

# 中国城市体系等级结构及其空间格局

## ——基于DMSP/OLS夜间灯光数据的实证

吴健生<sup>1</sup>, 刘 浩<sup>1</sup>, 彭 建<sup>2</sup>, 马 琳<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** 完善的城市体系可以不断优化各个城市的时空资源并强化区域城市的集聚效应, 切实推动区域可持续发展与城市综合效益最大化。受惠于城市因素流与城市作用潜力的显著相关关系, 节点体系研究可以准确测度城市体系内部各个城市之间的相互作用关系, 又避免了功能体系研究所需矢量数据的难以获取与测算庞杂, 而DMSP/OLS夜间灯光遥感数据可以综合地定量测度城市地区人类活动的广度与强度。基于夜间灯光指数的引力模型定量测度中国341个城市之间的相互作用关系, 并通过二阶段聚类法综合分析其城市体系等级结构与空间格局。中国节点城市被划分为7大国家节点城市(包括北京、天津、上海、广州、重庆、哈尔滨与沈阳)、26个区域节点城市与107个省域节点城市, 而中国城市体系则被划分为2个国家城市体系(北方城市体系与南方城市体系)、8个区域城市体系(华北城市体系、东北城市体系、西北城市体系、黄河中游城市体系与华东城市体系、华南城市体系、西南城市体系、长江中游城市体系)与31个省域城市体系。城市体系的地域范围是相对的、局部的, 没有明确的识别界线, 不过通过对基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国城市体系等级结构与空间格局与顾朝林实证研究的分析结果进行进一步的综合比对评估, 总体而言, 基于DMSP/OLS夜间灯光数据对城市体系的等级结构与空间格局进行实证研究是可信的和可行的。

**关键词:** 城市体系; 等级结构; 空间格局; 引力模型; DMSP/OLS; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201406004

## 1 前言

城市体系的形成与发展是区域经济社会发展达到一定阶段的必然产物, 是特定区域内相对独立的有机整体。完善的城市体系具有地域连接与开放属性的城市时空动态网络结构, 其构成城市则有吸引集聚与辐射扩散的复合效应。城市体系的完善不仅可以高效优化城市时空资源并有效推动城市集聚效益(或扩散效益), 也有助于推动建设适合我国国情发展的新型工业化与城市化道路, 并切实推动区域可持续发展战略。

城市体系研究范式已从单纯的定性分析过渡到定量分析, 并趋于定性一定量综合分析。不过受困于研究数据的获取性与时效性, 城市体系实证研究多基于传统的部门统计数据(如人口规模、行政级别、生产总值与通勤交通<sup>[1-3]</sup>)。作为城市体系的核心概念, 城市规模是综合分析城市体系等级结构及其空间格局的基本要素, 其定量测度主要基于单一统计指标及部分综合指标体系。单一统计指标却受制于部门统计数据的低可信度与难获取度(城市O-D网络数据尤甚), 又难以全面表征城市规模<sup>[4-6]</sup>。综合指标体系虽克服单一统计指标的片面性, 却也陷入指标选取与权重测定等困境。当前国内城市体系研究面临日益严重的发展瓶颈, 亟需拓展新方法论与新数据源, 尤需形式简洁却内涵丰富的评估方式。

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2014-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330747)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330747]

作者简介: 吴健生(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事遥感与GIS、景观生态学与土地利用规划研究。

E-mail: wujs@szpku.edu.cn

通讯作者: 刘浩(1987-), 男, 硕士, 主要从事城市与区域规划、区域经济研究。E-mail: liuhao4680@126.com

得益于遥感技术的突飞猛进,遥感数据以其特有的时效性与可获性成为重要数据源。DMSP/OLS夜间灯光数据可综合表征人类活动的广度与强度,又与各类城市规模评估指标(生产总值、扩展面积、人口规模、地表覆被、能源消费、城市化水平等<sup>[7-12]</sup>)存在显著相关关系,藉此夜间灯光指数是形式简洁却内涵丰富的评估指标,实现了单一统计指标与综合指标体系的有机融合。虽然夜间灯光指数理论上可高效评估城市规模并分析城市体系,却受困于引入时间短、研究人员少等客观因素,其实证研究仍处于分析其与各类城市规模评估指标的相关关系层次,基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城市体系等级结构及其空间格局的实证研究鲜有进行,其可行性与可信度亟需实践论证。

本文基于DMSP/OLS夜间灯光数据对中国城市体系的等级结构及其空间格局进行综合分析,研究对象选取中国地级以上城市,首先基于夜间灯光数据测度城市规模,再采用引力模型估测城市相互作用程度,进而通过二阶段聚类分析评估我国城市体系的等级结构,其聚类因子包括综合潜力指数、综合潜力秩数与城市规模指数以及虚拟评估因子,最后基于空间聚类分析对中国城市体系的空间格局进行定量一定性综合分析。

## 2 研究方法

### 2.1 研究地域

改革开放以来,城市化进程显著加快,各级各类城市逐渐融入统一的城市经济体系,城市联系也发生多元化全方位的时空演化,不同规模、不同层次与不同功能的城市体现不断形成发展。为了更好地优化中国城市体系,引导建设符合我国国情的特色城镇化,中国城市体系等级结构及其空间格局的实证研究需要综合实践。

为了评估基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城市体系等级结构及其空间格局的可行性与可信度,选取中国包括直辖市、地级市、自治州以及部分省直辖县市等32个省市的341个城市作为研究对象。城市行政区划与市名及其行政中心都以2012年为标准。为了提高实证分析的精确性与科学性,将市域面积太小的城市归入相邻较大城市,如石河子市并入昌吉市,阿拉尔市并入阿克苏市。城市行政中心为实证研究的测度中心。

### 2.2 研究模型

首先基于夜间灯光指数构建城市规模模型,而后基于引力模型评估城市作用指数,进而基于二阶段聚类分析(连续进行两次聚类分析,聚类因子分别包括城市规模指数、综合潜力指数与综合潜力秩数以及虚拟评估因子)评估城市体系的等级结构,最后基于空间聚类分析探讨城市体系的空间格局。城市规模指数表征城市综合实力,为城市在其城市体系中自身生成集聚效益或扩散效益的综合能力,既是城市作用指数的引力质量系数也是城市体系等级结构分析的聚类因子。城市作用指数测度城市相互联系程度,是城市在其城市体系中自身与相关城市之间相互联系的理论能力,是城市节点体系而非城市功能体系的理论作用。综合潜力指数评估城市在其城市体系中与相关城市的相互联系程度的数量综合,综合潜力秩数则表征城市在其城市体系中与相关城市相互联系程度的质量综合。综合潜力指数与综合潜力秩数源于城市作用指数,都是评估城市体系等级结构的二阶段聚类分析因子。

