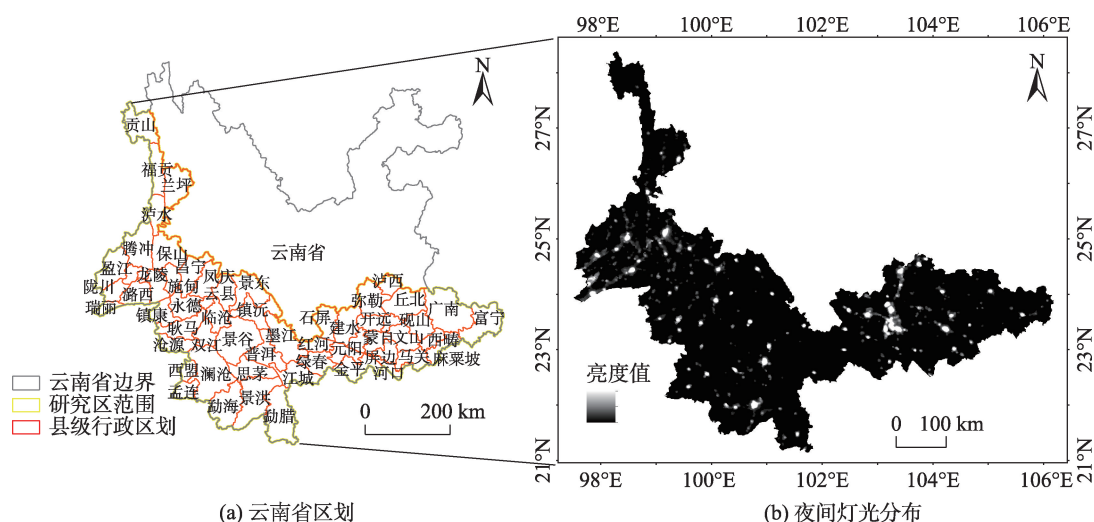


图1 研究区范围及2010年夜间灯光分布

Fig. 1 Study area and nighttime light distribution of 2010



### 3 研究方法

#### 3.1 GDP空间化拟合方法

##### 3.1.1 第一产业空间化

由于GDP中的第一产业与土地利用数据之间存在显著相关性<sup>[7]</sup>。将第一产业中的农业、林业、牧业、渔业产值分别与土地利用数据中耕地、林地、草地和水域对应建模,建模方法如下:

$$GDP_{ij} = \sum_{k=1}^4 Gk_{ij} \quad (1)$$

式中: $GDP_{ij}$ 表示第*i*行政区第*j*个栅格的第一产业; $k=1,2,3,4$ 分别对应第一产业中农业、林业、牧业、渔业产值的序号; $Gk_{ij}$ 分别表示这4种产值,计算公式如式(2)。

$$Gk_{ij} = \sum_{l=1}^n (g_{il} \cdot A_{ij}) \quad (2)$$

式中: $n$ 表示研究区样本数; $g_{il}$ 为第*i*行政区第*L*种土地利用类型单位面积产值; $A_{ij}$ 为第*i*行政区第*j*个栅格中第*L*种土地利用类型所占的面积。

##### 3.1.2 第二、三产业空间化

DMSP/OLS夜间灯光数据和GDP第二、三产业之间存在一定的相关性,可利用夜间灯光数据的不同灯光亮度值拟合GDP的第二、三产业,并揭示区域内部的GDP空间分布差异<sup>[19]</sup>。研究采用灯光亮度总值(Sum of Light, SOL)指数,该指数是指研究区内不同灯光亮度值与对应像元数量乘积的总和,计算方法如下:

$$SOL = \sum_{m=1}^{\max} N_m \cdot B_m \quad (3)$$

式中: $N_m$ 代表亮度值为*m*的像元数量; $B_m$ 代表像元自身的亮度值。利用SOL指数对第二、三产业进行拟合,同时遵循“无夜间灯光数据无GDP”的原则,建立模型如下:

$$GDP_{23} = a \cdot SOL \quad (4)$$

式中: $GDP_{23}$ 表示第二、三产业的拟合值; $a$ 是拟合系数。

为减小以上全局建模存在的问题,对第二、三产业采用“分类回归”建模方法进行拟合,即对初始拟合模型的结果引入相对误差 $\delta$ ,表达式如下:

$$\delta = \frac{GDP_{23} - GDP_s}{GDP_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $GDP_s$ 为研究区第二、三产业统计值。“分类回归”建模具体流程如图2所示。

##### 3.1.3 GDP拟合模型及线性纠正

将3.1.1节和3.1.2节拟合得到的第一产业拟合结果与第二、三产业拟合结果进行叠加,得到总体GDP拟合模型。尽管第二、三产业采用“分类回归”的建模方法,但仍存在部分县域在最终建模过程中由于方程拟合数量较少,将其归入最后一次拟合方程,使得这部分县域拟合值和真实值仍相差较大,因此需要使用县级的GDP统计数据对拟合的GDP数据进行线性纠正,使其误差控制在县域范围内。纠正模型如下:

$$GDP_c = GDP_e \cdot (GDP^* / GDP_{all}) \quad (6)$$

式中: $GDP_c$ 和 $GDP_e$ 分别表示为线性纠正后的GDP和拟合估算的每个栅格格网的GDP数据; $GDP^*$ 和 $GDP_{all}$ 分别为对应县域的GDP统计数据 and GDP拟合估算数据。

#### 3.2 GDP空间分布格局

基于云南沿边地区1992–2013年22期空间化拟合的GDP栅格密度数据,以县域为基本研究单位,运用空间自相关、空间变差函数等空间统计分析方法对云南沿边地区GDP经济数据空间分布格局、区域经济差异等方面进行分析。

