

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.014

面向遥感分类精度评价的空间分层模式与分异性评估

吴亚楠¹ 董士伟^{2,3} 肖 聪^{2,3} 李西灿¹ 潘瑜春^{2,3} 牛 冲⁴

(1. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 4. 山东省地质测绘院, 济南 250014)

摘要: 为实现遥感分类抽样精度评估,以京津冀不同空间分辨率遥感数据产品为例,首先基于土地利用类型对遥感图像进行内部与边界对象划分,并构建不同的空间分层模式;其次,分别采用直接利用土地利用类型、图像8邻域算法、多尺度空间分异性方法、图像8邻域和多尺度空间分异性耦合方法进行空间分层;最后,设置与K-means聚类对比实验,并利用地理探测器定量评估不同空间分层模式的分异性。结果表明:不考虑内部与边界对象(6层)、考虑边界对象(12层)、考虑内部对象(18层)、考虑内部与边界对象(24层)和K-means(12、18、24层)空间分层模式相应的5组样本点集的 q 均值±标准偏差分别为 $0.252 \pm 0.022\ 66$ 、 $0.259 \pm 0.022\ 45$ 、 $0.321 \pm 0.019\ 01$ 、 $0.318 \pm 0.018\ 06$ 、 $0.269 \pm 0.006\ 98$ 、 $0.304 \pm 0.010\ 56$ 、 $0.317 \pm 0.011\ 25$;内部对象对空间分层分异性起主导作用,边界对象可以稍微提高空间分层分异性,分层数目也影响空间分层的分异性。本研究可更好地认识和理解内部和边界对象对提高空间分层分异性的贡献作用,对提出分异性更高的空间分层方法具有一定的研究价值和指导意义。

关键词: 遥感分类; 精度评价; 空间分层; 地理探测器; 抽样; 空间分异性

中图分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)08-0147-07 **OSID:** 

Spatial Stratification Mode and Differentiation Evaluation for Accuracy Assessment of Remote Sensing Classification

WU Ya'nan¹ DONG Shiwei^{2,3} XIAO Cong^{2,3} LI Xican¹ PAN Yuchun^{2,3} NIU Chong⁴

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
4. Geological Surveying and Mapping Institute of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

Abstract: In order to evaluate the sampling accuracy of remote sensing classification, taking Beijing – Tianjin – Hebei remote sensing data products with different spatial resolutions as an example, the internal and boundary objects of remote sensing image were firstly divided based on land use types, and different spatial stratification modes were constructed, including without considering internal and boundary objects, considering boundary objects, considering internal objects, both considering internal and boundary objects. Secondly, direct land use types, image eight-neighborhoods algorithm, multi-scale spatial differentiation method, coupling method of image eight-neighborhoods and multi-scale spatial differentiation were adopted for spatial stratification, respectively. Finally, a comparative experiment of K-means clustering method was set up, and the differentiation effects of different spatial stratification modes were quantitatively evaluated based on geographic detector. The results suggested that the mean and standard deviation of q of the corresponding five groups of sampling sites for the spatial stratification modes of without considering internal and boundary (6 strata), considering boundary (12 strata), considering internal (18 strata), both considering internal and boundary objects (24 strata), K-means (12, 18, 24 strata) in the Beijing – Tianjin – Hebei regions were $0.252 \pm 0.022\ 66$, $0.259 \pm 0.022\ 45$, $0.321 \pm 0.019\ 01$, $0.318 \pm 0.018\ 06$, $0.269 \pm 0.006\ 98$, $0.304 \pm 0.010\ 56$, and $0.317 \pm 0.011\ 25$, respectively. Internal objects played a leading role for spatial stratification differentiation and boundary

收稿日期: 2021-04-12 修回日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801276)和北京市自然科学基金项目(8192015)

作者简介: 吴亚楠(1996—),女,研究实习员,主要从事土地利用变化与遥感应用研究,E-mail: 1224273284@qq.com

通信作者: 董士伟(1984—),男,高级工程师,主要从事时空数据研究,E-mail: dshiwei2006@163.com

objects slightly improved spatial stratification differentiation, and the number of strata also affected the differentiation of spatial stratification. The research results can better understand the contributions of internal and boundary objects on improving spatial stratification differentiation, and had a certain research value and guiding significance for developing spatial stratification methods with high differentiation.