**2.2.1 构建城市规模模型** 城市体系包括城市功能体系与城市节点体系。城市功能体系是基于城市之间的能量流、物质流等城市因素流的实际联系状况<sup>[13-14]</sup>,是源于实践的直接评估。城市节点体系是源于理论的间接评估<sup>[15]</sup>,其基于城市规模的理论假设,即城市规模大小决定城市因素流多少,决定城市在其城市体系中的集聚效益与扩散效益。相比于城市节点体系,城市功能体系更加趋于科学客观,尤其适用于城市O-D网络数据所支持的实证研究;而受困于城市因素流的难以监控和获取,城市功能体系的实证研究却局限于特定对

象,中尺度尤甚。基于城市规模的理论假设,城市节点体系研究有效解决了城市功能体系研究数据监控和获取的难题并科学评估城市体系的等级结构及其空间格局,而本文实证研究即基于此。

作为城市体系研究的核心概念,表征城市综合实力的城市规模却难以基于单一统计指标进行全面评估,而综合指标体系也受困于评估指标与评估权重的选取<sup>[16-17]</sup>。形式简洁却内涵丰富的DMSP/OLS夜间灯光指数综合表征城市地区人类活动的广度与强度,其与所含经济因子(生产总值、能源消耗、城市扩张等<sup>[8, 11]</sup>)、社会因子(人口规模、人口密度、城市化等<sup>[7, 9]</sup>)和生态因子(碳排放、地表覆被、城市灾害等<sup>[10, 12]</sup>)的城市因素流的数量和质量存在显著相关关系。基于夜间灯光指数的城市规模指数可全面评估城市规模,如公式(1)。

$$M_i = I \times B = \left[ \sum_{e=g}^f (N_e \times S_e) \right] \times \frac{A_i}{A_0} \tag{1}$$

式中:  $M_i$ 为城市规模指数;  $N_e$ 为研究地域内第  $e$  级像元灰度值;  $S_e$ 为研究地域内第  $e$  级像元总数目;  $g$ 为始点阈值 ( $g = 1$ ) 而  $f$ 为终点阈值 ( $f = \max$ );  $A_i$ 为城市  $i$  像元灰度值在始点阈值与终点阈值之间的总面积,  $A_0$ 为研究地域内所有城市满足条件的总面积。

**2.2.2 构建城市作用模型** 本文旨在评估基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城市体系等级结构及其空间格局的可行性与可信度,进而分析中国城市体系的等级结构与空间格局的时空演化,关键是分析城市节点体系而非基于城市O-D网络数据真实拟合城市因素流和进行城市功能体系的时空格局<sup>[18]</sup>,故此城市作用模型选用引力模型以用于分析城市在城市体系中与相关城市的相互作用状况,如公式(2)。

$$I_{ij} = K \frac{M_i^a M_j^b}{d_{ij}^c} \quad (i \neq j; i \in [1, n]; j \in [1, m]) \tag{2}$$

式中:  $I_{ij}$ 为城市  $i$  与城市  $j$  之间的城市作用指数;  $K$ 为比例系数;  $M_i$ 与  $M_j$ 分别为始点城市  $i$  与终点城市  $j$  的城市规模指数;  $d$ 为始点城市与终点城市的距离(本文为空间直线距离);  $a$ 与  $b$ 分别为城市生成对内集聚与对外扩散的城市因素流的潜力指数(本文假设城市所生成因素流与所吸引因素流是双向等量的,均取1);  $c$ 为距离效应阻尼系数。距离效应阻尼系数是城市之间相互作用引力的距离衰减速度,既受区域环境制约也受城市因素流的类型限制,虽存在争论,本文以距离效应阻尼系数表征城市之间相互作用范围的尺度差异,其分别为1和2时可近似代表国家尺度与地区尺度的城市体系时空作用状况<sup>[19]</sup>。

**2.2.3 构建城市作用潜力模型** 综合潜力指数即终点城市与所有符合条件的始点城市相互之间的城市作用指数之和,评估其在城市体系中城市相互作用状况的数量综合,定量测度目标城市在整个城市体系中的联系强度,如公式(3)。

$$T_i = \sum_{j=m}^n I_{ij} \tag{3}$$

式中:  $T_i$ 为城市综合潜力指数;  $m$ 与  $n$ 分别为强度阈值的min与max ( $m = 1$ 而  $d = 340$ )。

综合潜力秩数即终点城市到所有符合条件的始点城市相互之间的城市作用强度秩数之和,评估其在城市体系中城市相互联系状况的质量综合,定量测度目标城市在整个城市体系中的联系广度,城市作用强度秩数是按照不同条件从大至小依次排列,如公式(4)。

$$R_j = \sum_{p=p}^q O_j \tag{4}$$

式中:  $R_j$ 为城市综合潜力秩数;  $O_j$ 为城市  $j$  城市作用指数秩数;  $p$ 与  $q$ 分别为秩数阈值的min与max(本文  $p = 1$ 而  $q$ 不是常数)。基于引力模型的城市体系实证研究可能存在偶然误差,而单一固定系数必然增加偶然误差的发生概率从而降低实证研究的可信度与可行性,同时为了凸显不同级别城市的相互作用差异,现有研究虽多选用城市最大作用强度 ( $q = 1$ ),本文则将  $q$  设为非常数,将  $q$  初始选取1、5、10、50、100与340,而后5、50与100所含有效信息相对较少而仅将1、10与340引入二阶段聚类分析。



2.3 研究数据

本文旨在分析中国城市体系的等级结构及其空间格局，并藉此评估基于DMSP/OLS夜间灯光数据分析城市体系等级结构与空间格局的可信度与可行性。选取F162006辐射定标数据，其一稳定灯光数据包含城镇等稳定光源而背景噪音为0，为城镇体系实证研究提供优质数据源，其二F162006辐射定标数据有效消除夜间灯光数据的灯光饱和效应，其可信度与可行性评估更为有效。掩膜提取中国DMSP/OLS夜间灯光并重采样为1km分辨率（图1）。F162006灯光数据源于[http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/download\\_radcal.html](http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/download_radcal.html)网站。

