

基于直方变差图的土地覆盖数据集多尺度精度评价

朱榴骏, 肖鹏峰, 冯学智, 汪左, 蒋璐媛

1. 南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210023;

2. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室 江苏 南京 210023

摘要: 针对目前精度评价尺度单一的问题, 提出基于直方变差图的多尺度精度评价方法, 分别在像元尺度和亚像元尺度进行土地覆盖数据集精度评价。在像元尺度利用驻点作为采样工具直接评价数据集精度; 亚像元尺度上, 则利用非严格定义的驻点和驻点直方变差图对不同面积和空间结构的优势类进行精度评价。并以浙江北部典型区域为实验区, Landsat TM/ETM+ 为参考数据, 对 UMD、IGBP DISCover、MOD12Q1-2001、GLC2000、GlobCover2009 等 5 种大尺度土地覆盖数据集进行多尺度精度评价实验。结果表明, 多尺度精度评价方法能够全面地评价土地覆盖数据集的精度, 提供更加丰富的多尺度精度信息。像元尺度精度评价可在一定程度上消除由于参考数据与数据集间的空间匹配造成的误差, 评价结果更加客观; 亚像元尺度精度评价能有效反映亚像元尺度优势地物面积及空间结构与精度的关系。

关键词: 精度评价, 直方变差图, 大尺度土地覆盖数据集, 多尺度, 浙江北部

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A

引用格式: 朱榴骏, 肖鹏峰, 冯学智, 汪左, 蒋璐媛. 2013. 基于直方变差图的土地覆盖数据集多尺度精度评价. 遥感学报, 17(6): 1459-1474

Zhu L J, Xiao P F, Feng X Z, Wang Z and Jiang L Y. 2013. Multi-scale accuracy assessment of land cover datasets based on histo-variograms. Journal of Remote Sensing, 17(6): 1459-1474 [DOI: 10.11834/jrs.20133041]

1 引言

大尺度土地覆盖数据集已广泛应用于全球变化研究, 是生态系统和生物多样性评估 (Vance 等, 2003)、气候变化研究 (Sellers 等, 1997; Gallo 等, 1999) 以及环境建模 (Myneni 等, 2002) 的重要基础。目前, 已有 5 种常用的大尺度土地覆盖数据集: (1) 美国马里兰大学生产的 UMD 数据集 (Hansen 和 Reed, 2000); (2) 美国地质调查局为国际地圈—生物圈计划生产的 IGBP DISCover 数据集 (Loveland 等, 2000); (3) 美国波士顿大学生产的 MOD12Q1-2001 数据集 (Friedl 等, 2002); (4) 欧盟联合研究中心生产的 GLC2000 数据集 (Bartholomé 和 Belward, 2005); (5) 欧洲航天局生产的 GlobCover2009 数据集。然而, 不同的数据源、分类体系及分类方法导致不同数据集各具优劣, 精度在不同类型和区域间存在较大差异, 从而给数据集的选择带来困难。因此,

开展数据集精度评价研究, 对于选择适合研究目的的数据集, 提高数据集应用水平具有重要意义。

目前对大尺度土地覆盖数据集精度评价已有较多研究。国外学者通过从中高分辨率遥感影像中采集不同土地覆盖样本, 并与数据集的像元类型对比, 建立混淆矩阵, 从而实现数据集精度评价 (Scepan 和 Estes, 2001; Friedl 等, 2002; Mayaux 等, 2006; An 等, 2012); 或者通过多个数据集间的对比研究, 分析数据集间的面积一致性和空间位置一致性, 进而得到各数据集的相对精度 (Hansen 等, 2000; Giri 等, 2005; McCallum 等, 2006; Waser 和 Schwarz, 2006; Kaptué Tchuenté 等, 2011; Pérez-Hoyos 等, 2012)。国内学者则利用 1:10 万中国土地利用数据为参考数据, 实现数据集在中国区域的精度评价 (冉有华等, 2009; 吴文斌等, 2009)。

以上精度评价方法都是根据参考数据与评价数据集对应像元之间的类型比较, 得到像元尺度的精

收稿日期: 2013-03-07; 修订日期: 2013-06-03; 优先数字出版日期: 2013-06-10

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划 (973 计划) (编号: 2011CB952001)

第一作者简介: 朱榴骏 (1989—) 男, 硕士研究生, 研究方向为遥感数字图像处理和资源环境遥感。E-mail: zhuljnu@gmail.com

通信作者简介: 肖鹏峰 (1979—) 男, 副教授。主要研究方向为遥感数字图像处理和资源环境遥感。E-mail: xiaopf@gmail.com

度评价结果。然而,这种方法无法消除参考数据与评价数据集之间由于空间匹配误差造成的影响,同时无法在亚像元尺度评价数据集精度(Herold等,2006;Neumann等,2007)。直方变差图方法(张颢等,2002;李小文等,2002)中定义的驻点具有消除空间匹配误差的能力(刘瑞霞等,2009),以及在尺度转换中保持性质不变的能力。因此本文以直方变差图为基础,分别在像元尺度和亚像元尺度,探讨驻点及驻点直方变差图应用于大尺度土地覆盖数据集多尺度精度评价的方法,并以浙江省北部典型地区为实验区,对该方法进行应用和分析。