Key words: remote sensing classification; accuracy assessment; spatial stratification; geographic detector; sampling; spatial differentiation

0 引言

频繁的人类活动加剧了土地利用与土地覆被变化,精确的遥感分类图是分析土地利用变化的关键,提高精度评估的准确性与可靠性是遥感分类图合理应用的基础。分类精度评估主要通过抽样方式构建混淆矩阵计算总体精度 (Overall accuracy, OA) 和 Kappa 系数等^[1],常见的抽样方法包括分层抽样、简单随机抽样、系统抽样等^[2]。目前,精度评价样本点大多采用随机抽样,这导致样本点特征空间和地理空间代表性差,忽视了地物在空间分布上的自相关性和异质性,存在抽样效率低和样本信息冗余等问题^[3-4]。在总体分类精度或各地类分类精度评估上,分层抽样考虑了空间自相关性和分异性,且提高了样本点在特征空间和地理空间的代表性和均匀性^[5],与土地利用类型真实评价更为接近^[6]。空间分层抽样方法更为有效,空间分层方法是空间分层抽样的关键环节。

基于层内方差小、层间方差大的原则,空间分层根据某种属性特征和空间连续性将总体分为若干同质的区间,可为空间采样调查或监测提供支撑^[7-8]。空间分层的方式可大致分为两类:一是直接利用现有分区单元对研究区域进行分层,如土地利用类型^[9]、行政单元^[10]等;二是利用先验知识^[11]、历史数据、辅助数据^[12-13]等信息,采用一定的分类方法对区域变量进行空间分层。空间分层的方式不同,分层结果也存在差异,因此有必要对影响空间分层的各种因素进行深入细致的分析。直接采用分区单元可看作是无先验知识的空间分层方式^[5,14-15]。遥感分类不同于空间分层,其分类结果可作为空间分层的一种体现,根据不同的分层规则同一遥感分类可以具有多种空间分层结果。遥感图像上不同地物类型边界处存在混合像元,而现有的常规分层抽样算法较少考虑地类边界和内部像元或区域对空间分层分异性的影响,致使空间分层结果的空间分异性存在明显差异。如文献[16]利用 8 邻域算法进行内部像元和边界像元的判断,建立了一种考虑边界区域分类精度的分层抽样方法,提高了分类精度评估的准确性和稳定性。目前,空间分层的影响因素主要包括先验知识、参考数据、目标对象等,其中

目标对象的选择尤为关键。目标对象分为内部对象和边界对象两大类,内部对象是指相同土地利用类型的像元及其在不同空间分辨率上体现的差异,而边界对象是指不同土地利用类型之间相邻的边界像元。内部对象和边界对象的不同组合构建了不同的空间分层模式:即不考虑内部与边界对象、考虑边界对象、考虑内部对象、考虑内部与边界对象。目前,系统定量分析内部对象与边界对象对空间分层结果影响的研究还非常缺乏。

评估空间分层分异性结果,通常基于空间分层结果通过选择验证样本进行精度评估,或借助评估参数指标来验证空间分层效果。由于缺乏更高分辨率的遥感数据产品及其分类精度评价指标,因此很难量化内部对象和边界对象对空间分层分异性的贡献,导致精度评估方式很难开展。地理探测器是探测空间分异性及揭示其背后驱动力的统计学方法^[17],是度量和分析空间分层分异性的一种工具。本文以京津冀不同空间分辨率遥感数据产品为例,基于土地利用类型对遥感图像进行内部与边界对象划分,并构建不同空间分层模式,设置与 K-means 聚类对比实验,并采用地理探测器中的 q 参数定量评估不同空间分层模式对遥感图像空间分层的分异性效果,旨在更好地认识和理解内部和边界对象对提高空间分层分异性的贡献作用,以提出分异性更高的空间分层方法。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

京津冀位于华北平原北部,地理坐标为东经 113°27' ~ 119°50',北纬 36°3' ~ 42°40',总面积约为 $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,属于典型的温带半湿润半干旱的大陆性季风气候。京津冀北部和西部属于山区和高原,东部和南部属于平原;土地利用类型主要为耕地、森林、草地、建设用地和水域。京津冀的气候属性及地形地貌特点导致各个土地利用类型相互交错,错综复杂,科学合理的空间分层可以保证遥感分类精度评估的准确性和可靠性。

1.2 数据来源及预处理

研究采用 2017 年京津冀土地利用遥感数据产品和 NDVI 数据,数据详情如下:

(1)中国土地利用现状遥感监测数据产品:来源于中国科学院地理科学与资源研究所,主要采用 Landsat 8 卫星数据,空间分辨率为 30 m,将土地利用类型划分为 6 个一级类型和 25 个二级类型。

(2)FROM - GLC10 遥感数据产品:来源于清华大学,采用 Sentinel - 2 卫星数据,空间分辨率为 10 m,将土地覆被分为 10 个类型。

(3)MCD12Q1 遥感数据产品:来源于地理空间数据云,采用 MODIS 卫星数据,空间分辨率为500 m,土地利用与土地覆被主要分为 17 个类型。

(4)NDVI 数据:采用来源于地理空间数据云的空间分辨率为 30 m 的 Landsat 8 OLI 卫星数据,选取的影像中无云或云量较少,植被较为旺盛,对京津冀地区 2017 年可用的 23 景遥感影像进行归一化植被指数 NDVI 计算并采用最大值合成法生成年度 NDVI 图,用于遥感图像空间分层分异性效果评估。

基于 ArcGIS 10.6 和 ENVI 5.3 软件实现图像裁剪、空间坐标系转换及重分类处理。最终得到 6 类土地利用类型,分别为耕地、森林、草地、水域/湿地、建设用地和裸地。

2 研究方法

基于土地利用类型对遥感图像进行内部对象与边界对象划分构建不同的空间分层模式:不考虑内部与边界、考虑边界、考虑内部、考虑内部与边界对象空间分层模式及 K-means 聚类分层,并分别采用直接利用土地利用类型^[18]、图像 8 邻域算法、多尺度空间分异性方法、图像 8 邻域和多尺度空间分异性耦合方法、K-means 聚类算法进行遥感图像空间分层。其中,K-means 聚类算法是以距离作为相似性评价指标,指定 K 个初始聚类中心,根据样本之间的距离划分为 K 类^[19]。针对不同的土地利用类型,可以采用 K-means 聚类算法将每个类型分别空间聚类成 K 类。

2.1 区分内部与边界对象的遥感图像空间分层方法

区分内部与边界对象的遥感图像空间分层方法采用图像 8 邻域算法实现^[20]。图像 8 邻域算法遥感图像空间分层是结合“土地利用类型”与“是否边界”2 个依据进行分层,首先根据土地利用类型将遥感图像划分为相互独立的层,然后在各个层内根据内部与边界像元判别目标函数判断像元属性,将每个层继续划分为内部像元层和边界像元层。

图像 8 邻域算法是以研究区内某当前像元点为中心,顺时针或逆时针遍历其 8 个邻域内的像元,根据内部与边界像元判别目标函数进行内部与边界像元属性判断。如果当前像元与 8 邻域内的每个像元

土地利用类型一致,则当前像元为内部像元,反之则为边界像元。研究区边界处的像元(8 邻域像元不足)同样采用以上内部像元和边界像元判定方法。图像 8 邻域算法内部与边界像元判别目标函数为

$$P_0 = \begin{cases} P_i & (T_0 = T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = T_7 = T_8) \\ P_e & (\text{其他}) \end{cases} \tag{1}$$

式中 P_0 ——研究区某一当前像元
 P_i ——内部像元 P_e ——边界像元
 T_0 —— P_0 的土地利用类型
 T_i —— P_0 8 邻域内像元的土地利用类型 ($i = 1, 2, \dots, 8$)

2.2 不同尺度约束下的空间分层方法

地表景观具有复杂性及空间分异性等特点,地理要素可能在某一观测尺度下是同质的,但在另一观测尺度下却是异质的。多尺度空间分异性方法是根据像元在不同空间分辨率下的差异;较大尺度可以掩盖中小尺度数据差异;中尺度数据可以较处理好数据采集和精度间的关系;小尺度数据可以获取复杂的地理要素信息,但对数据质量和数据处理能力有很高要求,无法反映大面积地表信息^[21-22]。采用多尺度遥感数据产品,结合不同尺度优缺点,基于 ArcGIS 10.6 软件对 3 种不同空间分辨率的遥感数据产品重分类结果进行叠置分析,确定空间分层方法。

