文章编号:1001-9014(2017)02-0225-10

DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2017.02.017

基于多源遥感影像的多尺度城市植被覆盖度估算

高永刚[1,2,3,4*], 徐涵秋[1,2,3]

(1. 福州大学 环境与资源学院,福建 福州 350116;2. 福州大学 遥感信息工程研究所,福建 福州 350116;
3. 福州大学 福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室,福建 福州 350116;
4. 地质工程福建省高校工程研究中心,福建 福州 350116)

摘要:以 Landsat 7 ETM+、SPOT 5 和 IKONOS 遥感影像数据为数据源,利用格网法从 1∶500 地形图提取的不同空间分辨率的植被覆盖度为参考依据,通过对不同辐射校正水平的遥感影像获得的植被覆盖度进行精度比较分析,对多源多尺度和多源同尺度城市植被覆盖度估算的相关问题进行研究. 研究表明,在城市区域进行植被覆盖度估算时,ICM 模型为较佳辐射校正模型;对于高分辨遥感影像,NDVI 为植被覆盖度估算的较佳植被指数;对于中分辨率影像,植被覆盖度估算的较佳植被指数则为 RVI 和 MSAVI;就研究区而言 GI 模型比 CR 模型估算的植被覆盖度更准确.

关 键 词:植被覆盖度;多尺度;植被指数;辐射校正

中图分类号:P237.3;TP751.1 **文献标识码**:A

Estimation of multi-scale urban vegetation coverage based on multi-source remote sensing images

GAO Yong-Gang[1,2,3,4*], XU Han-Qiu[1,2,3]

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
4. Fujian Provincial Universities Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The vegetation coverage from multi-source at multi-scale and multi-source at the same scale in urban area was studied. The Landsat 7 ETM+, SPOT 5 and IKONOS remote sensing image data were taken as the data source. The vegetation coverage with different spatial resolutions derived from a 1∶500 topographic map as the reference map by grid method was taken as reference. The accuracies of fraction vegetation coverage extracted from the images, wich were radiometrically corrected using different models, were compared. An optimal radiometric correction model for the extraction of fraction vegetation coverage in urban areas was proposed. The results show that ICM model is the best radiometric correction model for estimating fraction vegetation coverage in urban area. NDVI is the best vegetation index for fraction vegetation coverage estimation for high resolution remote sensing images, while the best vegetation indices for estimating fraction vegetation coverage from moderate spatial resolution images are the RVI and MSAVI. For the studies area, the GI model is more accurate than the CR model in estimating the vegetation coverage.

Key words: fraction vegetation cover, multi scale, vegetation index, radiometric correction model

PACS: 07.07.Df

收稿日期:2016-03-31,**修回日期**:2016-10-05 **Received date**: 2016-03-31, **revised date**: 2016-10-05

基金项目:福建省测绘局局校合作项目(2016JX01),福建省教育厅科技项目(JA15064、JA15044),国家自然科学基金(51508100),福建省自然科学基金(2012J01171),国家科技支撑计划项目(2013BAC08B01-05),福州大学科研启动基金(XRC-1426)

Foundation items: Supported by Bureau cooperation project of Fujian Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation (2016JX01), Science and Technology Project of Fujian Educational Committee (JA15064, JA15044), National Natural Science Foundation of China (51508100), Natural Science Foundation of Fujian Province (2012J01171), National Science and Technology Supporting Project (2013BAC08B01-05), and Scientific Research Foundation of Fuzhou University (XRC-1426)

作者简介(Biography):高永刚(1976-),男,博士,副教授,主要从事遥感图像处理与应用和卫星测高方面的研究.

* **通讯作者(Corresponding author)**: E-mail: yggao@fzu.edu.cn

引言

植被覆盖度是表征地表植被覆盖程度的重要指标,与地表蒸散、水土流失、土地沙化和全球气候变化等关系密切,是生态环境变化、全球及区域气候模型的重要参数. 因此,获取地表植被覆盖度及其变化信息,对于揭示地表空间变化规律,探讨变化的驱动因子,分析评价区域生态环境具有重要现实意义[1].