2 原理

2.1 直方变差图方法

张颢(2002)提出的直方变差图(histo-vario-gram)概念描述如下:

设有一 $M \times N$ 大小的图像 $Z = f(x, y)$, 辐射分辨率为 DN , 空间分辨率为 r , 其直方图为

$$Hist(Z_i) = \frac{1}{MN} \sum_{x,y} \delta(Z_i - f(x,y)) \quad Z_i \in [0, DN] \quad (1)$$

对图像采用 $m \times n$ 的聚合窗进行向上的尺度转换(up scaling)后,空间分辨率变为 $mr \times nr$, 图像变为

$$f_{mn}(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x+i,y+j) \quad (2)$$

新图像的直方图为

$$Hist(Z_i) = \frac{mn}{MN} \sum_{x,y} \delta(Z_i - f_{mn}(x,y)) \quad (3)$$

经过一系列向上的尺度转换后得到一系列的直方图,称为直方变差图,即以直方图形式表达的随着尺度变化的方差图。若原始图像 $m \times n$ 聚合窗内各像元的灰度值相同,则在 $mr \times nr$ 分辨率下新像元的灰度值保持不变,这样的新像元被称为驻点(standing pixel),尺度变化中得到的一系列的驻点直方图,称为驻点直方变差图。尺度转换得到的驻点直方变差图中,驻点逐渐减少,其减为零所经历的尺度转换次数记为 k , 可用于反映最大连通图斑的大小。驻点减少的速度可用于反映图斑的破碎程度,按下式拟合驻点直方变差图可得到度量破碎程度的指标(整体分维):

$$S_\delta = f(S_0) \delta^{d-2} \quad (4)$$

式中 δ 为度量尺度, S_0 为驻点初始面积, S_δ 为 δ 尺度下的驻点面积, d 为驻点的整体分维。

可见,驻点的定义严格,只有当聚合窗内像元性质完全一致时才能形成,对于土地覆盖数据集,即要求聚合窗内土地覆盖类型唯一。这使得在大尺度土地覆盖数据集精度评价中驻点数量往往不足以满足抽样需求,且这种驻点无法在亚像元尺度进行数据集精度评价。因此,本文根据土地覆盖数据集精度评价的实际需求,放宽对驻点的定义,设定一个阈值 $T(0-1)$,在尺度转换过程中,当聚合窗内优势类(指混合像元中面积比重最大的土地覆盖类型)的面积比重大于该阈值时,通过聚合窗尺度转换得到的新像元即为该优势类驻点(非严格定义的驻点),否则不为驻点。图1为使用 2×2 聚合窗进行尺度转换得到驻点的示意图。下面分别就利用非严格定义的驻点以及驻点直方变差图在像元和亚像元尺度进行数据集精度评价的方法进行详细探讨。

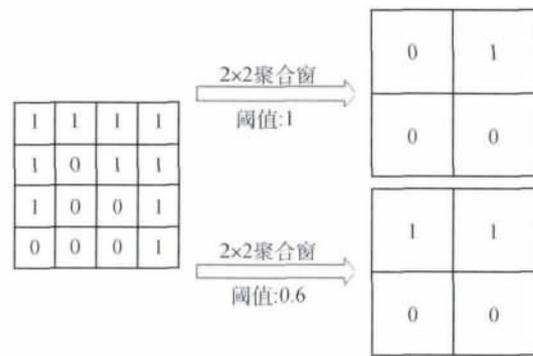


图1 向上的尺度转换示意图

2.2 像元尺度精度评价方法

在像元尺度,利用驻点对大尺度土地覆盖数据集进行精度评价的方法可以概括为:

(1) 利用数据集像元尺度的聚合窗对中高空间分辨率参考数据进行尺度转换,得到像元尺度严格定义的驻点。

(2) 判断驻点数是否大于点检验最小抽样点数 n 。若驻点数大于 n ,则以驻点作为精度评价样本点;若小于 n ,则通过调低阈值 T 得到更多驻点,直到驻点数达到最小抽样点数要求,再将这些非严格定义的驻点作为精度评价样本点。其中,点检验最小抽样点数 n 可由式(5)计算(刘旭拢等,2006):

$$n = \frac{(Z_{1-\alpha/2})^2}{e^2} \times p \times (1-p) \quad (5)$$

式中 α 为显著性水平, $Z_{1-\alpha/2}$ 是对应显著性水平从标准正态分布的概率表上所查的值, e 为允许误差

范围 p 为分类正确的百分比。 p 可通过事先抽取少量样本作精度估计得到,这里用步骤(1)中获取的驻点为样本作精度估计得到。

(3) 建立样本点与数据集对应像元之间的混淆矩阵,从而得到数据集像元尺度的总体精度、各土地覆盖类型的生产者精度和使用者精度等信息。

像元尺度精度评价方法最大程度地剔除了尺度转换中性质改变的点,以尺度转换中性质稳定的驻点为样本点。可以避免由于尺度转换导致像元性质改变而引起的误差,对空间配准精度要求也相对较低(刘瑞霞等 2009)。由于像元以上尺度的土地覆盖差异可由多个像元来表示,故土地覆盖数据集像元以上尺度的精度也可由像元尺度精度来表示。