叠置分析 3 种不同空间分辨率遥感数据产品重分类结果的异同之处,判别土地利用类型是否一致。以 30 m 空间分辨率的遥感数据产品土地利用类型为主,与 10 m 和 500 m 空间分辨率的遥感数据产品相应位置的土地利用类型进行对比,判别分析一致、基本一致与不一致属性。根据耕地、森林、草地、水域/湿地、建设用地和裸地 6 类土地利用类型,最终得到土地利用类型一致、基本一致、不一致属性共 18 层。

2.3 空间分层分异性评估方法

地理探测器中的分异及因子探测器使用空间分异性指数 q 度量了因变量 Y 空间分异性及自变量 X 对因变量 Y 空间分异的解释能力^[23-24], q 越大则 Y 的空间分层分异性越高,即空间分层效果越好^[17]。 q 计算公式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{2}$$

式中 N_h ——层 h 的单元数
 N ——全区的单元数
 σ_h^2 ——层 h 的 NDVI 方差
 σ^2 ——全区的 NDVI 方差
 L ——空间分层总数

q 越大说明 Y 的空间分异性越好且值域为 $[0, 1]$ 。NDVI 能够反映地表植被覆被情况,而土地利用方式则直接决定地表是否有植被覆盖及覆盖植被类型、覆盖度、生长期等属性,因此可以采用年 NDVI 间接反映不同土地利用现状的空间差异^[10]。研究采用的中国土地利用现状遥感监测数据产品、FROM-GLC10 和 MCD12Q1 遥感数据产品在遥感分类和特征参数选取时均直接或间接参考 NDVI^[25],因此可以基于参数 q 通过刻画 NDVI 体现的不同土地利用现状空间差异,来间接反映同时期遥感图像空间分层的分异性。

3 结果与分析

3.1 不同空间分层模式的遥感图像空间分层结果

3.1.1 不考虑内部与边界对象空间分层模式

不考虑内部与边界对象空间分层模式直接利用土地利用类型进行遥感图像空间分层,其空间分层结果如图 1a 所示。最终处理得到 6 个层,分别是耕地、森林、草地、水域/湿地、建设用地、裸地层。

