

中图法分类号: TP79, TP753 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0666-08

论文索引信息: 杨洋, 何春阳, 赵媛媛, 李通, 乔云伟. 利用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据提取城镇用地信息的分层阈值法研究[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 666-673

利用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据提取城镇用地信息的分层阈值法研究

杨洋^{1),2)}, 何春阳^{1),2)}, 赵媛媛^{1),2)}, 李通^{1),2)}, 乔云伟²⁾

¹⁾(地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875) ²⁾(北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要: DMSP/OLS 夜间灯光数据是提取大尺度城镇用地信息的有效数据手段。利用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据, 在传统二分比较法的基础上, 发展一种提取城镇用地信息的新方法——分层阈值法。该方法采用分层分类的思想, 不断地将灯光阈值相近的行政单元划分到相同的集合, 直至集合内各行政单元的灯光阈值完全相同为止。基于分层阈值法, 从 2002 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据中提取中国内地的城镇用地信息, 并利用统计数据和 Landsat ETM+ 数据分别从数量特征和空间格局上对提取结果进行精度评价。研究结果表明, 分层阈值法不仅克服了传统二分比较法需要逐个行政单元求取阈值导致计算效率较低的缺陷, 优化了阈值求解过程, 提高了城镇用地信息提取效率, 而且具有较高的可靠性和推广应用价值。

关键词: 分层阈值法; 二分法; DMSP/OLS; 城镇用地

Research on the layered threshold method for extracting urban land using the DMSP/OLS stable nighttime light data

Yang Yang^{1),2)}, He Chunyang^{1),2)}, Zhao Yuanyuan^{1),2)}, Li Tong^{1),2)}, Qiao Yunwei²⁾

¹⁾(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (Beijing Normal University), Beijing 100875 China)

²⁾(College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875 China)

Abstract: DMSP/OLS nighttime light data is effective and economical for mapping urban land on a large scale. Based on conventional dichotomy method, Layered Threshold Method (LTM) was developed to extract the urban land using the DMSP/OLS stable nighttime light data. The administrative regions with close thresholds were divided into the same set by LTM continually. The process was ended until the thresholds in one set were selfsame. The urban land of Chinese mainland in 2002 was extracted based on LTM using the DMSP/OLS stable nighttime light data. Compared to the traditional inefficient dichotomy method, whose efficiency depended on the amount of administrative regions, LTM searched the thresholds of the sets instead of each administrative region, optimizing the previous method. The performance of the LTM was evaluated to be credible and valuable according to statistical data and Landsat ETM+ data.

Keywords: layered threshold method; dichotomy method; DMSP/OLS; urban land

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-12-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB950901); 国家自然科学基金面上项目(40971059)。

第一作者简介: 杨洋(1984—), 女。北京师范大学资源学院土地资源管理专业博士研究生, 主要研究方向为城市遥感与土地资源管理。E-mail: yy510@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者: 何春阳, E-mail: hcy@bnu.edu.cn。

0 引言

改革开放以来,中国内地城镇化发展取得了举世瞩目的成就,但同时也一定程度上加剧了城镇空间拓展失控^[1]。快捷、准确地提取中国内地城镇用地空间信息,对于认识和理解中国内地城镇用地空间格局特征、调整和优化土地利用格局具有十分重要的作用^[2]。目前,针对整个中国内地城镇用地进行的代表性研究主要包括两类。一类基于统计数据,既经济又快捷^[1,3],但统计数据由于缺乏空间信息,往往难以满足城镇用地空间格局研究的需要。另一类基于遥感数据,主要以 Landsat TM 数据为基础、中巴地球资源二号卫星(CBERS-2)的 CCD 数据等为辅来获取整个中国内地的城镇用地空间信息^[4-5]。但这类研究由于成本高、历时长,难以快速、便捷地提供整个中国内地的城镇用地空间信息,在一定程度上限制了其普适性。