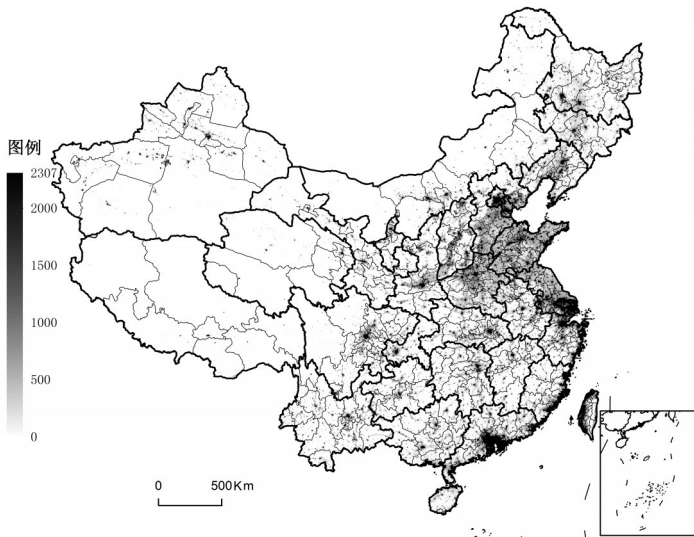


图1 中国2006年的DMSP/OLS夜间灯光辐射定标数据F162006  
Fig. 1 DMSP/OLS nighttime light product F162006 in 2006 with no sensor saturation in China

(海南省三沙市与钓鱼岛等海外诸岛由于灯光数据局限而没有提取标示，本文所有图件相同处理；Sansha city in Hainan and some islands are not the study object and not drawn in Fig.1. All Figs are the same as Fig. 1)

3 城市体系的等级结构

本文以城市规模指数、综合潜力指数与综合潜力秩数以及虚拟评估因子作为二阶段聚类分析因子，并连续进行两次聚类分析，进而综合分析中国城市体系的等级结构<sup>[20-21]</sup>。二阶段聚类分析 (Two-step Cluster Analysis) 是利用距离测度假设聚类模型变量均为自变量，并对数据集自然分组进行探索性分析，即假设连续型变量为正态分布，分类变量是多项式，使用经验内部检验方法稳定自变量假设及分布假设的干扰。城市体系二阶段聚类分析的分类变量选定虚拟评估因子，而连续型变量则选定城市规模指数、综合潜力指数与综合潜力秩数，其他测度系数选取默认选项（测度距离为对数似然距离测度，聚类数目为系统自动确定，聚类准则为贝叶斯信息准则BIC）。

3.1 城市体系等级结构的划分

为了提高实证研究的可信度与可行性，二阶段聚类分析连续进行两次，而聚类因子分别包括城市规模指数、综合潜力指数与综合潜力秩数以及虚拟评估因子，而综合潜力秩数则包括三个秩数（q分别为1、10与340）。为了消除行政、经济与社会等因素制约以提高实证分析的精确度与客观性，第一次的二阶段聚类分析引入一个虚拟评估因子。

国家尺度分析。中国城市体系基于第一次的二阶段聚类分析而被自主分为三个等级，第一城市等级有33个城市，第二城市等级有81个城市，第三城市等级结构则有227个城市。本文将第一次聚类所得的第二城市等级定义为省域节点城市。第一次聚类所得的第一城市等级则进行第二次的二阶段聚类分析并被自主分为两个等级，第一城市等级有7个城市即北京、天津、上海、广州、重庆、哈尔滨与沈阳，被定义为国家节点城市，第二城市等级26个城市被定义为区域节点城市，即深圳、厦门、宁波、大连、青岛、南宁、贵阳、昆明、福州、成都、长沙、合肥、武汉、南昌、杭州、西安、郑州、南京、银川、兰州、太原、济南、石家庄、乌鲁木齐、呼和浩特与长春。基于DMSP/OLS夜间灯光数据

的中国城市体系等级结构被依次划分为国家节点城市、区域节点城市与省域节点城市(图2)。

区域尺度的评估流程如同国家尺度。中国城市体系基于二阶段聚类分析而被分为两个等级结构,第一城市等级被定义为节点城市,第二城市等级则被定义为非节点城市。区域尺度所得的节点城市如与国家尺度所得的节点城市相互重合则不作另外分级,而没有重合的节点城市被统一定义为省域节点城市。综合国家尺度与区域尺度的省域节点城市共有107个城市(包括国家尺度的81市和区域尺度的26市)。

3.2 城市体系等级结构的特征

中国城市体系的等级结构形似金字塔式结构。基于对国家尺度与区域尺度的城市体系等级结构进行二阶段聚类分析,中国城市体系的等级结构被分为四个城市等级,7个国家节点城市,26个区域节点城市,107个省域节点城市,201个非节点城市,四类城市等级的数目比例为1:4:15:29,城市等级越高而城市数目越少,城市体系的等级结构呈正金字塔式结构。基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国城市体系的等级结构在国家尺度上总体符合中心地理论,而区域尺度尤其城市化发达地区的等级结构趋于城市平行网络结构(图2)。

中国城市体系的等级结构明显受制于城市行政职能级别。中国城市体系的等级结构与其行政职能级别存在显著正相关关系,城市行政级别越高而城市等级越高。作为国家政治中心的北京市在中国城市体系等级结构中居于最高级别,而7个国家节点城市(即北京、