##### 3.2.1 空间自相关

空间自相关分析指的是对不同单元的属性值在空间分布上的相关关系、依赖关系的分析,包括:全局自相关分析和局部自相关分析<sup>[20]</sup>。全局自相关分析主要探讨属性值在整个研究区域空间上的相

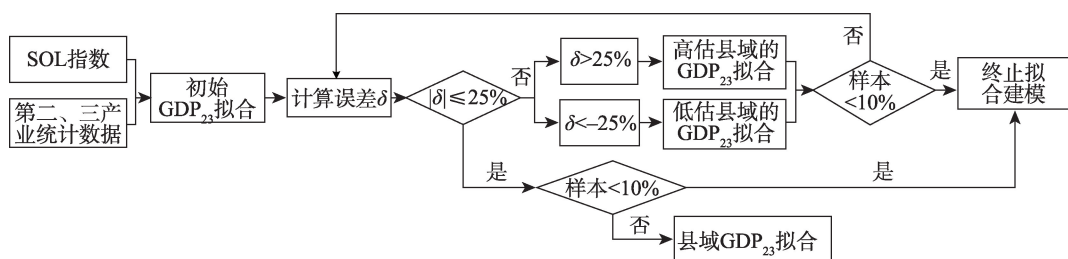


图2 GDP<sub>23</sub>分类回归拟合流程

Fig. 2 Flow chart of GDP<sub>23</sub> classification regression fitting model



关模式及分布特征<sup>[14]</sup>,通常用莫兰指数(Moran's  $I$ )进行测量,计算表达式如下:

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} z_i z_j}{S \sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (7)$$

$$\text{其中: } z_i = x_i - \bar{x} \quad (8)$$

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} \quad (9)$$

式中: $x_i$ 是变量在相邻配对空间单元的取值(本研究指每个县域GDP值); $\bar{x}$ 是各县域属性值的平均值(本研究指GDP的平均值); $N$ 是县域数量; $w_{ij}$ 代表空间单元 $i$ 和 $j$ 样本点的空间权重。 $I$ 值的范围为 $[-1,1]$ , $I$ 值接近或者等于0,表示属性值在空间分布格局上不具有相关性,即随机分布; $I$ 值大于0,表示属性值在空间分布上具有正的相关性,相似属性的空间单元集聚; $I$ 值小于0,反之。同时 $Z$ 值表示对Moran's  $I$ 的结果进行统计检验,  $|Z|$ 大于2.58,显著水平在1%以下,代表属性值在空间分布格局上非常显著集聚; $|Z|$ 大于1.96,显著水平在5%以下,代表属性值在空间分布格局上显著集聚<sup>[21]</sup>。

整体空间分布会同时存在正的相关性和负的相关性,这种共存现象会掩盖局部区域的空间变异性,因此通常还需要分析局部可能的属性空间变异性,即局部自相关分析,该分析用来揭示区域内部的相邻区域单元属性值在空间分布的相关性与差异性,通常用局部空间自相关指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)进行度量<sup>[14]</sup>,计算表达式如式(10)所示:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (10)$$

其中:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1} \quad (11)$$

式中: $I_i$ 表示 $i$ 和 $j$ 单元的属性值空间差异性指标; $x_i$ ( $x_j$ )表示县域 $i$ 和 $j$ 的属性值; $\bar{x}$ 是各县域属性平均值; $w_{ij}$ 代表空间单元 $i$ 和 $j$ 的影响程度。局部自相关分析的结果有4种表现形式,高值-高值(High-High, HH)表示高属性值的周围也是高属性值的区域;低值-低值(Low-Low, LL)表示低属性值的周围也是低属性值的区域。低值-高值(Low-High, LH)表示低值区域周围被高值区域包围;高值-低值(High-Low, HL)与之相反<sup>[22]</sup>。

### 3.2.2 空间变差函数

空间变差函数用来描述某一属性值在空间分布的随机性和结构性特征,计算公式如式(12)所示<sup>[23]</sup>:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (12)$$

式中: $Z(x_i)$ 表示在空间 $x_i$ 位置的属性值; $Z(x_i + h)$ 表示在空间 $x_i + h$ 位置的属性值; $N(h)$ 表示分割距离为 $h$ 的样本。以 $\gamma(h)$ 为纵坐标,以 $h$ 为横坐标,选择相关的拟合模型可拟合出空间变差函数曲线图。

图3中 $a$ 代表变程值,是函数达到基台值时的间距,变程 $a$ 增加,表示研究区GDP空间关联效应增强, $C$ 是结构方差, $C_0$ 代表块金值, $C_0 + C$ 是基台值,表示函数变量随着间距增加到一定尺度后出现的平稳值, $C_0 + C$ 的值越大,表示县域经济差异增强; $C_0 / (C_0 + C)$ 表示块金系数,用于反映变量的空间自相关程度, $C_0 / (C_0 + C)$ 值小于0.25,表示县域经济之间存在很强的空间相关性。常见的空间变差函数拟合模型主要包括如下几种:高斯模型、球状模型、指数模型、线性模型、幂函数模型等。

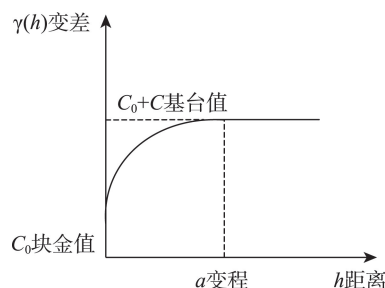


图3 空间变差函数曲线

Fig. 3 Spatial variation curve

## 4 结果及分析

### 4.1 GDP空间化拟合结果与精度评价

#### 4.1.1 GDP空间化拟合实验结果

将拟合的云南沿边地区的GDP空间化拟合结果经过逐像元线性纠正后,生成如图4所示的云南沿边地区的GDP空间化栅格密度图,考虑1992-2013年22期的GDP空间化图较多,为和国家五年计划时间节点协调,本研究仅列出1995、2000、2005和2010年4期空间化栅格密度图,如图4所示。