3.1.2 考虑边界对象空间分层模式

考虑边界对象的空间分层模式采用图像 8 邻域算法进行遥感图像空间分层,对重分类后的京津冀

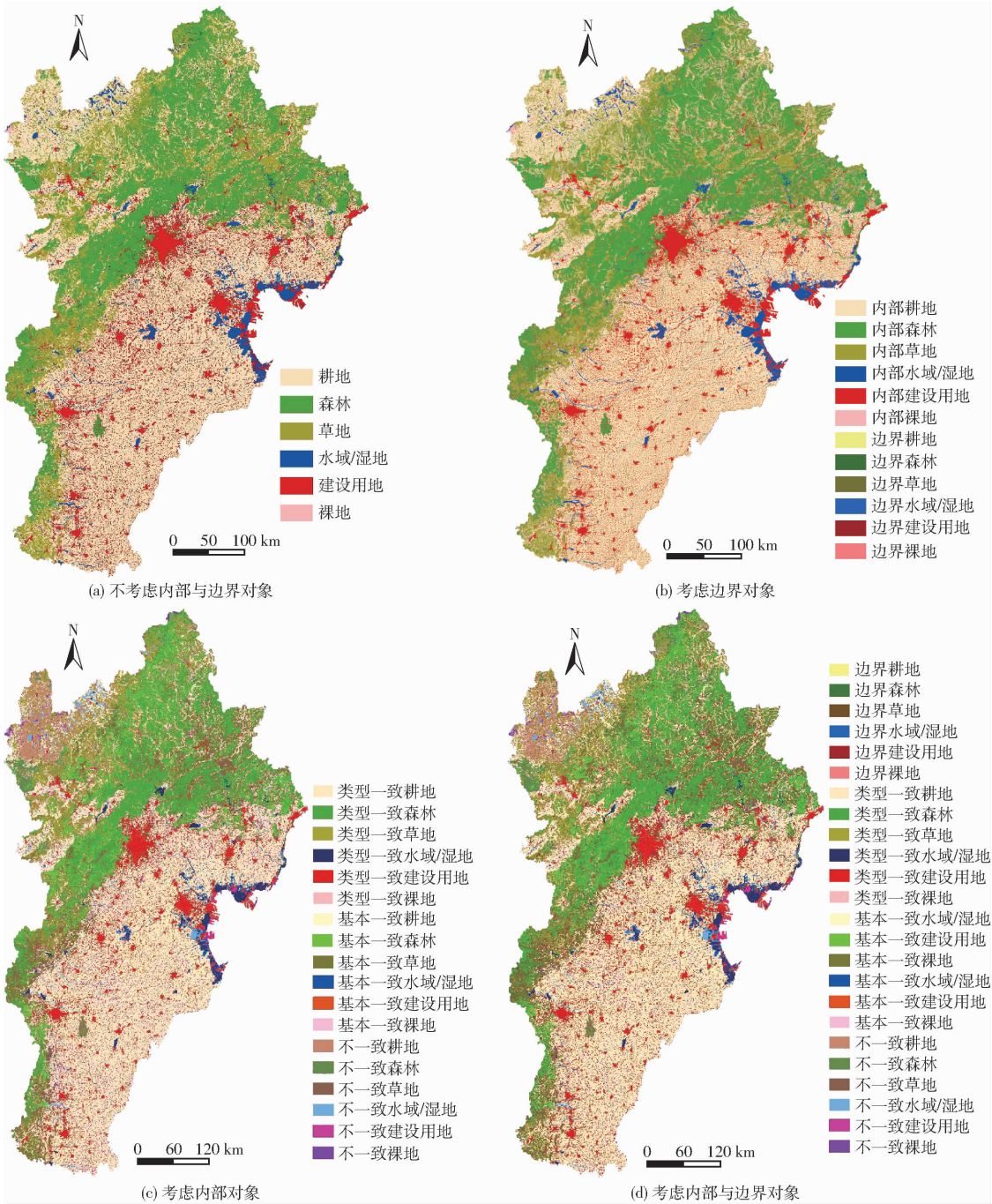


图 1 京津冀不同空间分层模式的空间分层结果

Fig. 1 Spatial stratification results of different spatial stratification modes in Beijing-Tianjin-Hebei

30 m 空间分辨率土地利用现状遥感监测数据,根据 6 类土地利用类型及内部与边界像元判别目标函数,划分地物类型的内部层和边界层。经 8 邻域算法处理得到 6 个内部层和 6 个边界层,最终空间分层数为 12 层,考虑边界对象空间分层模式的空间分层结果如图 1b 所示,分别是内部耕地、森林、草地、水域/湿地、建设用地、裸地层和边界耕地、森林、草地、水域/湿地、建设用地、裸地层。

3.1.3 考虑内部对象空间分层模式

考虑内部对象的空间分层模式采用多尺度空间分异性方法进行遥感图像空间分层。以 30 m 空间分辨率的遥感数据产品重分类结果为基准,与 10 m 和 500 m 空间分辨率的遥感数据产品重分类结果基于 ArcGIS 10.6 软件进行叠置分析,获得土地利用类型一致、基本一致、不一致属性层 18 层,其中土地利用类型一致层 6 层、基本一致层 6 层、不一致层 6 层。考虑内部对象空间分层模式的空间分层结果如图 1c 所示。

3.1.4 考虑内部与边界对象空间分层模式

考虑内部与边界对象空间分层模式采用图像 8 邻域和多尺度空间分异性耦合方法,边界层采用图像 8 邻域方法,内部层采用多尺度空间分异性方法进行遥感图像空间分层。边界层选择图像 8 邻域算法空间分层结果的边界地类层(6 层),内部层选择多尺度空间分异性方法空间分层结果(18 层),最后综合集成为考虑内部与边界对象空间分层模式的空间分层结果,最终空间分层数为 24 层,其空间分层结果如图 1d 所示。