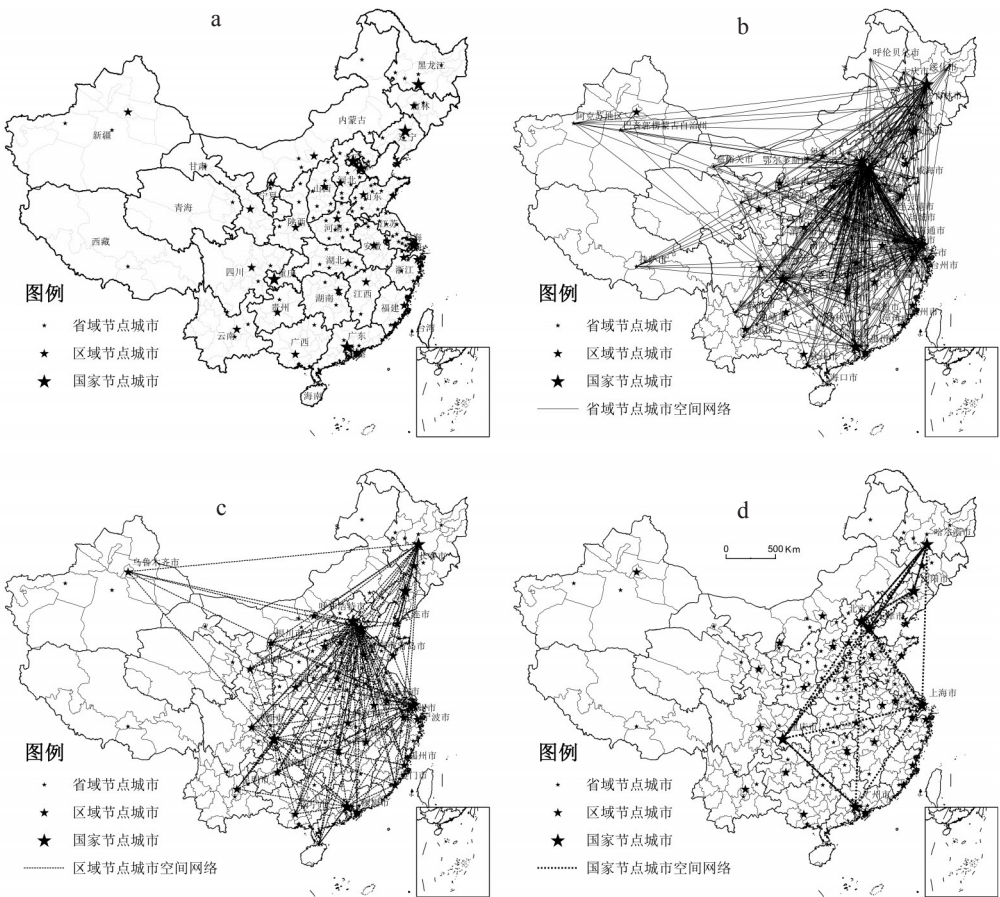


图2 中国城市体系的空间格局及其空间网络隶属关系

Fig. 2 Hierarchy regionalization of network relations in China's urban system

天津、上海、广州、重庆、哈尔滨、沈阳)均为直辖市或副省级城市,所有的省会城市(除了乌鲁木齐、西宁和海口)则都是区域节点城市,究其原因可能由于中国行政职能级别越高的城市越容易获取各类政治经济与社会等稀缺资源。

自然环境与社会经济的区位因素都不同程度上制约中国城市体系的等级结构。自然环境区位因素(如地形地势)存在显著影响,中国城市体系的140个节点城市多位于中部平原地区与东部沿海地区,西部高原山地地区相当稀少。节点城市多集聚于城市化水平较高或经济社会发达地区(如京津冀、山东半岛、长三角与珠三角),而广袤的西部欠发达地区尤其青藏新地区严重缺少节点城市,社会经济区位因素对城市体系的限制作用最为显著<sup>[22-23]</sup>。

## 4 城市体系的空间格局

### 4.1 城市体系空间格局的识别

完善城市体系是由一定地区内至少一个核心城市与数个相互作用联系的不同规模等级城市所构成的,等级结构越完善的城市体系的空间格局越趋于平行网络结构。中国城市体系的等级结构被划分为国家节点城市、区域节点城市与省域节点城市以及非节点城市,而城市体系空间格局的识别标准是由至少两级节点城市与数个非节点城市所构成的一定地域范围内的城市化区域。为了进一步定量评估中国城市体系的空间格局及其空间网络隶属关系,基于二阶段聚类分析对国家节点城市、区域节点城市与省域节点城市共140个节点城市进行聚类分析,低级别节点城市依次并入高级别节点城市。归并具体方法如下:基于综合潜力秩数(当top10时),首先省域节点城市并入核心城市为区域节点城市或国家节点城市的城市体系,而区域节点城市也并入核心城市为国家节点城市的城市体系,之后国家节点城市则从小到大依次并入城市规模较大的国家节点城市,进而综合识别中国城市体系的空间格局(图2)。

### 4.2 城市体系空间格局的特征

城市体系空间格局的识别是基于国家尺度的国家节点城市与区域节点城市的作用强度与联系广度。所有的国家节点城市与多数的区域节点城市都被识别为国家尺度上城市体系的核心城市。虽然某些节点城市的作用强度与联系广度或已跨越行政界线,城市体系的空间格局依然遵循其固有界线;而某些地区(如西北地区)由于缺少国家节点城市作为核心城市而以区域节点城市进行选择替代。

基于城市体系空间格局的识别准则,中国城市体系的空间格局已然形成了两个国家城市体系与八个区域城市体系所构成的完善空间格局模式。两个国家城市体系为北方城市体系(北京为核心城市)和南方城市体系(上海为核心城市)。北方城市体系由四个区域城市体系所构成,即华北城市体系(即北京、天津、河北与山东以及内蒙古的赤峰、锡林郭勒、乌兰浩特、包头、呼和浩特、巴彦淖尔和鄂尔多斯)、东北城市体系(即黑龙江、吉林与辽宁以及内蒙古的呼伦贝尔、兴安和通辽)、西北城市体系(即新疆、甘肃、宁夏与青海以及内蒙古的阿拉善和乌海)、黄河中游城市体系(即河南、山西与陕西)。南方城市体系由四个区域城市体系所构成,即华东城市体系(即上海、浙江、江苏与安徽)、华南城市体系(即广东、福建、广西与海南)、西南城市体系(即重庆、四川、贵州、云南与西藏)、长江中游城市体系(即湖北、湖南与江西)。中国城市体系的等级结构及其空间格局,如图3与表1。内蒙古由于特殊区位条件而被分别划入华北城市体系、东北城市体系与西北城市体系。西南城市体系(尤其西藏)与西北城市体系处于相当稀少与相对失衡的紊乱状态,东部城市体系尤其华东城市体系和华南城市体系则趋于相当完善与相对平衡的稳定状态。

综合分析区域节点城市(26市)与省域节点城市(107市),中国城市体系被细分为31个省域城市体系。城市之间的空间联系过于复杂而难以定量测度,城市体系识别准则应适



度引入定性因素。东部沿海地区 (即华东城市体系、华北城市体系、华东城市体系与华南城市体系) 与中部平原地区 (即黄河中游城市体系与长江中游城市体系) 逐渐趋于平衡, 西部内陆地区 (即西南城市体系与西北城市体系) 则相对失衡而亟需完善<sup>[24]</sup> (图3, 表1)。