通过土地利用数据和夜间灯光数据拟合的GDP空间化数据,不受行政区划单元的限制,可以较为精细的显示区域内部的GDP分布状况和差异。并且空间化的结果可以直观体现出从城市中

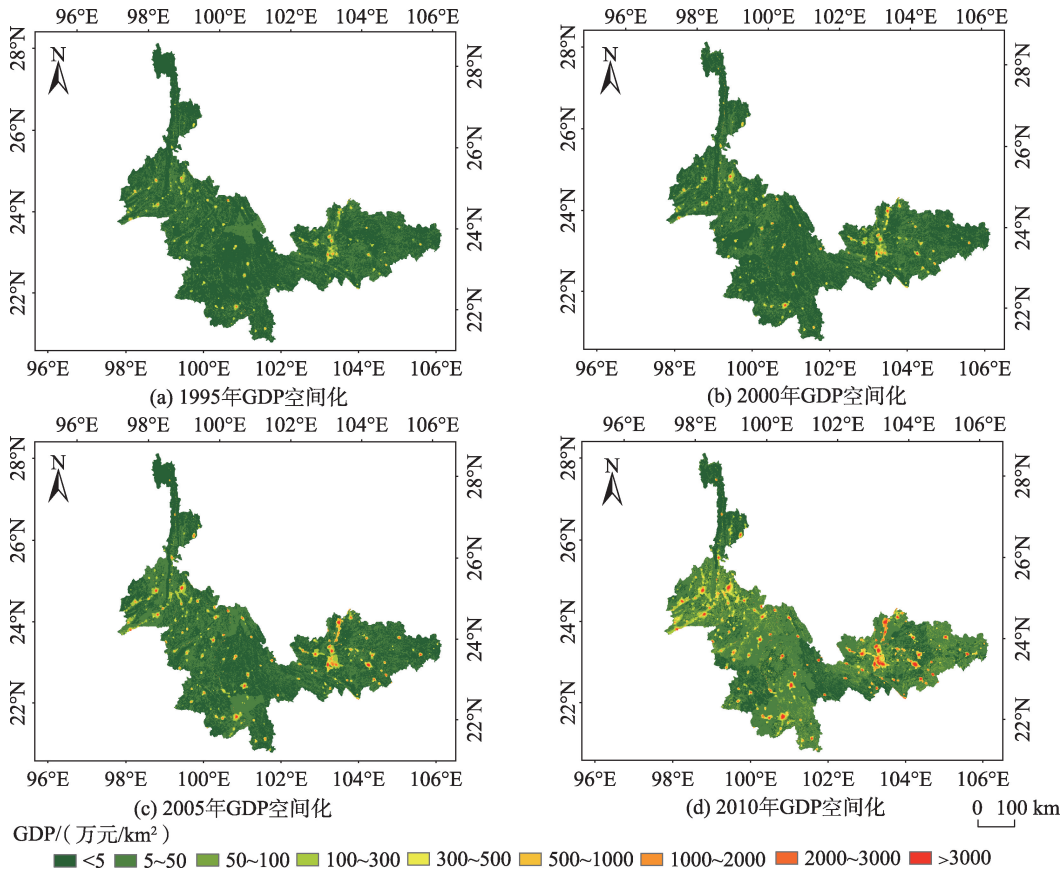


图4 1995–2010年云南沿边地区GDP空间化结果

Fig. 4 Spatial results of GDP in Yunnan border area from 1995 to 2010

心到乡村的GDP值逐渐降低的趋势。云南沿边地区单个像元的GDP值逐年增大,GDP像元高值数量不断增多,GDP低值像元范围逐渐变少。1995年的GDP高值像元集中分布在东部区域的红河州州中心以及西部地区的零星分散区域,随着经济的逐渐发展,到2005年GDP值较大的像元区域逐渐增多,在保山市、德宏州、西双版纳州等地州市及周围的郊区等区域均分布GDP的高值像元,2010年,大部分区域均分布高值像元,低值像元区域较少。低值像元区域常年集中在沿边地区的中部的临沧、思茅周边区域及西北部的怒江州等周边区域。

#### 4.1.2 GDP空间化拟合精度验证

第一产业和第二、三产业模型的拟合优度( $R^2$ )、残差(表示各期GDP统计值与GDP空间化拟合值之差)、相对误差(式(5))、GDP的残差和相对误差如表1所示。

第一产业空间化建模的 $R^2$ 均大于0.82,第二、三产业分类回归建模后的 $R^2$ 均大于0.88,说明拟合效果好,结果可靠。云南沿边地区第一产业空间化拟合的残差和相对误差均较小,残差最大为6.340

亿元,相对误差均低于1.12%。第二、三产业分类回归后建模的残差最大为48.677亿元,相对误差最大仅为6.404%,最终GDP空间化拟合精度都较高,GDP拟合相对误差最大仅为4.241%,说明云南沿边地区GDP数据经过分类回归建模的空间化拟合方法较好,拟合精度较高,误差较低,可用于后期GDP空间差异性分析。

## 4.2 GDP空间格局分析结果

### 4.2.1 GDP空间全局自相关结果

对云南沿边地区22期的GDP数据进行空间全局自相关的计算,结果如表2所示。

将22年的Moran's  $I$ 值、 $Z$ 值和 $P$ 值随时间变化的趋势图绘制如图5所示。

1992–2013年的Moran's  $I$ 值均大于0,代表整体云南沿边地区GDP在空间分布上呈现正的相关性。22年的 $Z$ 值均大于1.96,表明1992–2013年的GDP在空间分布上显著集聚。随着时间的变化,这种相关性和集聚性呈波动变化,1994–1997年、2002–2005年、2005–2010年这些时间段的 $Z$ 值呈现