美国军事气象卫星(DMSP)搭载的 Operational Linescan System (OLS)传感器获取的全球夜间灯光数据是从事大尺度城市化研究的一种有效的数据手段^[6-7]。目前,利用 DMSP/OLS 数据提取城镇用地信息的方法可分为两大类:一类是基于若干区域阈值的以图像分割为特征的方法,主要包括经验阈值法^[8]、突变检测法^[9]、基于较高分辨率数据的比较法^[10]和基于统计数据的二分比较法^[2]等;另一类是基于像元的以图像分类为特征的方法,包括支持向量机(SVM)分类方法^[11]和混合像元线性分解方法^[12]等。目前国内外应用较广泛的方法是前一类基于若干区域阈值的以图像分割为特征的方法。而后一类基于像元的以图像分类为特征的方法,由于起步较晚,其应用于国家尺度的大范围城镇用地信息提取的普适性还没有得到有效证实。而在基于若干区域阈值的以图像分割为特征的方法中,经验阈值法虽然简单易行,但其主观性较强;突变检测法虽消除了人为主观影响,但却忽略了城市发展的区域性差异特征;基于较高分辨率数据的比较法虽能同时从空间上和数量上控制提取结果的精度,但其数据获取的高成本和高难度限制了该方法在大范围内的广泛应用。中国国土资源部几乎每年都要发布一次中国内地范围内的城镇用地面积统计数据。在假定该数据能够反映中国内地各行政单元内城镇用地总量特征的前提下,以此统计数据为参考依据,将

具有空间信息的灯光数据在不同阈值下提取的城镇用地面积与之进行比较^[2],无疑能够既经济又快速便捷地获取中国内地城镇用地空间信息。因此,相比之下,已成功应用于中国内地城市化空间过程的重建以及区域城镇用地信息提取研究^[2,13-14]的基于统计数据的二分比较法由于成本低廉、方法简便,更能满足国家尺度城镇用地空间信息提取研究的实际需要。但该方法实现的快捷程度,与统计数据的行政单元个数密切相关,需逐一求取每个行政单元的阈值。即,若有 N 个行政单元,需求取 N 次阈值。因此,当 N 值较大时,该方法必将因过多的重复性操作而效率低下。

鉴于此,针对当前基于统计数据的二分比较法的不足,发展一种无需逐个行政单元求取阈值的分层阈值法。进而以该方法为基础,利用 2002 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据和城镇用地面积统计数据提取中国内地城镇用地信息,并对提取结果的数量特征和空间格局进行检验。

1 数据

使用的数据主要包括 3 种:

1) 2002 年中国地区 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据(见图 1)。

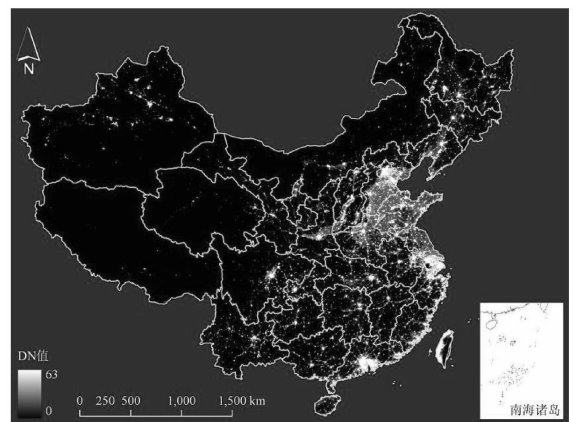


图 1 2002 年中国地区的 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据
Fig.1 DMSP/OLS stable nighttime light data in 2002 in China

该数据源自全球 1992—2003 年逐年 DMSP/OLS 夜间灯光时间序列图像(version2),是由美国空军气象局(AFWA)收集 DMSP/OLS 数据、NOAA 国家地球物理数据中心(NGDC)对其进行处理而生成的。全球灯光图像的获取时间为当地时间的 20:30 ~ 21:30^[15]。经计算,中国内地各地灯光影像的获取

时间间隔前后相差不超过 15 min。数据的有效 DN 值范围是 1 ~ 63 的整数,包含城市、村镇以及其他类型的稳定灯光,而火灾等短暂性事件的瞬时亮光则已被摒除,可在 1 km 空间尺度上提供人类的活动信息。从 2002 年全球 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据中得到中国地区的数据之后,将其投影转换为兰勃特等积方位投影(Lambert Azimuthal Equal Area Projection)。这类投影只会使角度和长度变形由投影中心向周围增大,而在面积上并不会产生变形,可避免因面积变形而在城镇用地提取过程中产生误差。