植被的反射光谱为植被本身、下垫面(土质、土壤亮度、湿度、颜色等)、阴影和环境等的综合表现,且其易受大气和季相变化等的影响. 因此,在综合考虑各遥感卫星光谱范围差异的基础上,结合本研究所使用的遥感影像以及研究区域的特点,选取比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)[2]、归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)[3]、土壤调节植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI)[4]、改进的土壤调节植被指数(Modified Soil-Adjusted Vegetation Indices, MSAVI)[5]、三波段梯度差值植被指数(Three Gradient Different Vegetation Index, TGDVI)[6]和增强型土壤调节植被指数(Hybrid Index, HYBRID)[7]等6种植被指数进行植被信息地提取.

随着遥感影像空间分辨率越来越高,使得像元的可识别度变得越来越容易,获取纯植被像元成为可能. 目前,利用遥感影像进行植被覆盖度估算研究只要集中在大、中尺度,而对小尺度的城市植被覆盖度估算研究较少. 同时,由于同一地物目标在不同空间分辨率的遥感影像上其表现结果不同,所以在利用多源多尺度遥感影像进行植被覆盖度估算时应考虑尺度效应问题[8-10]. 因此,本文以 Landsat 7 ETM +、SPOT 5、IKONOS 遥感影像数据为数据源,对多源多尺度和多源同尺度城市植被覆盖度估算的相关问题进行研究.

1 植被覆盖度

1.1 计算公式

采用的植被指数法植被覆盖度反演模型是由 Gutman 和 Ignatov 提出的线性模型(GI 模型)[11]以及 Carlson 和 Ripley 提出的平方模型(CR 模型)[12],这两种模型均为基于 NDVI 的像元二分模型,其表达式分别为:

$$Fr_{GI} = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_\infty - NDVI_0} \quad , \quad (1)$$

$$Fr_{CR} = \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_\infty - NDVI_0}\right)^2 \quad , \quad (2)$$

式中,Fr_{GI}为 Gutman 和 Ignatov 模型,简记为 GI;Fr_{CR}为 Carlson 和 Ripley 模型,简记为 CR; NDVI 为归一化植被指数;$NDVI_0$代表纯裸土的 NDVI 值;$NDVI_\infty$代表高植被覆盖度的 NDVI 值.

参数 $NDVI_0$ 和 $NDVI_\infty$ 的取值对 GI 模型和 CR 模型的计算结果有显著影响. $NDVI_0$ 在理论上是非常接近于0的定值,但由于受大气条件、日照条件、土壤类型、地表湿度和粗糙度以及季相等因素的影响使得遥感影像获得的裸土 NDVI 值不同,研究表明纯裸土的 NDVI 取值范围为-0.1 ~0.2[11],实际应用中 $NDVI_0$ 的取值主要采用经验值法和实测值法来确定,其中经验值法主要是采用以往研究中获得的裸土 NDVI 值,如常用的取值有 0.04[12-14]、0.05[15]和0.09[16]等;实测值法是利用遥感影像中纯裸土的实际 NDVI 最小值. $NDVI_\infty$ 的取值有最大值法和阈值法. 最大值法是采用该景遥感影像中 NDVI 的最大值;阈值法是在顾及不同植被类型、不同季相其 NDVI 值不同的基础上,为了避免 Fr 被高估,通常采用该季相条件下经验 NDVI 最大值作为 $NDVI_\infty$,但若由所利用遥感影像计算获得的 NDVI 最大值大于该经验 NDVI 值时,取遥感影像中实际计算获得的 NDVI 值作为 $NDVI_\infty$.

国内外学者的研究成果表明 GI 模型在低植被覆盖区存在 Fr 高估的问题;CR 模型虽然克服了 GI 模型在低植被覆盖区对 Fr 高估问题,但在高植被覆盖区存在 Fr 低估的问题. 因此,为了克服 CR 模型进行平方运算过程中会将 GI 模型中评价为非植被信息变为植被信息,本文将两者进行结合,简称为 GC 模型.

$$GC = \begin{cases} CR & GI \geqslant 0 \\ GI & GI < 0 \end{cases} \quad . \quad (3)$$