表1 云南沿边地区1992–2013年的GDP空间化拟合精度评价结果

Tab. 1 Evaluation results of GDP spatial fitting accuracy

年份	第一产业			第二、三产业			GDP	
	模型R <sup>2</sup>	残差/亿元	相对误差/%	模型R <sup>2</sup>	残差/亿元	相对误差/%	残差/亿元	相对误差/%
1992	0.854	-0.536	0.784	0.953	-1.463	1.872	-1.999	1.365
1993	0.872	-0.845	1.116	0.948	-5.090	5.155	-5.934	3.403
1994	0.834	-0.422	0.432	0.945	-5.662	4.305	-6.084	2.654
1995	0.827	-0.148	0.120	0.920	-3.235	1.983	-3.384	1.180
1996	0.823	-0.210	0.144	0.922	-9.200	4.786	-9.410	2.786
1997	0.842	0.490	-0.308	0.913	-9.840	4.451	-9.349	2.459
1998	0.867	-0.230	0.140	0.950	-15.989	6.382	-16.219	3.912
1999	0.870	-0.930	0.553	0.957	11.576	-4.252	10.646	-2.418
2000	0.873	-0.822	0.476	0.963	11.307	-3.737	10.485	-2.205
2001	0.877	-0.824	0.469	0.904	22.212	-6.349	21.389	-4.070
2002	0.875	-0.899	0.492	0.886	25.604	-6.404	24.704	-4.241
2003	0.868	-1.173	0.592	0.978	5.669	-1.266	4.497	-0.696
2004	0.883	-0.329	0.147	0.931	28.009	-5.087	27.680	-3.575
2005	0.883	-1.411	0.529	0.915	11.260	-1.688	9.849	-1.055
2006	0.882	-2.610	0.882	0.946	3.208	-0.398	0.598	-0.054
2007	0.882	-2.904	0.835	0.939	-7.293	0.750	-10.197	0.772
2008	0.884	-0.376	0.094	0.933	-27.034	2.364	-27.411	1.774
2009	0.886	-0.565	0.126	0.950	-33.884	2.594	-34.448	1.964
2010	0.882	-2.141	0.432	0.947	-30.572	1.963	-32.714	1.593
2011	0.888	-0.924	0.153	0.934	11.459	-0.600	10.535	-0.419
2012	0.897	4.461	-0.601	0.915	17.417	-0.765	21.878	-0.725
2013	0.902	6.340	-0.745	0.903	48.677	-1.858	55.017	-1.585

表2 云南沿边地区空间全局自相关分析结果

Tab. 2 Spatial autocorrelation analysis results of Yunnan border area

年份	Moran's I 值	Z 值	P 值
1992	0.1583	2.6365	0.0084
1993	0.1623	2.6784	0.0074
1994	0.1404	2.3618	0.0182
1995	0.1466	2.4527	0.0142
1996	0.1580	2.6122	0.0090
1997	0.1592	2.6310	0.0085
1998	0.1519	2.5200	0.0117
1999	0.1617	2.6754	0.0075
2000	0.1594	2.6452	0.0082
2001	0.1531	2.6903	0.0071
2002	0.1395	2.6226	0.0087
2003	0.1490	2.7461	0.0060
2004	0.1713	2.9983	0.0027
2005	0.1889	3.1890	0.0014
2006	0.1839	3.0619	0.0022
2007	0.1932	3.1743	0.0015
2008	0.2213	3.5947	0.0003
2009	0.2272	3.6522	0.0002
2010	0.2308	3.6996	0.0002
2011	0.2232	3.5772	0.0003
2012	0.2107	3.3908	0.0007
2013	0.2041	3.2864	0.0010

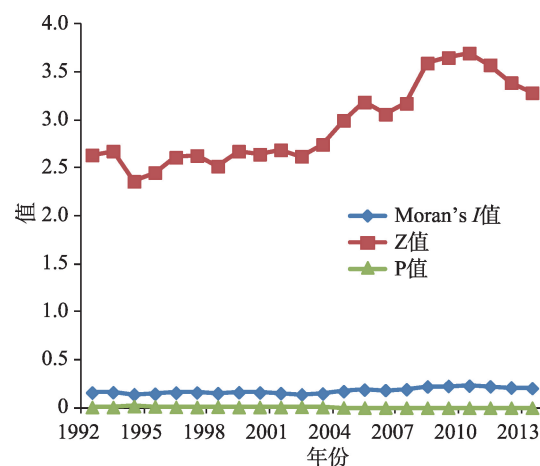


图5 1992–2013年Moran's I值、Z值和P值随时间变化的趋势

Fig. 5 Temporal trends of Moran's I, Z, and P value from 1992 to 2013

上升的趋势,GDP值在整体格局表现的空间集聚相关性增强,各县市之间经济发展联系较为紧密,一些经济发展好的县市能够在一定程度上带动其他县市的发展。相反2010–2013年GDP值在整体格局表现的空间集聚相关性减弱,并且后期有继续减弱



的趋势,县市之间的经济发展逐渐联系不紧密。

#### 4.2.2 GDP空间局部自相关结果

空间局部自相关的结果以LISA集聚图结果表现,由于22年的LISA结果图较多,图6中仅列出1995、2000、2005和2010年的LISA集聚图,图6中的HH、HL、LH和LL分别表示高值-高值集聚、高值-低值集聚、低值-高值集聚和低值-低值集聚。并统计出每一年GDP空间局部自相关的HH、HL、LH和LL四种类型的所有县市数量,如表3所示。