2) 2002 年中国内地各省城镇用地面积统计数据^[16],用于控制灯光数据提取的城镇用地总量。

3) 2002 年季相较为一致且质量较好的 Landsat ETM + 影像。主要覆盖了北京(123/32)、合肥(121/38)、杭州-绍兴(119/39)3 个地区,用于评价灯光数据提取结果的精度。对影像进行几何校正、投影变换等处理,投影方式及参数与灯光数据相同。

2 方法

2.1 传统的二比较法

基本思路是在 DMSP/OLS 图像中,采用二分法的思路,快速设定各行政单元的阈值,提取各行政单元的城镇用地空间格局特征和面积总量信息,并将提取结果中的面积信息与统计数据中各行政单元城镇用地面积进行比较,直到某一阈值条件下利用 DMSP/OLS 提取的各行政单元城镇用地面积总量与统计数据充分接近为止^[2]。具体而言,该方法主要包括以下几个步骤:

1) 设定某行政单元的潜在城镇阈值 D_i 并计算该阈值下的城镇用地面积 D_a

$$D_i = \text{int}[(D_{\max} + D_{\min})/2] \quad (1)$$

式中, D_{\max} 、 D_{\min} 分别为该行政单元内灯光图像最大 DN 值、最小 DN 值;

$$D_a = \sum_{D_x=D_i}^{D_{\max}} f(D_x) \quad (2)$$

式中, D_x 表示 $D_i \sim D_{\max}$ 的某一 DN 值, $f(D_x)$ 表示该行政单元内 DN 值为 D_x 的城镇用地像元的总面积。

2) 比较该行政单元潜在阈值下的城镇用地面积 D_a 与统计数据中的城镇用地面积 S 之间的差值 $E(D_i)$, 并调整阈值范围

$$E(D_i) = D_a - S \quad (3)$$

式中,若 $E(D_i) < 0$, 则 $D_{\max} = D_i$; 若 $E(D_i) \geq 0$, 则 $D_{\min} = D_i$ 。

3) 重新设定新的阈值,直到 D_a 与 S 充分接近为止。在步骤 2) 确定的阈值范围中,转到式(1)重新设定新的阈值,并按照式(2)(3)重复计算比较,直到满足式(4)为止。此时的阈值 D_i 就是使提取的城镇用地面积总量与同期统计数据充分接近的该区最佳城镇用地提取阈值。

$$|E(D_i - 1)| \geq |E(D_i)| \leq |E(D_i + 1)| \quad (4)$$

式中, $E(D_i)$, $E(D_i - 1)$, $E(D_i + 1)$ 分别表示在阈值 D_i 及其邻域(取一个单位步长)条件下,依据式(2)(3)计算得到的 D_a 与 S 的差值。

4) 重复 1) — 3) 中的步骤,逐个求取其他行政单元的最佳城镇用地提取阈值。

按照上述步骤,每个行政单元需单独求取 1 次阈值。如果有 N 个行政单元,则共需求取 N 次阈值。一旦行政单元数量庞大,则提取城镇用地信息的效率势必会受到影响。

2.2 分层阈值法

2.2.1 基本原理与流程

分层阈值法的基本思路是在采用二分法对整个行政区集合内 1 ~ 63 的阈值范围进行调整,使灯光数据提取的城镇用地面积总量与同期统计数据充分接近的同时,还根据城镇用地面积总量与同期统计数据之间的差值,采用分层分类的思想,不断地将集合内各个行政单元层层分类,使阈值相近的行政单元划分到同一个集合,阈值相差较大的尽可能划分到不同的集合,直至每个集合内的行政单元的阈值完全相同为止。设 $A_i B_j$ 为第 i 层第 j 类组成的集合, $A_0 B_0$ 为整个研究区内所有行政单元组成的初始集合,分层阈值法的分层分类思想如图 2 所示。