1.2 验证数据

为了对利用遥感影像获得的植被覆盖度进行精度验证,本文采用格网法从 1∶ 500 比例尺地形图上获取与遥感影像相同空间分辨率的地面植被覆盖度;然后,据其生成地面植被覆盖度图作为验证数据. 根据划定的研究区和遥感影像的空间分辨率,该方法首先在 1∶ 500 地形图上进行与空间分辨率对应的 1 m × 1 m、4 m × 4 m、10 m × 10 m、15 m × 15 m、30 m × 30 m 格网的划分(图1);然后,根据式(4)统计各格网的植被覆盖度,构建地形图植被覆盖度矩阵,并以此建立与对应空间分辨率植被覆盖

度影像的评价图.

$$Fr_{MG} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{\text{Area}} \quad , \quad (4)$$

式中,Fr_{MG}为地形图上各格网的植被覆盖度;i 为各格网内的植被子区域;n 为各格网内植被类型的总个数;V_i 为格网内第 i 个植被子区域的面积,该值利用相关软件(如 Auto CAD)在地形图上根据各格网内植被所围成边界进行统计;Area 为格网的面积.

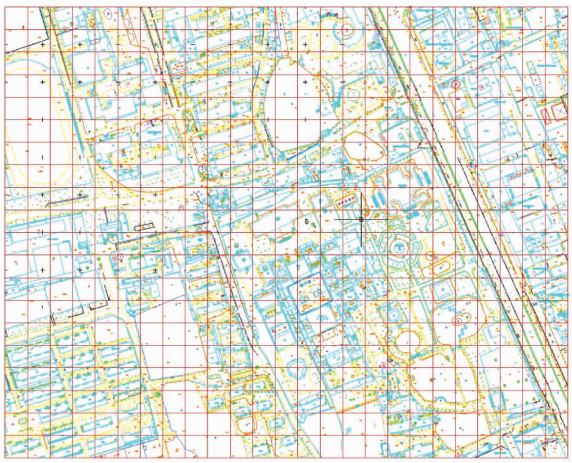


图 1　研究区 30 m×30 m 格网划分示意图
Fig. 1　Schematic diagram of a 30 m×30 m grid division

为了更好地体现空间尺度变化对覆盖度的影响,论文将植被覆盖度划分为 7 个等级,即:Fr = 0 为无覆盖、0 < Fr < 10% 为微覆盖、10% ≤ Fr < 30% 为低覆盖、30% ≤ Fr < 50% 为中覆盖、50% ≤ Fr < 70% 为中高覆盖、70% ≤ Fr < 100% 为高覆盖、Fr = 100% 为全覆盖.

由图 2 和表 1 可知,随着空间分辨率逐渐变大(由 1 m 逐渐变为 30 m),研究区内无覆盖和全覆盖区域的面积迅速减少,当空间分辨率为 30 m 时全覆盖区域甚至消失;低覆盖、中覆盖和中高覆盖区域的面积增长迅速,并且始终保持增加的规律;同时,研

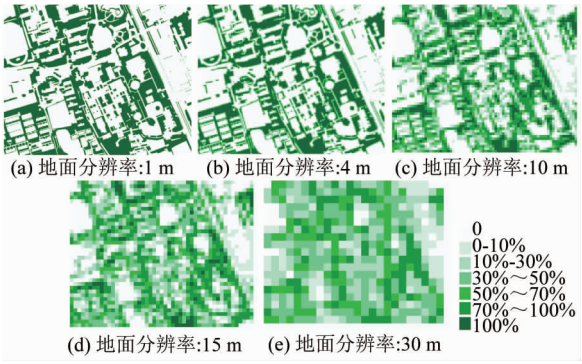


图 2　各空间分辨率植被覆盖度分级图
Fig. 2　Muti-scale fraction vegetation coverage diagram in different categories

究区内植被覆盖度的最小值(除 0 外)、最大值和均值均逐渐变小. 微覆盖和高覆盖区域在空间分辨率从 1 m 变为 15 m 的过程中,其面积处于增长的过程,但当空间分辨率为 30 m 时其又表现为下降. 上述分析表明,植被覆盖度的面积变化具有明显的尺度效应.