2.3 亚像元尺度精度评价方法

土地覆盖数据集亚像元尺度的精度评价是指对混合像元中优势类的精度进行评价。根据混合像元中优势类的空间聚集程度,又分为数据集亚像元尺度结构优势类精度评价和非结构优势类精度评价。评价方法可概括如下:

(1) 利用数据集像元尺度的聚合窗对中高空间分辨率参考数据进行尺度转换,通过设置不同的阈值 T 提取各阈值下像元尺度的驻点。

(2) 根据驻点内优势类的空间聚集程度,将驻点分为结构优势类驻点和非结构优势类驻点。若驻点内的优势类同时具有最小破碎度 d 及最大连通图斑 k 则该驻点为结构优势类驻点,否则为非结构优势类驻点。其中 k 和 d 由驻点直方变差图及其拟合结果得到。

图 2 给出了一个判断驻点结构类型的实例,图 2(a)为某 1 km 尺度非严格定义的驻点,优势类是耕地(面积为 0.5031 km²),次优势类为林地(面积为 0.4338 km²)。图 2(b)是林地和耕地驻点直方变差图的拟合结果以及 k 值,由式(4)分别计算林地和耕地的整体分维 d 。 $d_{\text{林地}} < d_{\text{耕地}}$, $k_{\text{林地}} > k_{\text{耕地}}$,耕地不具有最小破碎度和最大连通图斑,因此该驻点属于非结构优势类驻点。

(3) 以不同阈值的结构优势类驻点和非结构优势类驻点为样本,分别与数据集建立混淆矩阵,得到亚像元尺度不同阈值下结构优势类和非结构优势类的总体精度。

亚像元尺度精度评价方法以混合像元中的优势类为评价对象,提供了不同类型优势类的精度,有效

地反映了各地表覆盖类型边缘像元的精度。在实际精度评价中,对不同阈值下的驻点进行集合运算,以集合运算结果为样本与数据集建立混淆矩阵,能得到更加丰富的精度信息。

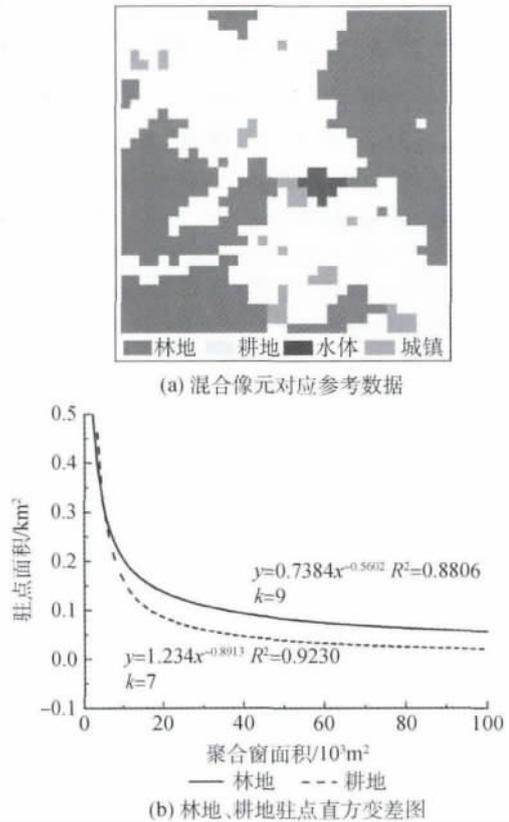


图 2 驻点结构类型判断实例

综上所述,应用驻点和驻点直方变差图方法,以中高分辨率土地覆盖数据为参考数据,对大尺度土地覆盖数据集进行多尺度精度评价,其评价流程如图 3 所示。

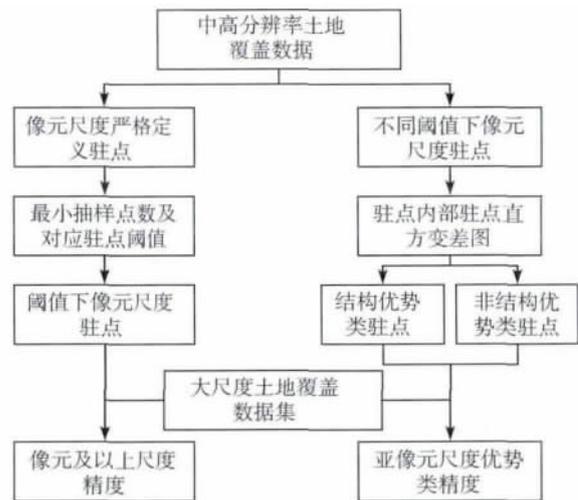


图 3 大尺度土地覆盖数据集多尺度评价流程图

3 实验及分析

3.1 实验区及数据预处理

实验区为浙江省北部 120 km × 120 km 的典型区域,中心地理坐标为(119°56'20"E, 30°18'22"N)。气候类型为亚热带季风气候,年平均气温为 17.5 °C,年降水量为 1454 mm。实验区东北部区域以平原为主,西南和南部以低山丘陵为主,主要的土地覆盖类型有林地、耕地、水体和城镇。