为了评估基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城市体系等级结构及其空间格局的可行性与可信度, 本文综合分析中国城市体系的等级结构及其空间格局, 并与顾朝林<sup>[19]</sup>的相关研究进行比对评估。综合分析本文实证研究与顾朝林相关研究的异同及其比对评估的可行性与可信性, 高度相同的研究对象 (研究地域与研究时段均为21世纪初期的中国大陆地区) 与总体同化的研究方法 (评估模型均为经过优化的引力模型, 而分析模型所采用的聚类分析等时空分析方法也较为相似) 为城市体系实证研究的比对评估提供了可行可信的基础客观条件, 虽然二者实证研究所基于的研究理论与所采用的研究数据存在显著差异, 得到业界认可的顾朝林相关研究为验证本文实证研究的可行性与可信性提供了相对科学的客观评估基准。中国城市体系的等级结构及其空间格局以及比对分析状况可参阅表1。

顾朝林将中国城市体系划分为2个一级体系 (北方体系和南方体系) 与7个二级体系 (北京体系、沈—哈体系、兰—乌体系、上海体系、武汉体系、重庆体系和广州体系) 以及64个三级体系。本文实证研究则将中国城市体系划分为2个国家城市体系 (北方城市体系和南方城市体系) 与8个区域城市体系 (华北城市体系 (北京)、东北城市体系 (沈阳)、西北城市体系 (兰州) 和黄河中游城市体系 (郑州)、华东城市体系 (上海)、长江中游城市体系 (武汉)、西南城市体系 (重庆) 和华南城市体系 (广州)) 以及31个省域城市体系, 此外包括107个省域节点城市。进行综合比对分析, 本文的国家城市体系与顾的一级城市体系的等级结构与空间格局绝对相似; 本文的区域城市体系与顾的二级城市体系的等级结构与空间格局相对相似, 本文将顾的北京体系细分为华北城市体系与黄河中游城市体系; 本文的省域城市体系与顾的三级城市体系的等级结构与空间格局总体相似, 两者存在数目差异是源于实证研究的评估对象存在不同, 顾的研究对象包括数目众多的县级城市而本文的研究对

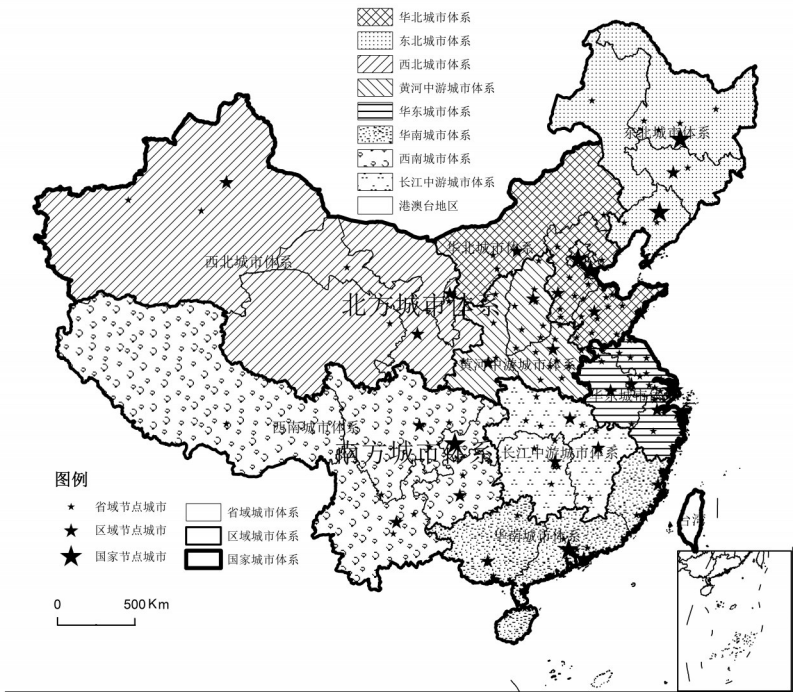


图3 中国城市体系的地域范围及其空间格局

Fig. 3 Spatial structure and its urban regions in China's urban system

表1 中国城市体系的等级结构与空间格局及其对比评估  
Tab. 1 Spatial structure and its urban regions in China's urban system

一级体系	二级体系	三级体系	省域体系	区域体系	国家体系	省域节点城市	
南方体系	武汉体系	武汉体系	武汉体系	长江中游城市体系 (核心为武汉)	南方城市体系 (核心为上海)	宜昌、荆州、黄石、襄阳、九江	
		襄阳体系					
		长沙体系	长沙体系			湘潭、衡阳、常德、岳阳、株洲	
		衡阳体系					
		南昌体系	南昌体系			赣州	
	重庆体系	景德镇体系		西南城市体系 (核心为重庆)			
		重庆体系	重庆体系			内江、南充	
		成都体系	成都体系			攀枝花	
		贵阳体系	贵阳体系			遵义	
		昆明体系	昆明体系			曲靖、玉溪	
	广州体系	拉萨体系		华南城市体系 (核心为广州)			
		广州体系	广州体系			海口、清远、佛山、江门、肇庆	
		湛江体系					
		汕头体系	深圳体系			东莞、惠州	
		南宁体系	南宁体系			钦州、桂林	
	上海体系	柳州体系		华东城市体系 (核心为上海)			
		福州体系	福州体系			泉州	
		厦门体系	厦门体系			漳州	
		合肥体系	合肥体系			黄山、亳州、淮北	
		(杭州体系)				华北城市体系 (核心为北京)	北方城市体系 (核心为北京)
	(金华体系)	杭州体系	金华、湖州、嘉兴、绍兴、温州				
	温州体系						
	(宁波体系)	宁波体系	台州				
	台州体系						
	北方体系	北京体系	南京体系	南京体系	东北城市体系 (核心为沈阳)		
(无锡体系)							
淮南体系			济南体系	菏泽、济宁、德州、聊城、泰安、淄博、滨州、东营、徐州			
徐州体系			济南体系				
济南体系			天津体系	廊坊、唐山、秦皇岛、沧州、张家口、赤峰			
沈哈体系		(天津体系)	天津体系	西北城市体系 (核心为兰州)			
		石家庄体系	石家庄体系			保定、邢台、衡水、邯郸	
		邯郸体系					
		青岛体系	青岛体系			临沂、潍坊、威海、烟台、连云港	
		烟台体系	呼和浩特体系			鄂尔多斯、包头	
兰乌体系		包头体系	呼和浩特体系	黄河中游 城市体系 (核心为郑州)			
		海拉尔体系					
		哈尔滨体系	哈尔滨体系			绥化、大庆、佳木斯、齐齐哈尔、呼伦贝尔	
		佳木斯体系					
		齐齐哈尔体系					
北方体系	鸡西体系						
	沈阳体系	沈阳体系			朝阳		
	锦州体系	大连体系			鞍山		
	大连体系	大连体系					
	丹东体系						
北方体系	长春体系	长春体系			吉林		
	延吉体系						
	通化体系						
	白城体系						
	兰州体系	兰州体系			嘉峪关、西宁		
北方体系	嘉峪关体系	兰州体系					
	西宁体系	银川体系			吴中		
	银川体系	银川体系					
	乌鲁木齐体系	乌鲁木齐体系			巴州、阿克苏		
	阿克苏体系						
北方体系	郑州体系	郑州体系			新乡、洛阳、许昌、南阳、平顶山、晋城、周口、驻马店、商丘、安阳		
	洛阳体系						
	西安体系	西安体系			宝鸡、渭南、延安、榆林		
	太原体系	太原体系			忻州、晋中、吕梁、运城、临汾、长治、大同		