3.2 遥感图像空间分层分异性评估与对比分析

设置与 K-means 聚类对比实验进行分层分异性

效果评估:一是设置不同空间分层模式的空间分层分异性效果对比实验;二是设置相同分层数目下与 K-means 聚类对比实验,主要包括:12 层的 K-means 聚类和考虑边界对象空间分层、18 层的 K-means 聚类和考虑内部对象空间分层、24 层的 K-means 聚类和考虑内部与边界对象空间分层,旨在研究边界对象和内部对象对遥感图像空间分层分异性影响。针对京津冀 6 类土地利用类型,基于 K-means 聚类将每个类型分别空间聚类为 2 类、3 类和 4 类,获取 12 层、18 层和 24 层的京津冀 K-means 聚类分层结果。定量计算京津冀 2017 年度 NDVI 的 q ,间接反映同时期遥感图像空间分层的分异性效果,具体步骤如下:①获取京津冀不考虑内部与边界对象空间分层模式的空间分层结果(图 1a)、考虑边界对象空间分层模式的空间分层结果(图 1b)、考虑内部对象空间分层模式的空间分层结果(图 1c)、考虑内部与边界对象空间分层模式的空间分层结果(图 1d)、K-means 聚类(12、18、24 层)的空间分层结果和京津冀同时期年度 NDVI。②采用空间均匀抽样方法^[26]选取 5 组样本点集,格网尺寸分别为 4 km × 4 km、6 km × 6 km、8 km × 8 km、10 km × 10 km 和 12 km × 12 km,将每个格网中心作为一个样本点,相应的样本点数分别为 13 503、6 002、3 368、2 170 和 1 505。③基于 ArcGIS 10.6 软件的空间标识工具,获取每个样本点对应的空间分层属性值及 NDVI,并将其作为参数指标输入式(2)进行计算。④分别计算不同空间分层模式在不同样本点数下的京津冀 2017 年度 NDVI 的 q ,并进行定量评估与对比分析。不同空间分层模式对应的地理探测器的 q 、 q 均值和标准偏差如表 1 所示。

表 1 不同空间分层模式 q 、 q 均值和标准偏差
Tab.1 q , q mean and standard deviation of different spatial stratification modes

样本点数	分层模式						
	不考虑内部与 边界对象(6 层)	考虑边界对象 (12 层)	K-means (12 层)	考虑内部对象 (18 层)	K-means (18 层)	考虑内部与边界 对象(24 层)	K-means (24 层)
13 503	0.250	0.259	0.269	0.317	0.297	0.312	0.315
6 002	0.260	0.271	0.264	0.325	0.314	0.320	0.331
3 368	0.223	0.227	0.268	0.304	0.301	0.299	0.308
2 170	0.241	0.251	0.264	0.306	0.292	0.310	0.305
1 505	0.284	0.287	0.281	0.351	0.316	0.347	0.326
q 均值	0.252	0.259	0.269	0.321	0.304	0.318	0.317
标准偏差	0.022 66	0.022 45	0.006 98	0.019 01	0.010 56	0.018 06	0.011 25

q 越大表示空间分层分异性效果越好,反之则越差;标准偏差越小则分层分异性效果越好,反之越差。本研究设置不同遥感图像空间分层模式的空间分层分异性效果对比实验。

不考虑内部与边界对象(6 层)、考虑边界对象(12 层)、考虑内部对象(18 层)、考虑内部与边界对象(24 层)空间分层模式及 K-means 聚类 12、18、24 层空间分层结果对应的 q 均值 ± 标准偏差分别为

0.252 ± 0.022 66、0.259 ± 0.022 45、0.321 ± 0.019 01、0.318 ± 0.018 06、0.269 ± 0.006 98、0.304 ± 0.010 56、0.317 ± 0.011 25。

(1)对于不同空间分层模式,考虑内部对象的空间分层模式 q 均值最大,考虑内部与边界对象的空间分层模式次之,且两者都明显大于不考虑内部与边界对象空间分层模式和考虑边界对象的空间分层模式。不同样本点数目下,考虑内部对象空间分层模式 q 都明显大于考虑边界对象空间分层模式 q ,可见内部对象对空间分层的空间分异性贡献大;考虑边界对象的空间分层模式 q 大于不考虑内部与边界对象空间分层模式 q ,说明边界对象也可改善空间分层分异性。

(2)考虑内部对象的空间分层模式(18层)的 q 明显大于 K-means 聚类(18层)空间分层,而边界对象参与的空间分层模式与相应的 K-means 聚类结果对比特征不具有显著规律。因此,考虑内部对象的空间分层模式的分异性更高、效果更好。

综上所述,内部对象比边界对象提高空间分层分异性效果更好,起主导作用;边界对象可以稍微提高空间分层分异性;分层数目也影响空间分层分异性。

3.3 空间分层不确定性分析

(1)图像 8 邻域算法中内部与边界像元定义标准过于严格及边界划分存在不确定性。判别目标函数采用“8 邻域内每个像元与当前像元土地利用类型是否一致”为判别标准过于严格;在多个土地利用类型的边界交汇处,地类边界可能相互交错,很难严格按界限分离,导致图像 8 邻域算法边界划分可能存在一定的不确定性。