多尺度精度评价对象为 5 类大尺度土地覆盖

数据集:利用 1992 年—1993 年 NOAA/AVHRR 影像生产的 UMD 和 IGBP DISCover 数据集;利用 2000 年—2001 年 Terra/MODIS 影像生产的 MOD12Q1-2001 数据集;利用 1999 年—2000 年 SPOT 4/Vegetation 影像生产的 GLC2000 数据集;利用 2009 年 MERIS 影像生产的 GlobCover2009 数据集。由于各数据集的分类系统存在差异,首先需转换到同一分类系统,并聚合为林地、耕地、草地、水体、城镇和其他共 6 大类,转换方法如表 1 所示。

表 1 5 类大尺度土地覆盖数据集分类系统

统一分类和编码	IGBP/MOD12Q1-2001	UMD	GLC2000	GlobCover2009
1 林地	1 常绿针叶林、2 常绿阔叶林、3 落叶针叶林、4 落叶阔叶林、5 混交林、6 郁闭灌木林、7 稀疏灌木林、8 树林、14 耕地与自然植被镶嵌体草原	1 常绿针叶林、2 常绿阔叶林、3 落叶针叶林、4 落叶阔叶林、5 混交林、6 稀疏林地、8 郁闭灌木林、9 稀疏灌木林	1 落叶针叶林、2 常绿针叶林、3 常绿阔叶林、4 落叶阔叶林、5 灌木、6 稀疏林地、24 森林镶嵌体	40 常绿阔叶林、50 常绿针叶林、60 落叶阔叶林、70 落叶子阔叶林、90 落叶针叶林、100 混交林、130 郁闭灌木林、110 林地/灌木(50%—70%)与草原(20%—50%)镶嵌体、160 定期淹没阔叶林、30 自然植被(50%—70%)与耕地镶嵌体(20%—50%)
2 耕地	12 耕地	11 耕地	21 耕地、23 耕地镶嵌体	11 水田、14 旱地、20 耕地(50%—70%)与自然植被(20%—50%)镶嵌体
3 草地	9 稀树草原、10 草原	7 稀树草原、10 草原	9 山坡草地、10 平原草地、12 草地、22 高山亚高山草地、8 定期淹没草地	120 草原(50%—70%)与林地/灌木(20%—50%)镶嵌体、140 草原、180 定期淹没草地
4 水体	11 永久湿地、17 水体	0 水体	7 海滨湿地、14 河流、15 湖泊、16 湿地	160 水体定期淹没草地 210 水体
5 城镇	13 城镇	13 城镇	13 城镇	190 城镇
6 其他	15 雪与冰、16 裸地	12 裸地	11 沙漠草地、17 冰川、18 裸地、19 砾石覆盖区、20 荒漠	220 雪和冰、150 稀疏植被、200 裸地

Landsat TM/ETM+ 数据在时间上具有连续性,获取方法具有一致性,其分类结果具有统一标准(统一的分类体系及统一的生产流程等)。因此,本文以实验区 3 景 Landsat TM/ETM+ 影像为参考数据,获取时间分别与 5 类大尺度土地覆盖数据集数据源相近,分别为 1991 年 7 月 23 日、2001 年 5 月 23 日和 2009 年 11 月 5 日。对 3 景影像依次进行辐射校正、几何校正和最大似然法分类,并利用随机点评价分类精度。分类结果的总体精度均大于 85%,Kappa 系数大于 0.80,符合实验要求。预处理后的 5 类大尺度土地覆盖数据集及其对应参考数据见图 4。

3.2 像元尺度精度评价

利用 1 km 大小的聚合窗对参考数据进行尺度转换,得到严格定义的驻点。以这些驻点为样本,分别估计数据集的精度,并由式(5)计算最小抽样点数,式中 α 取 0.02, $Z_{1-\alpha/2} = 2.33$,允许的误差范围 $e = \pm 1\%$ 。驻点数量均小于最小抽样点数,调低阈值 T 使驻点数量大于最小抽样点数,结果如表 2 所示。用于获取驻点的阈值差异较大,为使数据集精度评价的结果具有可比性,统一设置阈值为 0.83,分别获取驻点。以这些驻点为样本与 5 类大尺度土地覆盖数据集建立混淆矩阵。