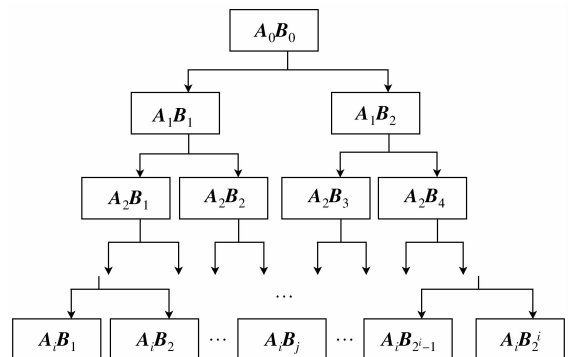


图 2 分层分类示意图

Fig. 2 Sketch map of hierarchical classification

该方法的具体步骤如下:

1) 根据二分法确定集合 $A_i B_j$ 的最佳阈值 D_i , 并计算该阈值下集合内各行政单元的城镇用地面积

$$D_k = \sum_{D_x=D_i}^{D_{\max}} f(D_x) \quad (5)$$

式中, k 为行政单元的编号, D_x 表示 $D_i \sim D_{\max}$ 的某一 DN 值, $f(D_x)$ 表示行政单元 k 内 DN 值为 D_x 的城镇用地像元的总面积。

2) 比较集合 $A_i B_j$ 潜在阈值 D_i 下集合内各行政单元的城镇用地面积 D_k 与统计数据中的城镇用地面积 S_k 之间的差值 $E(D_i)$, 并将各行政单元分类:

$$E(D_i) = D_k - S_k \quad (6)$$

将 $E(D_i) < 0$ 的行政单元组成集合 $A_{i+1} B_{2j-1}$, 此集合中 $D_{\max} = D_i$; 将 $E(D_i) \geq 0$ 的行政单元组成集合 $A_{i+1} B_{2j}$, 此集合中 $D_{\min} = D_i$ 。

3) 令 $i = i + 1$, 转到步骤 1) 重新计算各个集合的潜在阈值, 并按照式(6)重复计算比较, 直到集合里所有的 $E(D_i)$ 值都满足公式(4)为止。此时, 集合 $A_i B_j$ 的最佳阈值即为集合内各个行政单元共同的最佳阈值。

2.2.2 优势分析

由于 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据的 DN 值为 1 ~ 63 的整数, 因此, 即使该范围内的每个 DN 值都能对应一个集合, 利用分层阈值法得到的第 i 层集合数 M 最多也只有 63 个。而根据分层阈值法的原理, 第 i 层的 M 个集合是由第 1, 2, 3, ..., $i - 1$ 层集合层一分为二得来, 故 i 的最大值为 6 层, 第 i 层以上的集合数 $M_0 \leq (2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + 2^5) = 63$ 。每个集合按照二分法求取 1 次阈值, 则不管行政单元的数量 (N) 多么庞大, 利用分层阈值法求出所有行政单元的阈值, 需要求取阈值的次数最多只有 63 次。

假设每次利用二分法求取阈值所耗时间相同, 为 T , 则分层阈值法最多需时 $63T$, 传统二分比较法需时 NT 。可以得出:

1) 当 $N \leq 63$ 时, $63T \geq NT$, 分层阈值法的效率不一定比传统二分法更高;

2) 当 $N > 63$ 时, $63T < NT$, 分层阈值法所需时间比传统二分法所需时间少, 至少可以省时 $(N - 63)T$, 至少比传统二分法提高效率 $\frac{(N - 63)T}{63T} = \frac{N - 63}{63}$ 倍。

由此可以看出, 当行政单元的个数大于 63 时, 分层阈值法的效率将高于传统二分比较法, 且行政单元的个数越多, 分层阈值法的优势越明显。根据星球地图出版社出版发行的 1: 460 万 2009 年中华人民共和国地图, 截止 2008 年 6 月底, 中国地级市、自治州、地区、盟共有 333 个, 县级市、县、自治县、旗、自治旗、市辖区及其他县级行政单元共 2859 个。若分别在中国地级行政单元和县级行政单元尺度上求取阈值, 则分层阈值法比传统二分法求取阈值的效率将要分别高出约 4 倍和 44 倍。若在全球范围内提取城镇用地信息, 分层阈值法获取结果的高效优势将会更加突出。

3 结果与分析

基于分层阈值法, 利用 2002 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据和现有的中国内地各省城镇用地面积统计数据, 求取各省城镇用地提取阈值并提取中国内地城镇用地信息(如图 3)。