(2)空间分层数目影响空间分层分异性效果。空间分层数目越多,空间分层分异性效果不一定越好。空间分层数目太多易使得分层结果严重破碎

化、降低空间分层效果^[27-28]。不同边界与内部对象组合构建不同的空间分层模式,各个模式的分层数目不同;但定量比较不同的空间分层方法的优劣,应该基于同一目标对象的相同分层数目下进行评估,如本研究设置的相同分层数目下与 K-means 聚类算法对比实验。

(3)考虑内部与边界对象的空间分层模式值得深入研究。由于地理探测器的原理与多尺度空间分异性空间分层方法原理一致,考虑内部对象空间分层模式分异性效果较优,但考虑到边界对象相比内部对象更容易导致土地利用类型混淆,如何综合考虑内部对象与边界对象空间分层模式值得深入研究。

4 结论

(1)基于京津冀土地利用类型对遥感图像进行内部与边界对象划分并构建了不考虑内部与边界对象(6层)、考虑边界对象(12层)、考虑内部对象(18层)、考虑内部与边界对象(24层)、K-means(12、18、24层)空间分层模式,相应的 5 组样本点集的 q 均值 ± 标准偏差分别为 0.252 ± 0.022 66、0.259 ± 0.022 45、0.321 ± 0.019 01、0.318 ± 0.018 06、0.269 ± 0.006 98、0.304 ± 0.010 56、0.317 ± 0.011 25。

(2)设置与 K-means 聚类对比实验结果表明:内部对象对空间分层分异性起主导作用,边界对象可以稍微提高空间分层分异性,分层数目也影响空间分层分异性。

(3)划定了内部对象和边界对象对遥感图像空间分层的贡献,对提出分异性更高的空间分层方法具有一定的指导意义和参考价值。但在图像 8 邻域算法、空间分层数目、考虑内部与边界对象的空间分层模式等方面存在一定的不确定性。

参 考 文 献

[1] OLOFSSON P, FOODY G M, HEROLD M, et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 148: 42-57.

[2] STEHMAN S V. Sampling designs for accuracy assessment of land cover[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(20): 5243-5272.

[3] 王振华,徐利智,纪晴,等.利用空间异质性的遥感分类结果精度评价方法[J].遥感信息,2020,35(6):25-31. WANG Zhenhua, XU Lizhi, JI Qing, et al. Accuracy assessment method of remote sensing classification result based on spatial heterogeneity[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(6): 25-31. (in Chinese)

[4] 孟雯,童小华,谢欢,等.基于空间抽样的区域地表覆盖遥感制图产品精度评估——以中国陕西省为例[J].地球信息科学学报,2015,17(6):742-749. MENG Wen, TONG Xiaohua, XIE Huan, et al. Accuracy assessment for regional land cover remote sensing mapping product based on spatial sampling: a case study of Shaanxi Province, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(6): 742-749. (in Chinese)

[5] DONG S W, CHEN Z Y, GAO B B, et al. Stratified even sampling method for accuracy assessment of land use/land cover classification: a case study of Beijing, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(16): 6427-6443.

[6] 王玲燕,钟永辉.基于不同抽样方法的安义县土地资源遥感监测精度评价研究[J].测绘通报,2010(9):32-34,41. WANG Lingyan, ZHONG Yonghui. The impact of sampling method on accuracy assessment result of land resources remote sensing monitoring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010(9): 32-34,41. (in Chinese)