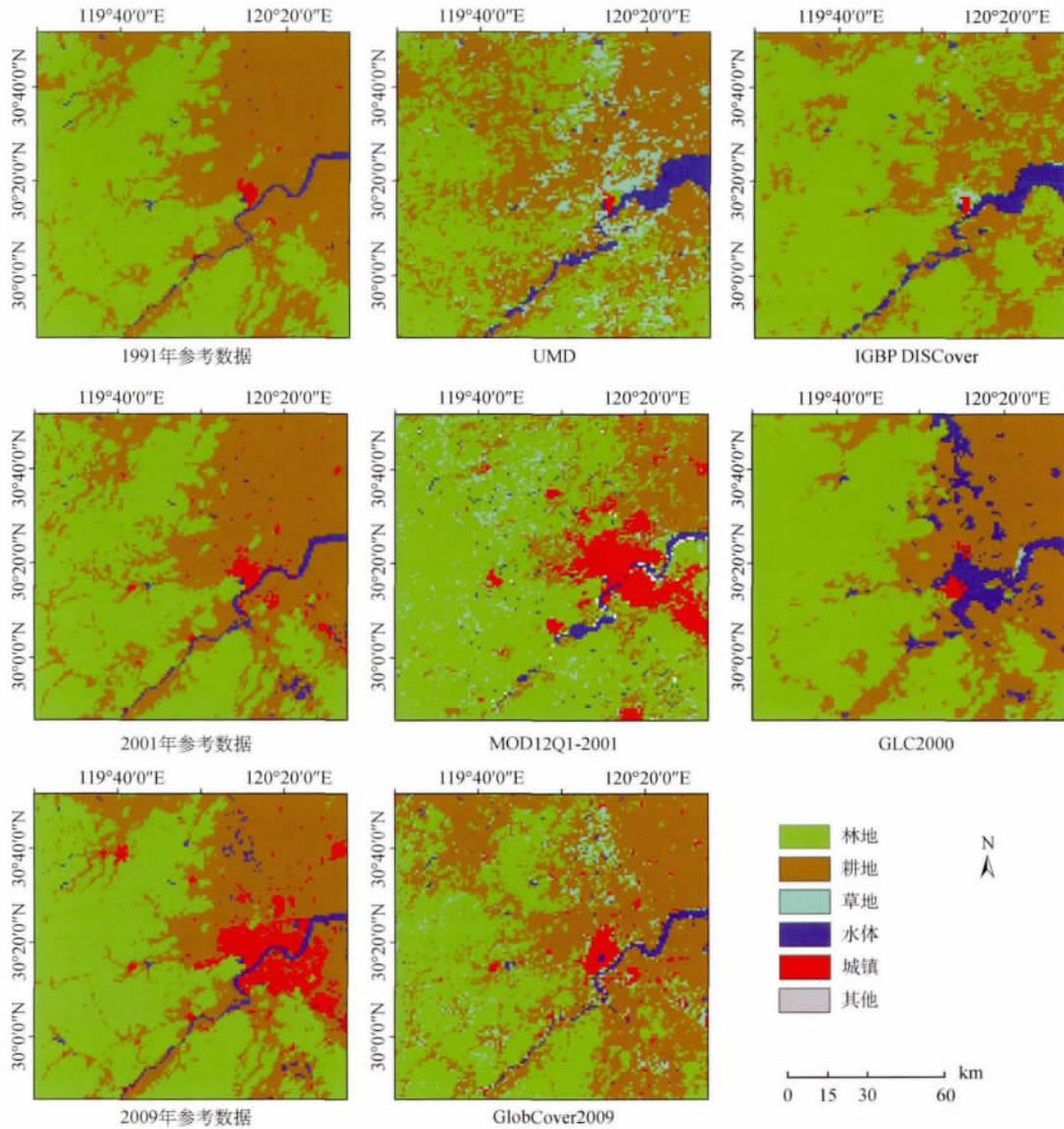


图4 实验区5 类大尺度土地覆盖数据集及其对应参考数据

表2 驻点精度估计及对应驻点阈值

	严格定义 驻点数	预估精度 /%	最小抽样 点数	对应 阈值
UMD	296	80.74	8441	0.83
IGBP DISCover	296	96.96	1601	0.99
GLC2000	596	93.79	3161	0.96
MOD12Q1-2001	596	92.95	3556	0.95
GlobCover2009	137	91.97	4009	0.91

图5(a)、图5(b)分别是由混淆矩阵得到的生产者精度和使用精度。除UMD和IGBP DISCover,其他数据集的林地都具有相近的生产者精度和使用精度,且均高于75%,UMD中林地的生产者精度比使用者精度低20%。可见,UMD对林地有较

大的低估,而IGBP DISCover则高估林地面积。5类数据集中耕地的生产者精度和使用精度差异都较大,生产者精度介于60%—90%,使用者精度介于55%—95%。GLC2000耕地的生产者精度和使用精度非常接近,且都高于90%。GlobCover2009和MOD12Q1-2001对耕地有较大的高估,而UMD和IGBP DISCover则有较大的低估。5类数据集中水体和城镇的精度都较低。水体的使用者精度均低于60%,而生产者精度相对较高,可见各数据集对水体都有一定程度的高估。城镇的使用者精度和生产者精度差异极大,这一差异在MOD12Q1-2001和GlobCover2009分别高达80%和40%。可见,MOD12Q1-2001严重高估城镇,而GlobCover2009对城镇有较明显的低估。