注:由一级城市体系、二级城市体系与三级城市体系的中国城市体系的等级结构及其空间格局是参考顾朝林实证研究,而三级城市体系中,北京体系包括天津体系与大同体系,而上海体系包括无锡体系、杭州体系、宁波体系与金华体系;由国家城市体系、区域城市体系与省域城市体系以及省域节点城市的中国城市体系的等级结构及其空间格局是基于本文实证研究,国家城市体系与区域城市体系均以核心节点城市的自然区位命名,而省域城市体系以区域节点城市命名,北京与上海两个国家节点城市不参与省域城市体系的划分识别。



象至少是地级城市,研究对象的评估数目存在巨大差异。

对基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国城市体系等级结构及其空间格局进行进一步对比分析。①省域城市体系与顾的三级城市体系存在一对多模式(数目多,如武汉体系对应顾的武汉体系和襄阳体系)或一对一模式(数目少,重庆体系对应顾的重庆体系)。②本文研究对象的基础单元是地级城市而顾的基础单元是县级城市,省域节点城市可解释为省域城市体系下一级别的核心城市。③省域城市体系与顾的三级城市体系的等级结构及其空间格局存在时空差异,比如顾的徐州体系分别属于二级城市体系的上海体系与一级城市体系的南方体系,而本文分别属于省域城市体系的济南体系与区域城市体系的华北城市体系以及国家城市体系的北方城市体系,比如顾的海拉尔体系属于北京体系,而本文则依次属于省域城市体系的哈尔滨体系与区域城市体系的东北城市体系。④省域城市体系与顾的三级城市体系存在识别评估的体系取舍,比如顾的拉萨体系在本文中不存在,而本文新增的合肥体系是省域城市体系。综上所述,中国城市体系的等级结构及其空间格局的时空评估总体上是科学客观的,基于DMSP/OLS夜间灯光数据对城市体系的等级结构及其空间格局进行综合评估是可行的与可信的。

## 5 讨论与结论

(1) 基于DMSP/OLS夜间灯光对中国城市体系的等级结构及其空间格局进行综合评估,中国大陆地区城市体系的核心节点城市依次分级为7个国家节点、26个区域节点与107个省域节点以及非节点城市,据此将城市体系空间格局聚类为2个国家城市体系、8个区域城市体系与31个省域城市体系。基于DMSP/OLS夜间灯光对中国城市体系的实证研究科学性探讨以顾朝林相关研究作为评估基准,总体而言基于DMSP/OLS夜间灯光对城市体系的等级结构及其空间格局进行实证研究是可信的和可行的。

(2) 完善的城市体系建立于城市化发展到特定阶段的一定地域内城市之间的时空作用<sup>[25-26]</sup>,缺少时空联系的区域城市难以形成完善的城市体系<sup>[27]</sup>。灰箱系统甚至黑箱系统的城市体系时空联系的矢量网络要素(人物流、资金流与信息流等<sup>[28]</sup>)是难以获取与难以测度的,而不论以城市之间矢量联系的流量和流向评估城市体系的功能连接度,还是以核心城市时空联系的强度和广度评估城市体系的结构连接度,都受困于研究数据匮乏或研究方法复杂而难以进行<sup>[29]</sup>。DMSP/OLS夜间灯光能够综合表征城市地区人类活动的广度与强度,并与城市体系时空联系的各类矢量网络要素存在显著相关关系。形式简单而内涵丰富的夜间灯光指数以灯光强度与灯光广度综合表征城市地区人类活动的作用强度与作用广度,并以此作为城市体系时空联系的网络要素引入引力模型以综合评估城市体系的结构连接度与功能连接度。DMSP/OLS夜间灯光评估城市体系时空联系不仅有效克服了单一统计指标的片面性与虚高,也高效完善了综合指标体系的过度性与繁复,不仅从理论上实现了单一评估指标与综合指标体系的科学融合,也从实证中探讨论证了基于DMSP/OLS夜间灯光对中国大陆地区城市体系等级结构及其空间格局进行评估分析是可信的与可行的。

传统的城市体系实证研究的研究数据多源于人为统计数据(城市GDP、非农人口、交通流等<sup>[30]</sup>),而引入定量遥感数据对城市体系进行实证研究尚属首次;过往的夜间灯光实证研究的研究领域多探讨夜间灯光与人类社会相关因素(城市化、城市人口、能源消耗、碳排放)的模型模拟与定量相关,而基于夜间灯光数据的城市体系实证研究尚无涉及。简而言之,本文实证研究最为重要的研究意义就是探讨基于DMSP/OLS夜间灯光对中国大陆地区城市体系等级结构及其空间格局进行评估分析的可信性与可行性。

(3) 基于夜间灯光探讨中国城市体系的等级结构与空间格局虽被首次论证是科学的,本文实证研究却也面临不容忽视的研究不足。其一,DMSP/OLS夜间灯光虽可综合估测城