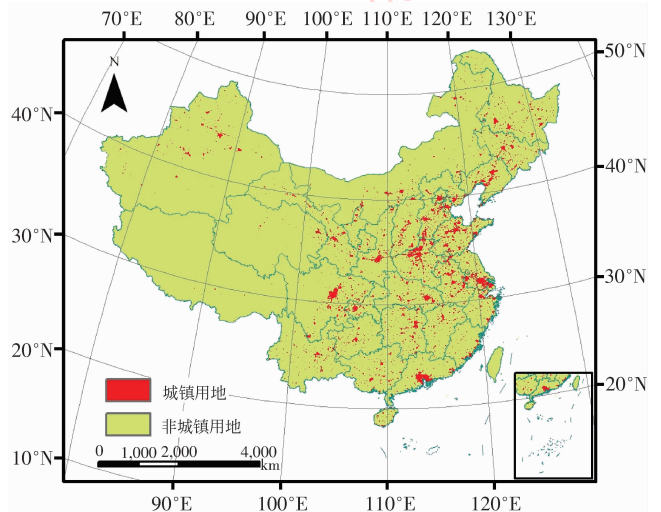


图 3 基于分层阈值法的中国内地 2002 年城镇用地提取结果

Fig.3 The extraction result of urban land-use in Chinese mainland in 2002 based on the layered threshold method

利用现有统计数据对灯光数据提取的中国内地 2002 年城镇用地总量进行精度评价。在全中国内地尺度, 相对误差小于 2%; 在省级尺度上, 60% 以上省份的相对误差在 5% 以内, 相对误差最大的省份其相对误差也没有超过 12% (见表 1)。由此可见, 利用分层阈值法从 DMSP/OLS 数据中提取的城镇用地信息首先在面积上与统计数据是非常接近的。

表 1 利用统计数据对灯光数据提取结果的精度评价

Tab. 1 Accuracy assessment on the results of DMSP/OLS data with the statistical data

| 省份 | 统计 / km ² | 提取 / km ² | 相对误差 / % |
|-----|----------------------|----------------------|----------|
| 北京 | 2 506.67 | 2 526 | 0.77 |
| 天津 | 2 320.00 | 2 358 | 1.64 |
| 河北 | 14 646.67 | 14 071 | -3.93 |
| 山西 | 7 340.00 | 7 032 | -4.2 |
| 内蒙古 | 11 553.33 | 12 469 | 7.93 |
| 辽宁 | 11 006.67 | 10 777 | -2.09 |
| 吉林 | 8 246.67 | 7 412 | -10.12 |
| 黑龙江 | 11 400.00 | 11 664 | 2.32 |
| 上海 | 2 066.67 | 2 063 | -0.18 |
| 江苏 | 14 106.67 | 14 001 | -0.75 |
| 浙江 | 6 360.00 | 6 418 | 0.91 |
| 安徽 | 12 760.00 | 13 439 | 5.32 |
| 福建 | 4 333.33 | 4 206 | -2.94 |
| 江西 | 6 126.67 | 5 780 | -5.66 |
| 山东 | 19 120.00 | 18 617 | -2.63 |
| 河南 | 18 140.00 | 17 011 | -6.22 |
| 湖北 | 9 653.33 | 8 932 | -7.47 |
| 湖南 | 10 360.00 | 10 886 | 5.08 |
| 广东 | 12 993.33 | 12 987 | -0.05 |
| 广西 | 6 526.67 | 6 345 | -2.78 |
| 海南 | 2 173.33 | 2 301 | 5.87 |
| 四川 | 13 013.33 | 13 470 | 3.51 |
| 贵州 | 4 326.67 | 3 811 | -11.92 |
| 云南 | 5 786.67 | 5 835 | 0.84 |
| 西藏 | 373.33 | 372 | -0.36 |
| 重庆 | 4 520.00 | 4 662 | 3.14 |
| 陕西 | 6 880.00 | 6 710 | -2.47 |
| 甘肃 | 8 700.00 | 7 840 | -9.89 |
| 青海 | 2 513.33 | 2 475 | -1.53 |
| 宁夏 | 1 626.67 | 1 572 | -3.36 |
| 新疆 | 9 460.00 | 9 963 | 5.32 |
| 总计 | 250 940.00 | 248 005 | -1.17 |