1995-2010年的LISA集聚图的变化不大,4种集聚类型所在的县域基本没有发生变化。开远和蒙自县在4期LISA集聚图中均变现为HH类型,1995和2010年HH所属类型的县域增加了个旧和建水县,2000年HH类型包括泸西和建水县,这些县市GDP水平较高,经济基础较好,空间分布集聚性较强,与周围的县市经济发展联系紧密,对周边地区的辐射、带动作用强。LL类型的区域主要集中在绿春、西盟等县,在1995年的基础上,2000年

LL类型增加了沧源、墨江和澜沧县,2005年增加了耿马、沧源、墨江、江城和澜沧县,2010年增加了耿马、沧源和墨江县。这些县域经济发展较弱,空间上集中分布,自身GDP水平低,经济发展落后,与周围县域经济联系不紧密。丘北县2000-2010年均呈LH类型,泸西县2005年与2010年也呈LH类型,说明丘北县、泸西县的经济发展与周围县市联系较为紧密,但是其本身的GDP水平和发展速度低于周围县市。1995年与2000年的HL类型均是耿马县,说明这些年的耿马县自身GDP水平较好,而周围县市的经济发展相对弱于耿马县。2000年之后,耿马县分布格局表现为不显著。表3中统计,每年GDP县域集聚类型分布主要是以HH和LL类型为主,LH和HL分布较少且分散,不具有规律性。

#### 4.2.3 基于空间变差函数的经济差异分析

以1992-2013年云南沿边地区22期的GDP数据作为研究数据选择拟合度最高的模型进行拟合,研究采用的模型包括:高斯、球状和指数模型,其中

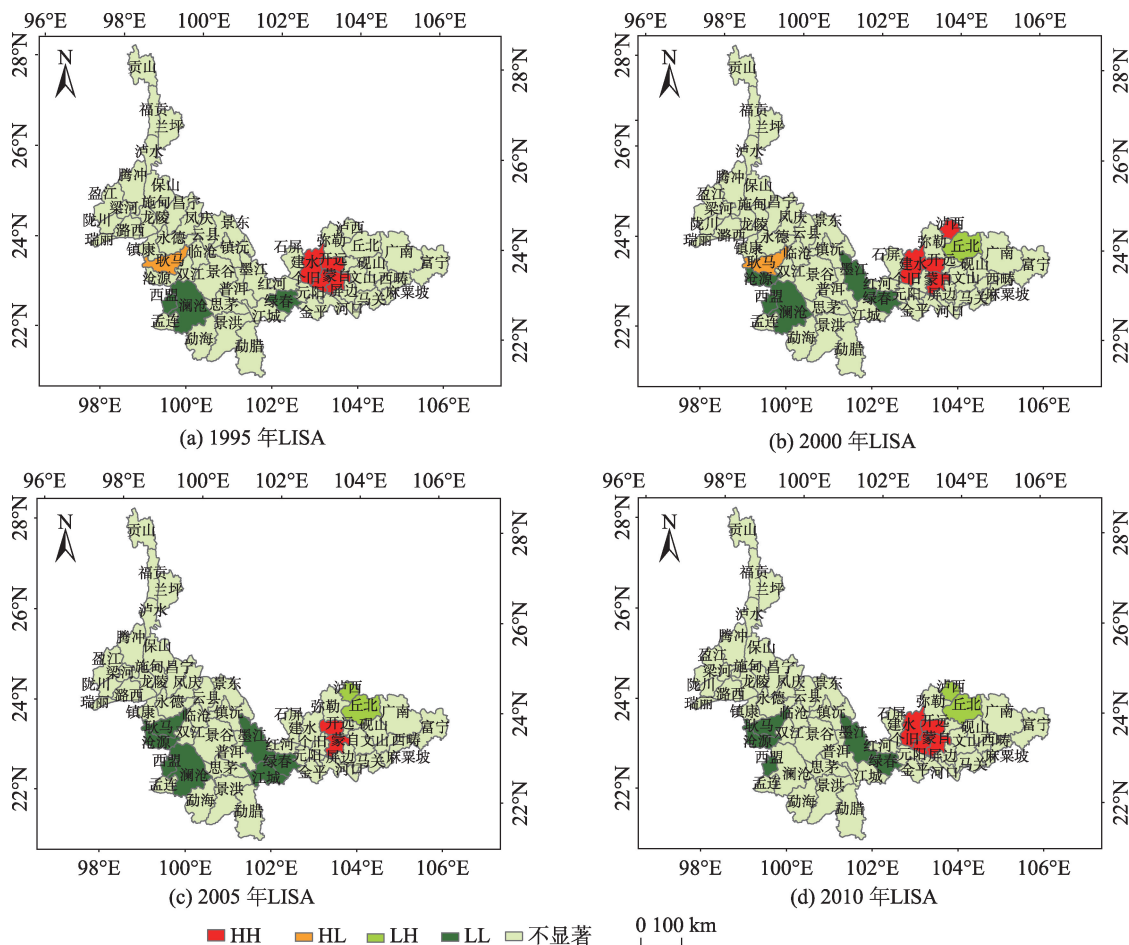


图6 云南沿边地区GDP的LISA集聚图

Fig. 6 LISA cluster map of GDP in Yunnan border area

表3 1992–2013年云南沿边地区GDP局部自相关县域数量统计

Tab. 3 Statistics of local autocorrelation for counties' GDP in the Yunnan border area from 1992 to 2013