- [7] WANG J F, HAINING R, CAO Z D. Sample surveying to estimate the mean of a heterogeneous surface: reducing the error variance through zoning[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(4): 523 – 543.
- [8] KHAN M G M, RAO D, ANSARI A H, et al. Determining optimum strata boundaries and sample sizes for skewed population with Log-Normal distribution[J]. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2015, 44(5): 1364 – 1387.
- [9] 董士伟. 林地信息提取与精度评价空间抽样方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
DONG Shiwei. Research on information extraction and spatial sampling methods of accuracy assessment for woodlands[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [10] 高秉博, 王劲峰, 胡茂桂, 等. 中国陆表自然资源综合观测台站布点优化[J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1911 – 1920.
GAO Bingbo, WANG Jinfeng, HU Maogui, et al. Optimization of integrated observation station layout for terrestrial surface natural resources[J]. *Resources Science*, 2020, 42(10): 1911 – 1920. (in Chinese)
- [11] 周浩, 雷国平, 杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 142 – 151.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin. Land use change pattern and its spatial differentiation in typical basin of Sanjiang Plain[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 142 – 151. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170517&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.017. (in Chinese)
- [12] 王迪, 周清波, 陈仲新, 等. 玉米种植面积空间抽样调查方案优化设计[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8): 117 – 125.
WANG Di, ZHOU Qingbo, CHEN Zhongxin, et al. Optimization of spatial sampling schemes for maize planting acreage estimation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(8): 117 – 125. (in Chinese)
- [13] RAN Y H, LI X, GE Y, et al. Optimal selection of groundwater-level monitoring sites in the Zhangye Basin, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 209 – 215.
- [14] 曹志冬, 王劲峰, 李连发, 等. 地理空间中不同分层抽样方式的分层效率与优化策略[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 152 – 160.
CAO Zhidong, WANG Jinfeng, LI Lianfa, et al. Strata efficiency and optimization strategy of stratified sampling on spatial population[J]. *Advances in Geographical Sciences*, 2008, 27(3): 152 – 160. (in Chinese)
- [15] 王劲峰, 姜成晟, 李连发, 等. 空间抽样与统计推断[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 刘梦, 曹鑫, 李阳, 等. 考虑边界区域的地表覆盖分类精度评价方法[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(11): 1472 – 1481.
LIU Meng, CAO Xin, LI Yang, et al. Method for land cover classification accuracy assessment considering edges[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2016, 46(11): 1472 – 1481. (in Chinese)
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116 – 134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116 – 134. (in Chinese)
- [18] 董士伟. 林地信息提取与精度评价空间抽样方法研究[J]. *测绘学报*, 2018, 47(10): 1428.
DONG Shiwei. Research on information extraction and spatial sampling methods of accuracy assessment for woodlands[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(10): 1428. (in Chinese)
- [19] 谢娟英, 王艳娥. 最小方差优化初始聚类中心的 K-means 算法[J]. *计算机工程*, 2014, 40(8): 205 – 211, 223.
XIE Juanying, WANG Yan'e. K-means algorithm based on minimum deviation initialized clustering centers[J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(8): 205 – 211, 223. (in Chinese)
- [20] SWEENEY S, EVANS T. An edge-oriented approach to thematic map error assessment[J]. *Geocarto International*, 2012, 27(1): 31 – 56.
- [21] 万昌君, 吴小丹, 林兴稳. 遥感数据时空尺度对地理要素时空变化分析的影响[J]. *遥感学报*, 2019, 23(6): 1064 – 1077.
WAN Changjun, WU Xiaodan, LIN Xingwen. Impact of spatial and temporal scales of remote sensing data on the spatiotemporal change in geographic elements[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1064 – 1077. (in Chinese)
- [22] 曾红伟, 李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 994 – 1004.
ZENG Hongwei, LI Lijuan. Accuracy validation of TRMM 3B43 data in Lancang River basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 994 – 1004. (in Chinese)
- [23] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107 – 127.
- [24] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114 – 115.
- [25] 吴炳方, 张森. 从遥感观测数据到数据产品[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2093 – 2111.
WU Bingfang, ZHANG Miao. Remote sensing: observations to data products[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2093 – 2111. (in Chinese)
- [26] DONG S W, GAO B B, PAN Y C, et al. Assessing the suitability of FROM – GLC10 data for understanding agricultural ecosystems in China: Beijing as a case study[J]. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(1): 11 – 18.
- [27] 吴庭天, 丁山, 陈宗铸, 等. 基于 LUCC 和景观格局变化的海南东寨港红树林湿地动态研究[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(5): 154 – 162.
WU Tingtian, DING Shan, CHEN Zongzhu, et al. Dynamic analysis of mangrove wetlands based on LUCC and landscape pattern change in Dongzhai Port[J]. *Forest Research*, 2020, 33(5): 154 – 162. (in Chinese)
- [28] 李国庆, 黄菁华, 刘冠, 等. 基于 Landsat 8 卫星影像土地利用景观破碎化研究——以陕西省延安麻塔流域为例[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(3): 121 – 128.
LI Guoqing, HUANG Jinghua, LIU Guan, et al. A study of the landscape fragmentations of land cover structure based on Landsat 8 remote sensing image: a case study of Mata watershed in Yan'an, Shaanxi Province[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2020, 32(3): 121 – 128. (in Chinese)