1.3　评价指标

(1)系统偏差

系统偏差(System Deviation,SD)反映了植被覆盖度估算影像(数据)与植被覆盖度参考影像(数据)的整体差异程度,是植被覆盖度差异的直观反映,其值越小表示差异越小,理想值为 0.

$$SD = \frac{1}{MN}\sum_{r=1}^{M}\sum_{c=1}^{N} |Fr'(r,c) - Fr(r,c)| \quad , \quad (5)$$

式中,Fr′为参考植被覆盖度影像(数据);Fr 为估算植被覆盖度影像(数据);M、N 为影像(数据)的最大行列数;r、c 为影像的行列号.

(2)均方根误差

均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)反映了植被覆盖度估算影像(数据)与植被覆盖度参考影像(数据)间的差异程度.

表 1　各空间分辨率植被覆盖度分级统计表
Table 1　Statistics of fraction vegetation coverage data in different categories

区间	1 m		4 m		10 m		15 m		30 m	
	数据个数	面积/m²	数据个数	面积/m²	数据个数	面积/m²	数据个数	面积/m²	数据个数	面积/m²
0	258 124	258 124	12 490	199 840	1 275	127 500	418	94 050	69	62 100
(0.0,0.1)	6 148	6 148	1 683	26 928	544	54 400	277	62 325	60	54 000
[0.1,0.3)	7 384	7 384	1 772	28 352	553	55 300	288	64 800	100	90 000
[0.3,0.5)	6 617	6 617	1 639	26 224	488	48 800	326	73 350	124	111 600
[0.5,0.7)	6 706	6 706	1 454	23 264	481	48 100	259	58 275	80	72 000
[0.7,1.0)	13 749	13 749	3 001	48 016	768	76 800	363	81 675	67	60 300
1	151 272	151 272	6 011	96 176	391	39 100	69	15 525	0	0

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^{M}\sum_{c=1}^{N}[\mathrm{Fr}'(r,c) - \mathrm{Fr}(r,c)]^2}{M \times N}} \quad . \quad (6)$$

2 实验与分析

结合地形图评价数据所在区域的情况，利用IKONOS(2003年06月22日)、SPOT(2003年12月14日)和ETM+(2003年05月29日)的多光谱影像及其融合影像(图3)进行多尺度植被覆盖度研究；其中，融合影像采用SVRFM算法[17]融合生成. 在对所有植被覆盖度估算结果综合评价分析的基础上，获得研究区的较佳辐射校正模型、植被指数、空间尺度和植被覆盖度模型，限于篇幅论文仅给出上述评价的定量评价数据及各空间分辨率较佳模型植被覆盖度估算图.

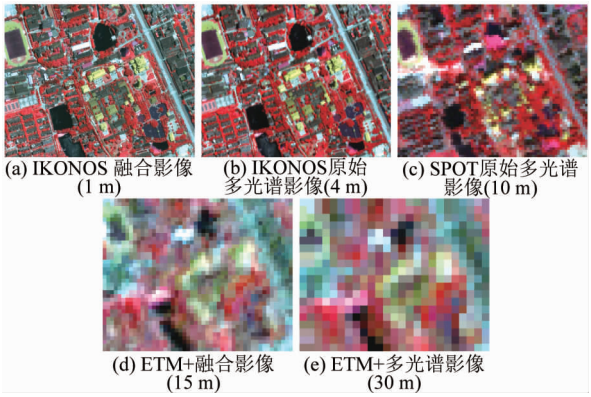


图3 各空间分辨率的原始影像
Fig. 3 Muti-scale original images

2.1 多源多尺度植被覆盖度分析

利用NDVI等6种植被指数对5种空间尺度(1 m、4 m、10 m、15 m和30 m)的遥感影像的DN值、SRSA值[18]、ICM值[18-19]、IACM值[20]、IACM-τ值[20]和FLAASH值[21]等6种数据形式进行植被提取，分别采用GI模型、CR模型和GC模型进行植被覆盖度估算，并利用SD和RMSE评价指标对估算结果进行定量评价. 植被覆盖度估算模型中所用的裸土植被指数值为包含研究区的整景影像中裸土植被指数的均值.