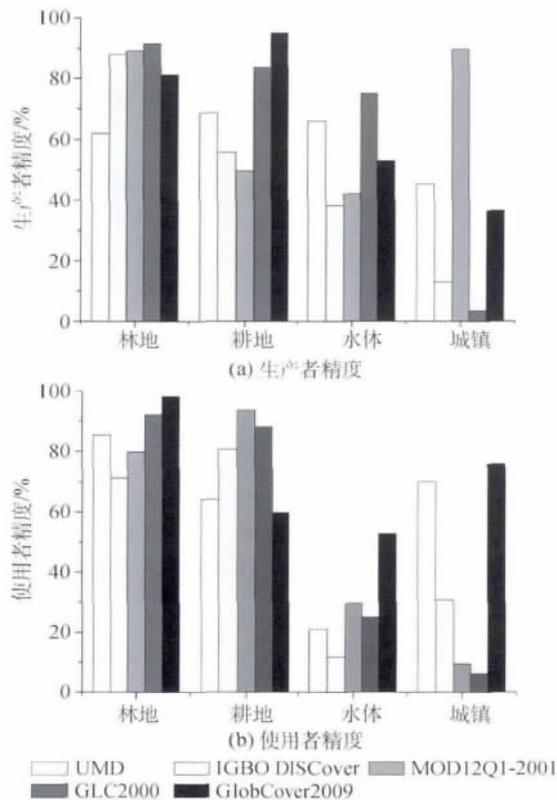


图5 像元尺度生产者精度和使用精度

表3 是由混淆矩阵计算的5类全球土地覆盖数据集总体精度和 Kappa 系数。GLC2000 数据集具有最高的总体精度 87.42% ,而 UMD 数据集精度最低 65.04% ,其他数据集的精度介于两者之间。

表3 5类土地覆盖数据集总体精度和 Kappa 系数

	UMD	IGBP DISCover	MOD12Q1-2001	GLC 2000	GlobCover 2009
总体精度/%	65.04	72.25	72.56	87.42	81.55
Kappa 系数	0.38	0.45	0.50	0.76	0.63

3.3 亚像元尺度优势类精度评价

在亚像元尺度,考察不同面积和空间结构的优势类精度。分别对不同面积结构优势类和非结构优势类精度进行评价。

(1) 对不同面积结构优势类的精度进行评价。设置阈值以 0.01 为步长从 0.005 变化到 0.995 ,得到不同阈值下的结构优势类驻点集合。分别求阈值相邻的驻点集合的差集,得到 99 个驻点差集,由 $T \times \delta$ (这里 $\delta = 1 \text{ km}^2$) 得到各集合的优势类面积。其中,优势类面积小于 0.35 km^2 的集合,结构优势类驻点数量为 0;优势类面积介于 $0.35\text{—}0.45 \text{ km}^2$ 的

集合,结构优势类驻点数量均小于 10;优势类面积大于 0.5 km^2 的集合,结构优势类驻点数量均大于 50。以每个集合的结构优势类驻点为样本与 5 类大尺度土地覆盖数据集建立混淆矩阵,得到不同面积结构优势类的总体精度(图 6)。

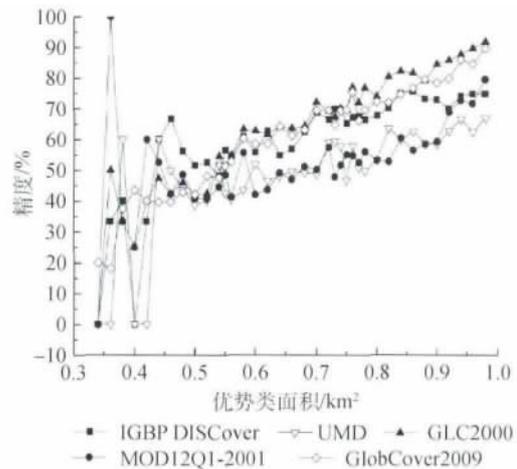


图6 不同面积结构优势类的总体精度

由图 6 可见,优势类面积大于 0.5 km^2 时,除 IGBP DISCover 以外的 4 类数据集,随着优势类面积的增加,其总体精度有明显的改善。这是因为随着优势类面积的增加,优势类相对于其他土地覆盖类型的优势增强,错分的可能性降低。而 IGBP DISCover 在优势类面积为 $0.5\text{—}0.75 \text{ km}^2$ 时,与其他数据集具有相似的变化趋势;当优势类面积大于 0.75 km^2 时,总体精度不再发生变化。另外,优势类面积小于 0.5 km^2 时,所有数据集的结构优势类精度都具有很大的波动性。其原因在于:优势类面积较小时,结构优势类驻点较少,受样本容量影响,评价结果具有较大的随机性;优势类相对于其他土地覆盖类型的优势不明显,对于分类方法十分敏感,容易造成大的波动。

优势类面积不同时,各数据集的精度存在一定的差异。总体上,GLC2000 具有最高的精度,而 UMD 精度最低,其他数据集的精度介于两者之间。局部面积区间内各数据集的结构优势类精度各有优劣,在选择数据时,需要根据研究区土地覆盖的破碎程度进行综合考虑。

(2) 对不同面积非结构优势类的精度进行评价。由于非结构优势类驻点较少,且优势类面积主要介于 $0.45\text{—}0.61 \text{ km}^2$,因此仅对面积介于这一区间的非结构优势类的精度进行评价。评价方法与结构优势类精度评价的方法相同。

图7为优势类面积介于 $0.45\text{--}0.61\text{ km}^2$ 时5类数据集非结构优势类和结构优势类的总体精度。5类数据集的非结构优势类精度不随优势类面积的变化而发生明显的变化,具有较大的随机波动;而结构优势类精度有轻微的改善,且波动性较小。表明优势类在混合像元内部的空间集聚程度和破碎程度