表 2 利用 ETM + 数据对 DMSP/OLS 提取结果的精度评价/%

Tab. 2 Accuracy assessment on the results of DMSP/OLS data with Landsat ETM + data

| | ETM + 提取结果/灯光数据提取结果 | 城镇用地比例 | 非城镇用地比例 | 总和 |
|-------|---------------------|--------|---------|--------|
| 北京 | 城镇用地比例 | 22.48 | 16.36 | 38.84 |
| | 非城镇用地比例 | 3.32 | 57.84 | 61.16 |
| | 总和 | 25.80 | 74.20 | 100.00 |
| | 总精度 | 80.32 | | |
| 合肥 | 城镇用地比例 | 10.16 | 13.89 | 24.05 |
| | 非城镇用地比例 | 0.43 | 75.52 | 75.95 |
| | 总和 | 9.99 | 90.01 | 100.00 |
| | 总精度 | 85.68 | | |
| 杭州-绍兴 | 城镇用地比例 | 9.17 | 13.51 | 22.68 |
| | 非城镇用地比例 | 1.33 | 75.99 | 77.32 |
| | 总和 | 10.50 | 89.50 | 100.00 |
| | 总精度 | 85.16 | | |

进一步参考已有工作^[2,10],选用较高分辨率的 Landsat ETM + 遥感影像从空间上对 DMSP/OLS 数据提取结果进行精度评价。由于基于 5,4,3 波段合成的 Landsat ETM + 影像的空间分辨率为 30 m,远高于 DMSP/OLS 数据的 1 km,我们认为这种评价是基本可行和可靠的。考虑到数据成本和资料限制问题,结合已有数据积累情况,参考国家统计局中国经济景气监测中心发布的《中国城市发展研究报告》,分别从“大城市”、“中等城市”和“小城市”这三个不同等级的城市代表中,各选择一个城市代表进行精度评价。具体的,“大城市”中选取的城市代表为北京,“中等城市”中选取的城市代表为合肥,“小城市”中选取的城市代表城市为绍兴,但鉴于绍兴与杭州在地理位置上紧邻,故而可利用同一景 Landsat ETM + 影像同时评价杭州-绍兴地区 DMSP/OLS 数据提取结果的精度。在对 Landsat ETM + 影像进行几何纠正、投影转换等相关预处理后,首先提取北京、合肥、杭州-绍兴地区的城镇用地信息,然后将其与 DMSP/OLS 数据提取结果进行比较。由表 2 和图 4 可见,以基于 ETM + 影像提取的城镇用地信息作为参考,3 个地区 DMSP/OLS 提取结果的总精度都在 80% 以上,DMSP/OLS 提取的城镇用地空间格局与 ETM + 提取的城镇用地格局特征基本吻合。

综上所述,灯光数据提取结果在数量上与统计数据保持基本一致,在空间上与 Landsat ETM + 遥感影像提取的城镇用地格局也基本吻合。可见,利用分层阈值法从灯光数据中提取的城镇用地信息,基本上可以反映 2002 年中国内地城镇用地信息的实际情况,具有一定的可信度。