通过对表2~6分析可知，由多源多尺度遥感影像获得的植被覆盖度的估算精度，除与传感器的差异有关外，还受影像的空间分辨率(空间尺度)、植被指数、植被覆盖度模型和影像数据形式等4个方面的影响. 通常传感器差异的影响主要体现在地物对波谱响应的灵敏度上，该影响会造成植被指数计算结果的整体偏大或偏小，即传感器差异的影响对植被指数的提取结果是系统性影响. 在利用植被覆盖度模型进行植被覆盖度估算时，由于公式中NDVI$_0$和NDVI$_\infty$均来自植被指数的实际计算值，且计算过程中的求差和比值运算可以削弱该系统性影响；因此，传感器差异对植被覆盖度估算结果的影响可以忽略不计. 空间尺度、植被指数、植被覆盖度模型和影像数据形式对植被覆盖度估算结果的影响，体现为四者之间的相互影响.

2.1.1 较优植被覆盖度模型

分析表2~6可知，无论采用哪种空间尺度、影像数据形式和植被指数进行植被覆盖度估算，GI模型的评价结果整体最好. 通过对各植被覆盖图分析可知，CR模型在高分辨率遥感影像的植被覆盖度估算中降低了影像的整体覆盖度，虚增了中低覆盖和微覆盖的区域面积；GC模型较CR模型计算精度有所改善，其在避免非植被信息的引入的同时与CR模型一样存在对研究区植被覆盖度低估的问题. GI模型、CR模型和GC模型的估算精度都会因所使用的植被指数、空间分辨率和数据类型的差异而不同，且三种估算模型的精度排序也不是一成不变的. 当使用高分辨率的遥感影像对城市区域植被覆盖度进行估算时，无论采用何种植被指数与GI模型组合进行植被覆盖度估算，其估算结果的整体精度稳定性较好，且不会降低影像的植被覆盖度. CR模型和GC模型偶尔也会表现出较好的估算精度，如采用NDVI指数对ETM+的IACM校正数据的植被提取结果进行估算时，但该两种模型的估算结果均存在对植被覆盖度的低估问题. 因此，建议采用GI模型对高分辨率遥感影像进行植被覆盖估算.

2.1.2 较佳辐射校正模型

分析表2~6可知，植被覆盖度的估算精度会因遥感影像所采用辐射校正数据形式的不同而产生差异. 整体来看，利用ICM、IACM、IACM-τ和FLAASH等数据形式估算的植被覆盖度比利用影像DN值和SRSA值估算的植被覆盖度精度高. 当采用相同数据形式和植被覆盖模型，但使用不同植被指数时，其评价结果表现出较大的差异. 因此，为了更好的反映辐射校正模型对不同植被指数的影响将植被覆盖度评价表(表2~6)中各植被指数的SD和RMSE按等影响原则取均值. 经均值比较表明，采用ICM模型数据的植被覆盖度估算精度整体较高；IACM-τ模型数据的估算精度略高于IACM模型数据；FLAASH模型的估算精度并不理想，这可能与该模型辐射校

表 2　1 m 分辨率植被覆盖度评价表

Table 2　Evaluation of fraction vegetation coverage in 1 m scale

植被指数	评价指标	DN 值			SRSA 值			ICM 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.319 8	0.354 7	0.354 6	0.319 7	0.364 9	0.360 0	0.381 6	0.381 6	0.381 6
	RMSE	0.464 9	0.555 4	0.555 5	0.494 9	0.567 8	0.568 7	0.607 0	0.607 0	0.607 0
MSAVI	SD	0.286 1	0.322 6	0.320 9	0.298 7	0.380 1	0.344 7	0.308 4	0.353 5	0.351 3
	RMSE	0.399 8	0.490 3	0.490 4	0.461 7	0.540 7	0.541 6	0.472 7	0.553 0	0.553 5
NDVI	SD	0.309 5	0.353 0	0.352 2	0.330 3	0.376 7	0.366 8	0.301 3	0.349 9	0.349 5
	RMSE	0.460 7	0.551 5	0.551 7	0.515 0	0.578 5	0.580 4	0.432 2	0.545 5	0.545 6
RVI	SD	0.371 7	0.378 6	0.378 6	0.371 7	0.378 6	0.378 6	0.371 7	0.378 6	0.378 6
	RMSE	0.544 6	0.599 3	0.599 3	0.544 6	0.599 3	0.599 3	0.544 6	0.599 3	0.599 3
SAVI	SD	0.364 1	0.379 7	0.379 7	0.366 8	0.380 4	0.380 3	0.364 3	0.379 6	0.379 6
	RMSE	0.569 3	0.603 5	0.603 5	0.579 1	0.604 7	0.604 7	0.567 7	0.603 3	0.603 3
TGDVI	SD	0.347 0	0.352 2	0.352 2	0.332 3	0.352 2	0.352 2	0.329 1	0.352 4	0.352 4
	RMSE	0.435 0	0.533 6	0.533 6	0.448 4	0.543 2	0.543 2	0.450 6	0.546 2	0.546 2