会对精度产生一定的影响,表现为破碎度越高且空间集聚程度越低时精度随机性越大。除GlobCover2009以外的数据集非结构优势类精度都较低($< 50\%$),与相同面积的结构优势类精度相近。其原因在于优势类面积较小,优势类较其他土地覆盖类型优势不明显,容易造成错分。

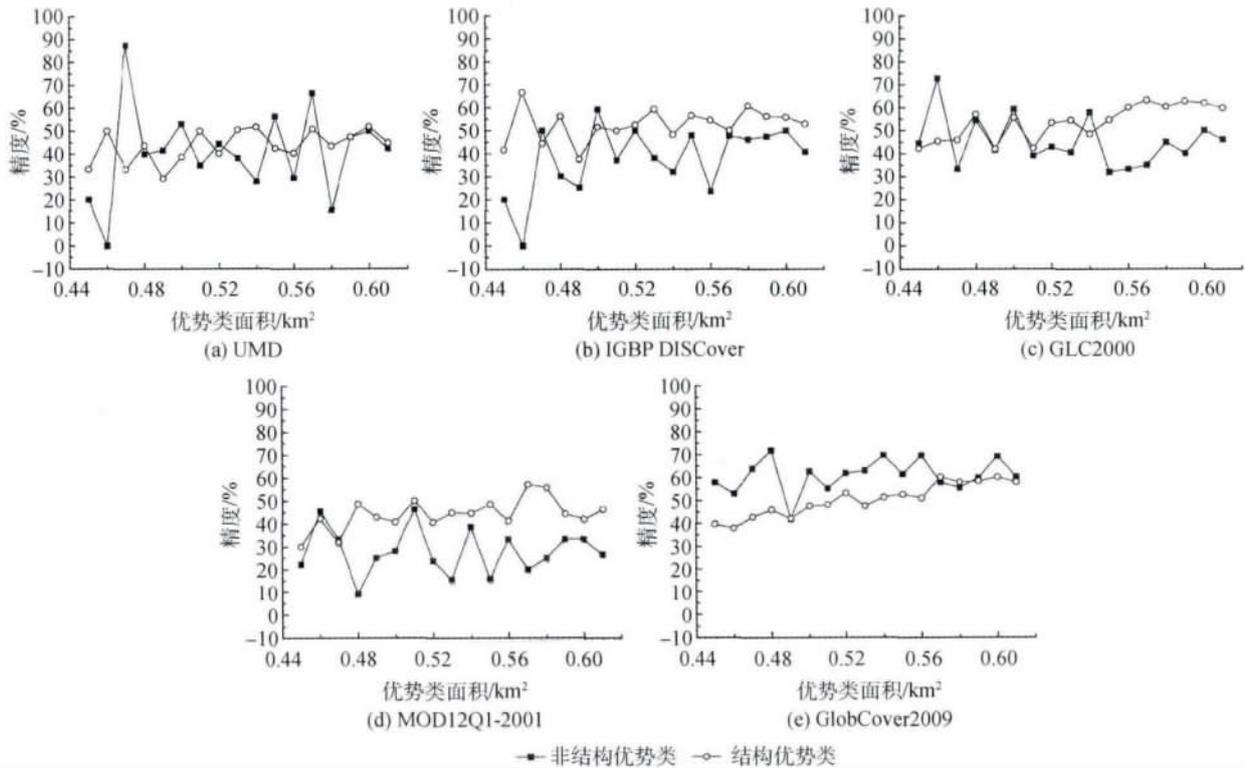


图7 $0.45\text{--}0.61\text{ km}^2$ 面积区间内结构优势类和非结构优势类总体精度

对相同优势类面积下的结构优势类和非结构优势类精度进行比较。IGBP DISCover、GLC2000 和 MOD12Q1-2001 的结构优势类精度高于非结构优势类精度,而 GlobCover2009 中非结构优势类具有较高精度,在 UMD 中两者差异不大。反映不同数据集的制图方法对优势类空间特征的响应存在差异。

虽然结构优势类精度和非结构优势类精度存在一定的差异,但是由于实验区内非结构优势类驻点数量不到 5%,对于亚像元尺度优势类的精度影响不大。对土地覆盖类型较少、破碎度较低的研究区进行精度评价时,无需考虑亚像元尺度优势类的空间结构对精度的影响。

4 结论

本文将大尺度土地覆盖数据集的精度评价分为

像元尺度精度评价和亚像元尺度精度评价,提出驻点和驻点直方变差图在大尺度土地覆盖数据集精度的多尺度评价中的应用方法。以 TM/ETM+ 为参考数据,浙江北部部分区域为实验区,对 5 类大尺度土地覆盖数据集进行多尺度精度评价实验,得到以下结论:

(1) 将大尺度土地覆盖数据集精度评价分为像元尺度精度评价和亚像元尺度精度评价,能够全面、多尺度地反映土地覆盖数据集的精度。

(2) 像元尺度精度评价可在一定程度上消除由参考数据与数据集间的空间匹配误差造成的影响,评价结果更加客观。

(3) 亚像元尺度优势类精度评价方法能有效地反映亚像元尺度优势类空间结构以及面积与精度的关系。实验表明,不同数据集中优势类面积与精度都呈正相关,而优势类空间特征对精度的影响差异较大。实验区内非结构优势类较少,且非结构优势类和