市体系时空联系的理论潜力却非实测的矢量网络要素,定量遥感的大尺度性与夜间灯光的非矢量性难以避免的加剧数据误差,实际误差又必然在一定意义上影响城市体系时空联系的定量测度,而城市体系等级结构与空间格局也可能在一定程度上受其制约,有效控制实际误差是必需的<sup>[31]</sup>。其二,虽然引入城市体系实证研究的引力模型并非传统意义的物理模型而是一种模型参数因时因地而异的适宜性评估系统,引力模型对城市体系时空联系的定量估算却是建立于实证研究的一系列理论假设与情景模拟,必然难以全面代表实践中纷繁复杂的城市体系时空联系,合理控制理论误差是必须的<sup>[32]</sup>。其三,城市体系是一种城市之间彼此依存并相互作用的存在于局部地域的时空联系相对状态形式,而城市体系时空界线在现有技术条件与数据条件等客观现实条件下难以全面定量评估并科学明确识别城市体系的客观界线,或者说城市体系的时空界线并非一般意义的明确界线而是一种特殊的模糊地带,其空间形式是一种逐渐过渡式的<sup>[33-34]</sup>。众所周知,城市体系时空界线的现实之难以以短时解决,而城市体系实证研究也不能囿于现实困境,城市体系时空界线的模糊地带需要逐渐趋于细化明晰,而模糊地带的逐步深化细化是以一系列相关研究为基础<sup>[35]</sup>,故此本文实证研究的研究结论难免存在一些值得商榷的地方,尤其城市体系时空界线的识别。

(4) 基于DMSP/OLS夜间灯光探讨中国城市体系的实证研究需要进一步的修正完善,研究数据需要适时加入表征城市体系时空联系的矢量网络要素以填补夜间灯光的无矢量性,而研究模型也需要适地融合夜间灯光与矢量网络要素以尽可能的减少理论假设与弱化情景模拟。基于DMSP/OLS夜间灯光的中国地区城市体系的实证研究需要进一步深入探讨城市体系的等级结构及其空间格局,以逐渐完善城市体系时空界线的定量识别,而后引入多时相的DMSP/OLS夜间灯光对中国地区城市体系的时空演化进行综合分析,以明晰改革开放以来中国地区城市体系的时空演化规律并模拟城市体系的未来演化趋势<sup>[36]</sup>。基于多时相夜间灯光探讨城市体系的时空演化是实证研究的未来之路。

## 参考文献(References):

- [1] Wang Ying, Zhang Jing, Li Chenggu et al. Evolution and spatial characteristics of city scale distribution in Northeast China. *Economic Geography*, 2011, 31(1): 55-59. [王颖, 张婧, 李诚固 等. 东北地区城市规模分布演变及其空间特征. *经济地理*, 2011, 31(1): 55-59.]
- [2] Lu Lachang, Li Yong. A research on Chinese renovation urban system based on urban renovation function. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(2): 177-190. [吕拉昌, 李勇. 基于城市创新职能的中国创新城市空间体系. *地理学报*, 2010, 65(2): 177-190.]
- [3] Cui Shilin, Long Yi, Zhou Tong et al. Spatial evenness characteristic based on meta fractal dimension model in Jiangsu province. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 188-194. [崔世林, 龙毅, 周侗 等. 基于元分维模型的江苏城镇体系空间均衡特征分析. *地理科学*, 2009, 29(2): 188-194.]
- [4] Wang Maojun, Cao Guangzhong, Zhao Qunyi et al. Study on structure of urban system in China from the angles of distance between cities and city population size. *Geographical Research*, 2010, 29(7): 1257-1268. [王茂军, 曹广忠, 赵群毅 等. 基于距离与规模的中国城市体系规模结构. *地理研究*, 2010, 29(7): 1257-1268.]
- [5] Zhong Yexi, Lu Yuqi. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on railway network. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 785-794. [钟业喜, 陆玉麒. 基于铁路网络的中国城市等级体系与分布格局. *地理研究*, 2011, 30(5): 785-794.]
- [6] Sun Zaihong, Yuan Yuan, Wang Yahua et al. Research on city-size distribution and allometric growth in Jiangsu Province based on fractal theory. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 785-794. [孙在宏, 袁源, 王亚华 等. 基于分形理论的江苏省城市规模分布与异速生长特征. *地理研究*, 2011, 30(12): 785-794.]
- [7] Zhang Qingling, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(9): 2320-2329.
- [8] Lu Dengsheng, Tian Hanqin, Zhou Guomo et al. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3668-3679.
- [9] Zeng Chunqing, Zhou Yi, Wang Shixin et al. Population spatialization in China based on night-time imagery and land use data. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(24): 9599-9620.
- [10] Zhao Naizhou, Currit Nate, Samson Eric. Net primary production and gross domestic product in China derived from satellite imagery. *Ecological Economics*, 2011, 70(5): 921-928.