年份/类型	HH		LL		LH		HL	
	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%
1992	4	7.14	2	3.57	0	0.00	1	1.79
1993	5	8.93	2	3.57	1	1.79	1	1.79
1994	4	7.14	4	7.14	0	0.00	1	1.79
1995	4	7.14	4	7.14	0	0.00	1	1.79
1996	4	7.14	4	7.14	0	0.00	1	1.79
1997	4	7.14	5	8.93	0	0.00	1	1.79
1998	4	7.14	6	10.71	1	1.79	1	1.79
1999	4	7.14	5	8.93	1	1.79	1	1.79
2000	4	7.14	5	8.93	1	1.79	1	1.79
2001	2	3.57	6	10.71	1	1.79	0	0.00
2002	2	3.57	6	10.71	1	1.79	0	0.00
2003	2	3.57	6	10.71	1	1.79	0	0.00
2004	3	5.36	6	10.71	1	1.79	0	0.00
2005	3	5.36	7	12.50	2	3.57	0	0.00
2006	2	3.57	7	12.50	2	3.57	0	0.00
2007	3	5.36	7	12.50	2	3.57	0	0.00
2008	3	5.36	7	12.50	2	3.57	0	0.00
2009	4	7.14	7	12.50	2	3.57	0	0.00
2010	4	7.14	7	12.50	2	3.57	0	0.00
2011	5	8.93	7	12.50	1	1.79	0	0.00
2012	4	7.14	5	8.93	2	3.57	0	0.00
2013	4	7.14	5	8.93	1	1.79	0	0.00

拟合度达到最高时的采样步长为 30.455 km, 因此各期采样步长统一定义为 30.455 km。分别计算每一年的变差函数。得到的变差函数的拟合参数如表 4 所示, 为进一步分析云南沿边地区县域经济发展的差异性, 采用克里金(Kriging)插值对云南沿边地区的 GDP 进行差异分析, 并对插值结果进行三维显示, 如图 7 所示(仅列出 1995、2000、2005 和 2010 年 4 期数据)。

$C_0+C$  的值在 1992–1996 年期间逐渐增加, 云南沿边地区的各县域之间的经济差异增强; 1996 年之后,  $C_0+C$  值呈现波动式下降, 县域之间的经济差异逐渐缩小。各期  $C_0/(C_0+C)$  均小于 0.25, 表明 22 年沿边地区的县域经济之间相关性强, 联系紧密。除 2009 年, 空间相关性的性质稍有减弱之外, 其余年份的空间相关性都很强。由随机成分引起的空间异质性性质较弱。1992–1997 年、2004–2006 年及 2009–2013 年, 变程呈现波动式增加, 沿边地区整体县域 GDP 空间关联效应增强; 1997–2004 年及 2006–2009 年, 变程减小, GDP 空间关联效应减弱。

图 7 中 GDP Kriging 三维插值图的形态起伏不

平, 表明云南沿边地区不同县域的 GDP 经济水平在空间分布上存在较大差异。22 年的云南沿边地区 GDP 插值结果存在一定的共性, 均表现出东南向的 GDP 较高、西北向的 GDP 较低的分布格局, 整体上形成从西北至东南一线的“洼地–丘陵–平地–高峰”地势变化格局, 整体经济发展不平衡。从局部分析, 东南角均是多年 GDP 分布最高峰位置, 常年处于插值图的顶峰。结果表明, 沿边地区的东南角的 GDP 经济发展最好, 高于沿边地区的其他区域。由经纬度计算可得, 这些“高峰”位置集中在红河州的建水、个旧和开远等县、市, 以建水、个旧和开远等县市为经济发展核心在一定程度上带动周围县、市的发展。GDP 的插值图的次高峰“丘陵”区域常年集中分布在 25°N, 99°E 周围, 即腾冲、保山市, 以及最南部地区(西双版纳州的景洪), 这些地区的经济发展也较好, 仅次于红河州的建水、个旧等城市。一些经济欠发达的地区, 即插值结果的“洼地–平地”区域主要集中分布在沿边地区的西北角、西南角以及沿边地区的中部区域, 即怒江州的边境县贡山、福贡等县域, 思茅市的边境县西盟和孟连县以及红河州的边境县绿春县等。

表4 1992-2013年云南沿边地区GDP空间变差函数拟合参数  
Tab. 4 Fitting parameters of GDP spatial variation function in Yunnan border areas from 1992 to 2013

年份	变程 $a$	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	变差系数 $C_0/(C_0+C)$	拟合模型	$R^2$
1992	104 442.664	0.001	0.463	0.002 16	高斯	0.797
1993	110 158.431	0.024	0.508	0.047 24	高斯	0.828
1994	146 500.000	0.001	0.553	0.001 81	球状	0.855
1995	155 000.000	0.001	0.592	0.001 69	球状	0.856
1996	152 500.000	0.001	0.626	0.001 60	球状	0.850
1997	159 300.000	0.001	0.616	0.001 62	球状	0.867
1998	153 700.000	0.001	0.610	0.001 64	球状	0.857
1999	154 300.000	0.001	0.597	0.001 68	球状	0.857
2000	155 600.000	0.001	0.584	0.001 71	球状	0.866
2001	118 299.000	0.028	0.596	0.046 98	高斯	0.853
2002	112 756.508	0.021	0.610	0.034 43	高斯	0.831
2003	110 158.431	0.011	0.591	0.018 61	高斯	0.834
2004	100 805.357	0.004	0.560	0.007 14	高斯	0.804
2005	134 700.000	0.002	0.553	0.003 62	球状	0.771
2006	164 400.000	0.001	0.567	0.001 76	指数	0.745
2007	154 200.000	0.001	0.568	0.001 76	指数	0.711
2008	153 600.000	0.001	0.576	0.001 74	指数	0.705
2009	140 700.000	0.062	0.556	0.111 51	球状	0.716
2010	146 700.000	0.001	0.565	0.001 77	指数	0.693
2011	145 800.000	0.001	0.569	0.001 76	指数	0.681
2012	147 900.000	0.007	0.556	0.012 59	指数	0.667
2013	151 200.000	0.001	0.540	0.001 85	指数	0.687

5 结论和讨论

本研究基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和土地利用数据,对云南沿边地区 1992-2013 年 22 年的 GDP 进行空间化拟合,在验证拟合精度较高的基础上对云南沿边地区 GDP 空间分布格局、区域经济差异进行探讨,具体的结论如下:

- (1) 本研究从模型构建的角度对 GDP 进行空间化拟合,对 GDP 中第二、三产业采用“分类回归”的方法进行拟合,精度评价的结果表明该方法可以有效提高 GDP 空间化拟合精度。
- (2) 云南沿边地区的 GDP 空间全局自相关结果表明,整体云南沿边地区 GDP 呈现正的相关性,且在空间分布上显著集聚。在不同时期,这种相关性和集聚性呈波动变化。多期的集聚图的 HH 区域集中在开远、蒙自等县,这些县市与周围的县市经济发展联系紧密;LL 类型的区域主要集中在绿春、西盟县市,这些县域经济发展较弱,自身的 GDP 水

平较低,与周围县市经济联系不紧密。各期县域的 GDP 集聚类型分布主要以 HH 和 LL 类型为主,LH 和 HL 分布较少且分散,不具有规律性。云南沿边地区 GDP 三维插值结果具有一定的共性,均表现为东南向较高,西北向较低的起伏形态,形成从西北至东南一线的“洼地-丘陵-平地-高峰”变化地势格局。GDP 分布最高的位置常年位于东南角红河州的建水、个旧和开远等县市;次高峰“丘陵”位置主要分布在腾冲、保山市及景洪县等县市;“洼地-平地”区域集中在西北角、西南角和中部区域的贡山、福贡、西盟和绿春等县域。云南沿边地区不同县域的经济发展存在一定的差异,云南省应当加大相关政策的实施,产业结构合理化,缩小不同地区之间的经济差异,促进沿边地区经济共同发展。

此外,本研究采用的 DMSP/OLS 夜间灯光数据仅更新至 2013 年,未来可结合另一 NPP/VIIRS 夜间灯光数据对 GDP 等的统计数据进行空间化拟合及更长时间序列的空间格局、区域差异等分析。



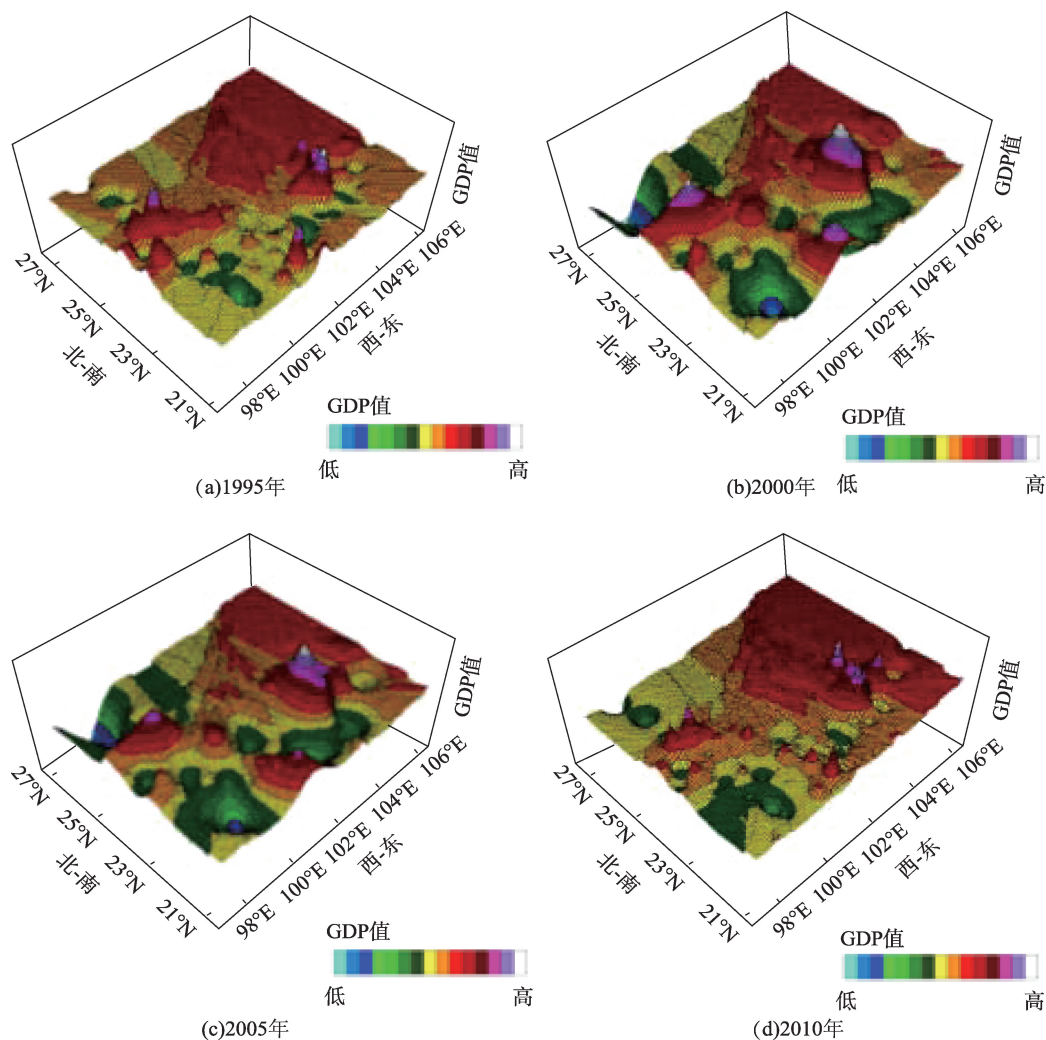


图7 云南沿边地区1995、2000、2005和2010年的GDP三维Kriging插值结果

Fig. 7 Three-dimensional Kriging interpolation map of GDP in Yunnan border area in 1995, 2000, 2005 and 2010