结构优势类精度差异不大 因此在空间破碎度较低时可以不考虑亚像元尺度优势类的空间特征。

(4) 本文提出的多尺度精度评价方法同样适用于其他以中高分辨率数据为参考数据,以低分辨率数据为评价对象的多尺度精度评价。

参考文献 (References)

- An Y M, Zhao W W and Zhang Y H. 2012. Accuracy assessments of the GLOBCOVER dataset using global statistical inventories and FLUXNET site data. *Acta Ecologica Sinica*, 32(6): 314–320 [DOI: 10.1016/j.chnaes.2012.09.001]
- Bartholomé E and Belward A S. 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9): 1959–1977 [DOI: 10.1080/01431160412331291297]
- Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, Zhang X Y, Muchoney D, Strahler A H, Woodcock C E, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F and Schaaf C. 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 287–302 [DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00078-0]
- Gallo K P, Owen T W, Easterling D R and Jamason P F. 1999. Temperature trends of the U. S. historical climatology network based on satellite-designated land use/land cover. *Journal of Climate*, 12(5): 1344–1348 [DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<1344:ttotus>2.0.co;2]
- Giri C, Zhu Z L and Reed B. 2005. A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets. *Remote Sensing of Environment*, 94(1): 123–132 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.005]
- Hansen M C, Defries R S, Townshend J R G and Sohlberg R. 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7): 1331–1364 [DOI: 10.1080/014311600210209]
- Hansen M C and Reed B. 2000. A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7): 1365–1373 [DOI: 10.1080/014311600210218]
- Herold M, Woodcock C E, di Gregorio A, Mayaux P, Belward A S, Latham J and Schmullius C C. 2006. A joint initiative for harmonization and validation of land cover datasets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1719–1727 [DOI: 10.1109/tgrs.2006.871219]
- Kaptué Tchuenté A T, Roujean J L and De Jong S M. 2011. Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(2): 207–219 [DOI: 10.1016/j.jag.2010.11.005]
- 李小文, 赵红蕊, 张颢, 王锦地. 2002. 全球变化与地表参数的定量遥感. *地学前缘*, 9(2): 365–370
- 刘瑞霞, 师春香, 刘杰. 2009. 直方变差图理论在卫星产品质量检验空间配准中的应用. *遥感学报*, 13(2): 307–312
- 刘旭拢, 何春阳, 潘耀忠, 杨明川, 张锦水. 2006. 遥感图像分类精度的点-群样本检验与评估. *遥感学报*, 10(3): 366–372
- Loveland T R, Reed B C, Brown J F, Ohlen D O, Zhu Z, Yang L and Merchant J W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7): 1303–1330 [DOI: 10.1080/014311600210191]
- Mayaux P, Eva H, Gallego J, Strahler A H, Herold M, Agrawal S, Naumov S, De Miranda E E, Di Bella C M, Ordoyno C, Kopin Y and Roy P S. 2006. Validation of the global land cover 2000 map. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1728–1739 [DOI: 10.1109/tgrs.2006.864370]
- McCallum I, Obersteiner M, Nilsson S and Shvidenko A. 2006. A spatial comparison of four satellite derived 1 km global land cover datasets. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4): 246–255 [DOI: 10.1016/j.jag.2005.12.002]
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R and Running S W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 214–231 [DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00074-3]
- Neumann K, Herold M, Hartley A and Schmullius C. 2007. Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(4): 425–437 [DOI: 10.1016/j.jag.2007.02.004]
- Pérez-Hoyos A, García-Haro F J and San-Miguel-Ayanz J. 2012. Conventional and fuzzy comparisons of large scale land cover products: Application to CORINE, GLC2000, MODIS and GlobCover in Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 74: 185–201 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.09.006]
- 冉有华, 李新, 卢玲. 2009. 四种常用的全球 1 km 土地覆盖数据集中国区域的精度评价. *冰川冻土*, 31(3): 490–500
- Scepan J and Estes J E. 2001. Thematic validation of global land cover data sets—procedures and interpretation methods // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Sydney: IEEE: 1119–1121 [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976765]
- Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, Betts A K, Hall F G, Berry J A, Collatz G J, Denning A S, Mooney H A, Nobre C A, Sato N, Field C B and Henderson-Sellers A. 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275(5299): 502–509 [DOI: 10.1126/science.275.5299.502]
- Vance M D, Fahrig L and Flather C H. 2003. Effect of reproductive rate on minimum habitat requirements of forest-breeding birds. *Ecology*, 84(10): 2643–2653 [DOI: 10.1890/02-0159]
- Waser L T and Schwarz M. 2006. Comparison of large-area land cover products with national forest inventories and CORINE land cover in the European Alps. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(3): 196–207 [DOI: 10.1016/j.jag.2005.10.001]
- 吴文斌, 杨鹏, 张莉, 唐华俊, 周清波, Shibasaki R. 2009. 四类全球土地覆盖数据在中国区域的精度评价. *农业工程学报*, 25(12): 167–173
- 张颢, 焦子铨, 杨华, 李小文, 王锦地, 苏理宏, 闫广建, 赵红蕊. 2002. 直方图尺度效应研究. *中国科学 D 辑*, 32(4): 307–316