植被指数	评价指标	IACM 值			IACM – τ 值			FLAASH 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.381 5	0.381 7	0.381 6	0.381 6	0.381 6	0.381 6	0.381 6	0.381 6	0.381 6
	RMSE	0.606 9	0.608 9	0.607 0	0.607 0	0.607 0	0.607 0	0.607 0	0.607 0	0.607 0
MSAVI	SD	0.311 2	0.356 8	0.353 4	0.310 0	0.355 8	0.352 6	0.389 7	0.327 8	0.379 0
	RMSE	0.480 0	0.556 8	0.557 5	0.477 8	0.555 4	0.556 0	0.584 0	0.487 7	0.595 9
NDVI	SD	0.308 2	0.352 1	0.351 1	0.308 2	0.352 1	0.351 1	0.387 8	0.331 4	0.379 1
	RMSE	0.458 1	0.549 5	0.549 7	0.458 1	0.549 5	0.549 7	0.584 6	0.502 1	0.596 7
RVI	SD	0.374 0	0.378 3	0.378 3	0.374 0	0.378 3	0.378 3	0.381 7	0.381 6	0.381 6
	RMSE	0.536 6	0.597 3	0.597 3	0.536 6	0.597 3	0.597 3	0.606 9	0.607 0	0.607 0
SAVI	SD	0.363 8	0.379 7	0.379 7	0.363 8	0.379 7	0.379 7	0.381 6	0.381 6	0.381 6
	RMSE	0.568 7	0.603 4	0.603 4	0.568 7	0.603 4	0.603 4	0.607 0	0.607 0	0.607 0
TGDVI	SD	0.320 8	0.360 1	0.360 1	0.320 8	0.360 1	0.360 1	0.436 2	0.394 7	0.394 7
	RMSE	0.489 4	0.567 3	0.567 3	0.489 4	0.567 3	0.567 3	0.577 6	0.586 8	0.586 8

表 3　4 m 分辨率植被覆盖度评价表

Table　3 Evaluation of fraction vegetation coverage in 4 m scale

植被指数	评价指标	DN 值			SRSA 值			ICM 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.297 0	0.348 6	0.348 5	0.306 5	0.358 1	0.354 3	0.377 1	0.377 9	0.377 8
	RMSE	0.435 7	0.526 5	0.526 6	0.461 5	0.535 6	0.536 7	0.573 0	0.574 4	0.574 2
MSAVI	SD	0.220 6	0.260 3	0.252 1	0.239 7	0.381 1	0.284 9	0.289 1	0.343 8	0.341 7
	RMSE	0.326 9	0.408 6	0.383 5	0.374 7	0.530 8	0.438 2	0.434 8	0.516 9	0.517 5
NDVI	SD	0.236 3	0.287 2	0.283 6	0.263 3	0.346 8	0.312 2	0.234 2	0.281 0	0.278 9
	RMSE	0.355 1	0.431 1	0.431 8	0.406 7	0.474 2	0.476 9	0.347 0	0.423 5	0.423 9
RVI	SD	0.301 4	0.316 9	0.316 9	0.301 4	0.316 9	0.316 9	0.301 4	0.316 9	0.316 9
	RMSE	0.364 7	0.463 6	0.463 6	0.364 7	0.463 6	0.463 6	0.364 7	0.463 6	0.463 6
SAVI	SD	0.280 6	0.333 9	0.333 8	0.294 3	0.345 5	0.343 0	0.279 8	0.332 5	0.332 5
	RMSE	0.417 6	0.506 1	0.506 2	0.446 8	0.520 2	0.521 0	0.413 0	0.503 8	0.503 9
TGDVI	SD	0.306 9	0.340 7	0.340 7	0.300 9	0.342 9	0.342 9	0.299 1	0.344 1	0.344 1
	RMSE	0.403 2	0.507 0	0.507 0	0.416 4	0.514 1	0.514 1	0.419 9	0.517 4	0.517 4