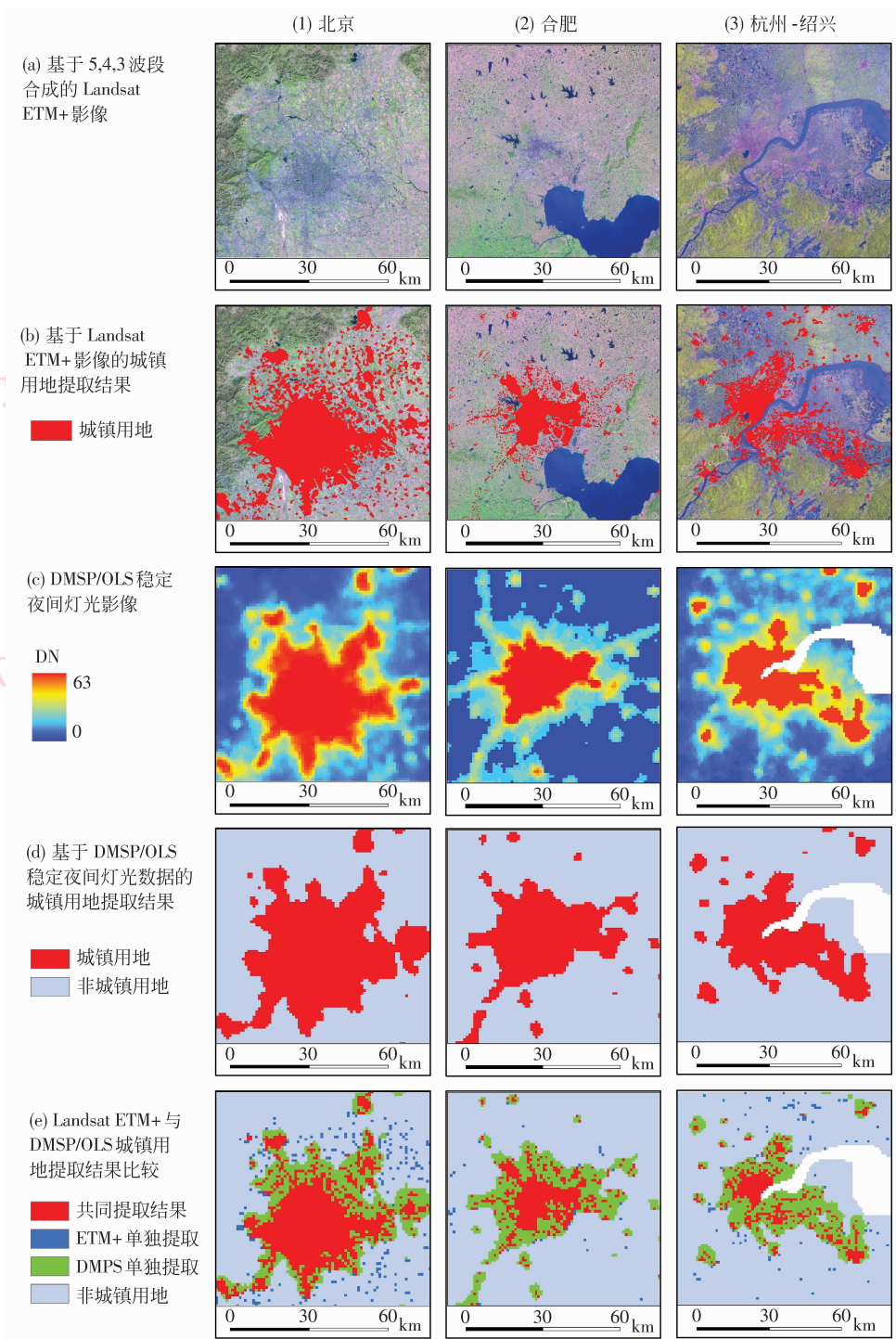


图 4 利用 Landsat ETM + 影像对提取结果进行的空间评价

Fig. 4 Accuracy assessment on the results of DMSP/OLS with the Landsat ETM + imagery

4 结 论

在传统二分比较法基础上发展而来的分层阈值法,其基本思路是根据城镇用地面积总量与同期统

计数据之间的差值,采用分层分类的思想,不断地将各个行政单元层层分类,使阈值相近的行政单元尽可能划分到同一个集合,阈值相差较大的尽可能划分到不同的集合,直至每个集合不能再继续分割出子集合为止。其本质不再是求取单个行政单元的阈

值,而是求取行政单元集合的阈值,从而优化了传统二分比较法的阈值求解过程,克服了原有方法需要逐个行政单元求取阈值的缺陷。当行政单元个数 N 超过 63 时,采用分层阈值法能明显提高求取阈值的效率,其效率是传统二分比较法的 $N/63$ 倍。行政单元个数越多,分层阈值法的优势越明显。若分别在中国地级行政单元和县级行政单元尺度上求取阈值,则分层阈值法比传统二分比较法求取阈值的效率分别高出约 4 倍和 44 倍。若在全球范围内提取城镇用地信息,分层阈值法的高效优势将会更加突出。