- [11] He Chunyang, Ma Qun, Li Tong et al. Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22 (1): 125-136.
- [12] Wang Wen, Cheng Hui, Zhang Li. Poverty assessment using DMSP/OLS night-time light satellite imagery at a provincial scale in China. *Advances in Space Research*, 2012, 49(8): 1253-1264.
- [13] Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on aviation network. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 23-32. [薛俊菲. 基于航空网络的中国城市体系等级结构与分布格局. *地理研究*, 2008, 27(1): 23-32.]
- [14] Wang Chengjin. Research method of inter-urban traffic flow fields: A case study of railway passenger flow in China. *Geographical Research*, 2009, 28(6): 1464-1475. [王成金. 城际交通流空间流场的甄别方法及实证: 以中国铁路客流为例. *地理研究*, 2009, 28(6): 1464-1475.]
- [15] Li Na, Yu Taofang, Guo Huaicheng. Chinese urban system in terms of domestic air flows since 1995. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(6): 972-984.
- [16] Zhou Binxue, Dai Teqi, Liang Jinshe et al. The evolution of the level of economic scale of urban system based on fractal analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(2): 156-161. [周彬学, 戴特奇, 梁进社 等. 基于分形的城市体系经济规模等级演变研究. *地理科学*, 2012, 32(2): 156-161.]
- [17] Tonts M, Taylor M. Corporate location, concentration and performance: Large company headquarters in the Australian urban system. *Urban Studies*, 2010, 47(12): 2641-2664.
- [18] Pan Jinghu, Shi Peiji, Dong Xiaofeng. Measurements for urban hinterland area of cities at prefecture level or above in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(6): 635-645. [潘竞虎, 石培基, 董晓峰. 中国地级以上城市腹地的测度分析. *地理学报*, 2008, 63(6): 635-645.]
- [19] Gu Chaolin, Pang Haifeng. Study on spatial relations of Chinese urban system: Gravity model approach. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 1-12. [顾朝林, 庞海峰. 基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分. *地理研究*, 2008, 27(1): 1-12.]
- [20] Anderson G, Ge Y. The size distribution of Chinese cities. *Regional Science and Urban Economics*, 2005, 35(6): 756-776.
- [21] Fragkias M, Seto K C. Evolving rank-size distributions of intra-metropolitan urban clusters in south China. *Computers Environment and Urban Systems*, 2009, 33(3): 189-199.
- [22] Zhang Xiaolei, Lei Jun. Trend of urban system structure under the restriction of water and land resources in Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 511: 179-188.
- [23] Xie Yichun, Ward R, Fang Chuanglin et al. The urban system in west China: A case study along the midsection of the ancient Silk Road-Hexi Corridor. *Cities*, 2007, 24(1): 60-73.
- [24] Liang Shumin. Research on the urban influence domains in China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(12): 1527-1539.
- [25] Liu Hao, Zhang Yi, Zheng Wensheng. Evaluation on spatio-temporal development and interaction of intensive urban land use and urbanization: Case studies of the cities in the Bohai Rim Region. *Geographical Research*, 2011, 30(10): 1805-1817. [刘浩, 张毅, 郑文升. 城市土地集约利用与区域城市化的时空耦合协调发展评价. *地理研究*, 2011, 30 (10): 1805-1817.]
- [26] Liu Hao, Zheng Wensheng, Zhang Yi et al. An analysis on the coordination coefficient of the intensiveness of urban land use and urbanization: A case of Bohai Rim Region. *Journal of Huazhong Normal University: Nat. Sci.*, 2011, 30 (10): 1805-1817. [刘浩, 郑文升, 张毅 等. 城市土地集约利用度与城市化综合水平协调度分析: 以环渤海地区为例. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 46(5): 616-623.]
- [27] Myint S W. An exploration of spatial dispersion, pattern, and association of socio-economic functional units in an urban system. *Applied Geography*, 2008, 28(3): 168-188.
- [28] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 899-910. [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性. *地理学报*, 2009, 64(8): 899-910.]
- [29] Derudder B, Witlox F, Taylor P J. US cities in the world city network: comparing their positions using global origins and destinations of airline passengers. *Urban Geography*, 2007, 28(1): 74-91.
- [30] Chen Gangqiang, Li Na, Xu Xueqiang. Spatial agglomeration and evolution of urban population in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(10): 1045-1054. [陈刚强, 李娜, 许学强. 中国城市人口的空间集聚特征与规律分析. *地理学报*, 2008, 63(10): 1045-1054.]
- [31] Leng Bingrong, Yang Yongchun, Li Yingjie et al. Spatial characteristics and complex analysis: A perspective from basic activities of urban networks in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 199-211. [冷炳荣, 杨永春, 李英杰 等. 中国城市经济网络结构空间特征及其复杂性分析. *地理学报*, 2011, 66(2): 199-211.]
- [32] Liu Miaolong, Chen Yu, Chen Peng et al. The time-scale effects of the city-size hierarchy in China based on rank-clock methodology. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(12): 1235-1245. [刘妙龙, 陈雨, 陈鹏 等. 基于等级钟理论的中



- 国城市规模等级体系演化特征. 地理学报, 2008, 63(12): 1235-1245.]
- [33] Bosker M, Brakman S, Garretsen H et al. A century of shocks: The evolution of the German city size distribution 1925-1999. *Regional Science and Urban Economics*, 2008, 38(4): 330-347.
- [34] Du Guoqing. Development mechanism of urban system in rapidly changing period in China. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(1): 10-18.
- [35] Wang Li, Deng Yu, Niu Wenyuan. The definition and identification of urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(8): 1059-1070. [王丽, 邓羽, 牛文元. 城市群的界定与识别研究. 地理学报, 2013, 68(8): 1059-1070.]
- [36] Tan Minghong, Li Xiubin. The evolution of urban system of the United States in the 20th century and its implications for China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(12): 1488-1495. [谈明洪, 李秀彬. 20世纪美国城市体系的演变及其对中国的启示. 地理学报, 2010, 65(12): 1488-1495.]

## Hierarchical structure and spatial pattern of China's urban system: Evidence from DMSP/OLS nightlight data

WU Jiansheng<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, PENG Jian<sup>2</sup>, MA Lin<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Human Environmental Science and Technology, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China;*

2. *College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** A perfect urban system can promote the urban agglomeration effect, and the prerequisite for urban system is that regional socio-economic development should actually reach a certain stage. Thanks to the strong correlation between the urban element flow and the mass of spatial units, the node system study in general should scientifically measure the interaction intensity among spatial units, and also avoid the difficulty that the vector data of the function system study is still hard to obtain and measure. As a special node system study data, DMSP/OLS nighttime light data can be used to measure urban human's activity intensity and activity breadth comprehensively, having a strong positive correlation with local GDP, population size, urbanization level and so on. So the urban nighttime light index can make a perfect combination between a single statistical index and a comprehensive index system. The gravity model based on DMSP/OLS nighttime light data is used to measure the interaction intensity among 341 cities in mainland China, and then the two step cluster analysis is made to analyze hierarchical structure and spatial pattern of mainland China urban system comprehensively. There are 7 national node cities (including Beijing, Tianjin, Shanghai, Guangzhou, Chongqing, Harbin and Shenyang), 26 regional node cities and 107 provincial node cities in mainland China. Mainland China urban system are divided into 2 national urban systems (the northern national urban system and the southern national urban system) and 8 regional urban systems (North China urban system, Northeast China urban system, Northwest China urban system, Middle Yellow River urban system, and East China urban system, South China urban system, Southwest China urban system, Middle Yangtze River urban system), as well 31 provincial urban systems. Every urban system is closely linked, interdependently and interactionally, whose slope is relative and local area, and then some urban systems and many cities may be define accurately again, but the empirical study of hierarchical structure and spatial pattern of mainland China urban system evidenced from DMSP/OLS nightlight data is rather objective and compellent. All in all, to analyze hierarchical structure and spatial pattern of urban system based on DMSP/OLS nightlight data is obviously feasible and scientific.

**Key words:** urban system; hierarchical structure; spatial pattern; gravity model; DMSP/OLS; China