#### 参考文献(References):

- [1] 潘思东.基于夜光遥感和小区POI的住宅发展与经济增长的空间耦合研究[J].地球信息科学学报,2017,19(5): 646-652. [Pan S D. Spatial coupling between housing development and economic growth based on night light remote sensing and residential POI[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(5):646-652. ]
- [2] 杨小唤,江东,王乃斌,等.人口数据空间化的处理方法[J].地理学报,2002,57(增刊):70-75. [Yang X H, Jiang D, Wang N B, et al. Method of pixelizing population data[J]. Acta Geographica Sinica, 2002,57(supp.):70-75. ]
- [3] 董晓菲,王荣成.东北地区哈大交通经济带经济发展空间差异研究[J].地域研究与开发,2010,29(2):22-28. [Dong X F, Wang R C. Analysis on economic disparities of Harbin-Dalian traffic economic belt in northeast China[J]. Areal Research and Development, 2010,29(2):22-28. ]
- [4] 刘保强,熊理然,蒋梅英,等.云南沿边地区县域经济的空间格局演化分析[J].地域研究与开发,2017,36(3):29-35. [Liu B Q, Xiong L R, Jiang M Y, et al. Spatial pattern evolution analysis of economy at county level in Yunnan's border areas[J]. Areal Research and Development, 2017, 36(3):29-35. ]
- [5] Zhao M, Cheng W, Zhou C, et al. GDP spatialization and economic differences in south China based on NPP-VIIRS nighttime light imagery[J]. Remote Sensing, 2017,9(7):673-692.
- [6] 吴吉东,王旭,王莱林,等.社会经济数据空间化现状与发展趋势[J].地球信息科学学报,2018,20(9):1252-1262. [Wu J D, Wang X, Wang C L, et al. The status and development trend of disaggregation of socio-economic data[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(9):1252-1262. ]
- [7] 刘红辉,江东,杨小唤,等.基于遥感的全国GDP 1km格网的空间化表达[J].地球信息科学学报,2005,7(2):120-123. [Liu H H, Jiang D, Yang X H, et al. Spatialization approach to 1 km grid GDP supported by remote sensing

- [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2005,7(2):120-123. ]
- [ 8 ] Sutton P C, Costanza R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation[J]. *Ecological Economics*, 2002,41(3):509-527.
- [ 9 ] 张怡哲,杨续超,胡可嘉,等.基于多源遥感信息和土地利用数据的中国海岸带GDP空间化模拟[J].*长江流域资源与环境*,2018,27(2):235-242. [ Zhang Y Z, Yang X C, Hu K J, et al. GDP spatialization in the coastal area of China based on multi-sensor remote sensing data and land use data[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018,27(2):235-242. ]
- [10] 郑子豪,陈颖彪,吴志峰,等.单元路网长度的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和和方法[J].*遥感学报*,2018,22(1):161-173. [ Zheng Z H, Chen Y B, Wu Z F, et al. Method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data based on UNL [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018,22(1):161-173. ]
- [11] 吴健生,李双,张曦文.中国DMSP-OLS长时间序列夜间灯光遥感数据饱和和校正研究[J].*遥感学报*,2018,22(4):621-632. [ Wu J S, Li S, Zhang X W. Research on saturation correction for long-time series of DMSP-OLS nighttime light dataset in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018,22(4):621-632. ]
- [12] Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. *Energies*, 2009,2(3):595-622.
- [13] Wu J S, He S B, Peng J, et al. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013,34(20):7356-7368.
- [14] 吴健生,牛妍,彭建,等.基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995-2009年中国地级市能源消费动态[J].*地理研究*, 2014,33(4):625-634. [ Wu J S, Niu Y, Peng J, et al. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light[J]. *Geographical Research*, 2014,33(4):625-634. ]
- [15] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012,106(1):62-72.
- [16] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,98(4):442-456.
- [17] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].*地理学报*, 2014,69(1):3-14. [ Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(1):3-14. ]
- [18] 云南省统计局.云南统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1993-2014. [ Statistical Bureau of Yunnan Province. *Yunnan statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1993-2014. ]
- [19] 韩向娣,周艺,王世新,等.基于夜间灯光和土地利用数据的GDP空间化[J].*遥感技术与应用*,2012,27(3):396-405. [ Han X D, Zhou Y, Wang S X, et al. GDP spatialization in China based on DMSP/OLS data and land use data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012,27(3):396-405. ]
- [20] 关伟,朱海飞.基于ESDA的辽宁省县际经济差异时空分析[J].*地理研究*,2011,30(11):2008-2016. [ Guan W, Zhu H F. Spatio-temporal analysis of inter-county economic differences in Liaoning Province based on ESDA[J]. *Geographical Research*, 2011,30(11):2008-2016. ]
- [21] 陈浩,邓祥征.中国区域经济发展的地区差异GIS分析[J].*地球信息科学学报*,2011,13(5):586-593. [ Chen H, Deng X Z. Analysis of regional difference of economic development in China based on spatial autocorrelation and  $\delta$ -convergence models[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2011,13(5):586-593. ]
- [22] 王培安,罗卫华,白永平.基于空间自相关和时空扫描统计量的聚集比较分析[J].*人文地理*,2012,27(2):119-127. [ Wang P A, Luo W H, Bai Y P. Comparative analysis of aggregation detection based on spatial autocorrelation and spatial-temporal scan statistics[J]. *Human Geography*, 2012,27(2):119-127. ]
- [23] 方叶林,黄震方,涂玮,等.基于地统计分析的安徽县域经济空间差异研究[J].*经济地理*,2013,33(2):33-38. [ Fang Y L, Huang Z F, Tu W, et al. Research of spatial differences of county economy in Anhui based on geostatistical analysis[J]. *Economic Geography*, 2013,33(2):33-38. ]