基于分层阈值法,从 2002 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据中提取了中国内地的城镇用地信息。利用统计数据对分层阈值法提取的城镇用地面积进行精度评价,结果表明二者在全中国内地尺度上的相对误差小于 2%,60% 以上省份的相对误差在 5% 以内。同时,进一步的评价结果也表明,DMSP/OLS 提取的城镇用地与利用较高分辨率的 Landsat ETM+ 数据获取的结果在空间形态上也是基本吻合的,二者的相似度在 80% 以上。这说明分层阈值法是具有一定的可靠性和推广价值的。

分层阈值法不仅能在一定程度上弥补现有统计资料空间信息不足的缺陷,而且在数据成本上也比 Landsat 等较高分辨率遥感数据低廉,能够利用遥感信息快速从统计数据中恢复大范围的空间信息,值得在大尺度的城镇用地信息提取研究中推广应用。需要指出的是,鉴于已有统计数据的收集情况,本研究中基于省级行政单元开展的案例应用旨在检验分层阈值法提取结果的可靠性,而非验证分层阈值法的效率优势。若能获取全国范围内市级甚至是县级行政单元的城镇用地面积统计数据,基于分层阈值法从统计数据中恢复城镇用地空间信息的精度将会进一步提高,且分层阈值法相对于传统二分比较法的效率优势将会得到更有效地证实。可以预期的是,随着详细的中国乃至全球城镇用地数据库的逐步建立、更新和完善,基于 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据的分层阈值法在宏观城市空间信息提取方面的研究中将发挥更大的作用。

鉴于基本目的是进行城镇用地空间信息提取新方法的探索,同时综合考虑实验数据被使用的广泛程度和验证数据的匹配情况,文中使用的数据为 2002 年数据。在下一步研究中,将以城镇用地空间格局和扩展过程分析为目的,在对 NGDC 于 2010 年

最新发布的 1992—2009 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据进行严格订正的基础上,开展时效性强且具有一定可靠性的中国内地景观城市化过程研究。

参考文献 (References)

- [1] Fang Chuanglin. The urbanization and urban development in China after the reform and opening-up [J]. *Economic Geography*, 2009, 29(1):19-25. [方创琳. 改革开放 30 年来中国的城市化与城镇发展[J]. *经济地理*, 2009, 29(1): 19-25.]
- [2] He C Y, Shi P J, Li J G, et al. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(13): 1614-1620.
- [3] Ge Quansheng, Zhao Mingcha, Zheng Jingyun. Land use change of China during the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6):698-706. [葛全胜, 赵名茶, 郑景云. 20 世纪中国土地利用变化研究[J]. *地理学报*, 2000, 55(6): 698-706.]
- [4] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000 [J]. *Science in China*, 2003, 46(4): 373-384.
- [5] Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1411-1420. [刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411-1420.]
- [6] Chen Jin, Zhuo Li, Shi Peijun, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: development of a light index for urbanization level estimation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(3): 168-175. [陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国内地城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 168-175.]
- [7] Zhuo Li, Shi Peijun, Chen Jin, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 893-902. [卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 20 世纪 90 年代中国内地城市时空变化特征——基于灯光指数 CNLI 方法的探讨[J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 893-902.]
- [8] Croft T. Nighttime images of the earth from space [J]. *Scientific American*, 1978, 239: 68-79.
- [9] Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C, et al. A technique for using composite DMSP/OLS "city lights" satellite data to accurately map urban areas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(3): 361-370.
- [10] Henderson M, Yeh E T, Gong P, et al. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery [J].

- International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 595-609.
- [11] Cao X, Chen J, Imura H, et al. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOT VGT data [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2205-2209.
- [12] Lu D S, Tian H Q, Zhou G M, et al. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely sensed data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3668-3679.
- [13] Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, et al. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 717-727. [谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响 [J]. 地理学报, 2007, 62(7): 717-727.]
- [14] Li Jinggang, He Chunyang, Shi Peijun, et al. The use of multisource satellite and geospatial data to study the ecological effects of urbanization: a case of the urban agglomerations in Bohai Rim [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(1): 115-126. [李景刚, 何春阳, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 灯光数据的快速城市化过程的生态效应评价研究——以环渤海城市群地区为例 [J]. 遥感学报, 2007, 11(1): 115-126.]
- [15] Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, et al. Night-time lights of the world: 1994-1995 [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2001, 56(2): 81-99.
- [16] Fan Zhiquan. Land Statistics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. [樊志全. 土地统计 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.]