植被指数	评价指标	IACM 值			IACM – τ 值			FLAASH 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.377 4	0.379 4	0.377 8	0.377 8	0.377 9	0.377 9	0.377 1	0.377 5	0.377 8
	RMSE	0.573 5	0.623 3	0.574 2	0.574 2	0.574 3	0.574 3	0.570 7	0.573 3	0.574 2
MSAVI	SD	0.275 2	0.325 8	0.325 8	0.273 9	0.323 8	0.323 8	0.375 3	0.362 3	0.371 4
	RMSE	0.393 7	0.491 6	0.491 6	0.390 5	0.488 5	0.488 5	0.547 7	0.525 0	0.560 0
NDVI	SD	0.284 0	0.276 8	0.276 7	0.284 0	0.276 8	0.276 7	0.372 9	0.419 0	0.371 2
	RMSE	0.340 4	0.384 3	0.384 2	0.340 4	0.384 3	0.384 2	0.547 2	0.640 1	0.560 5
RVI	SD	0.367 1	0.377 2	0.377 2	0.367 1	0.377 2	0.377 2	0.394 5	0.377 1	0.377 1
	RMSE	0.550 2	0.573 1	0.573 1	0.550 2	0.573 1	0.573 1	0.498 4	0.549 3	0.549 3
SAVI	SD	0.367 6	0.377 3	0.377 3	0.367 6	0.377 3	0.377 3	0.373 4	0.369 8	0.374 8
	RMSE	0.377 4	0.379 4	0.377 8	0.377 8	0.377 9	0.377 9	0.377 1	0.377 5	0.377 8
TGDVI	SD	0.573 5	0.623 3	0.574 2	0.574 2	0.574 3	0.574 3	0.570 7	0.573 3	0.574 2
	RMSE	0.275 2	0.325 8	0.325 8	0.273 9	0.323 8	0.323 8	0.375 3	0.362 3	0.371 4

表 4 10 m 分辨率植被覆盖度评价表

Table 4 Evaluation of fraction vegetation coverage in 10 m scale

植被指数	评价指标	DN 值			SRSA 值			ICM 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.371 6	9.091 5	0.371 5	0.371 3	312.985	0.371 3	0.362 8	1.078 4	0.368 2
	RMSE	0.527 2	11.017 5	0.527 3	0.527 3	363.413	0.527 3	0.512 8	1.375 7	0.521 2
MSAVI	SD	0.371 5	121.627 8	0.371 4	43.215 9	2 139.19	2 139.19	0.371 3	2.352 0	0.371 6
	RMSE	0.527 4	148.889 2	0.527 3	45.979 8	2 518.19	2 518.19	0.526 0	2.829 3	0.527 0
NDVI	SD	0.371 3	333.647 3	0.371 3	9.731 4	108.107	108.107	0.363 5	1.266 7	0.369 0
	RMSE	0.527 3	374.464 4	0.527 3	10.115 7	118.316	118.316	0.512 9	1.597 4	0.521 9
RVI	SD	0.262 9	0.306 9	0.306 9	0.262 9	0.306 9	0.306 9	0.262 9	0.306 9	0.306 9
	RMSE	0.326 8	0.424 9	0.424 9	0.326 8	0.424 9	0.424 9	0.326 8	0.424 9	0.424 9
SAVI	SD	0.371 6	16.088 4	0.371 4	131.586	18 287.0	18 287.0	0.356 8	0.459 1	0.367 3
	RMSE	0.527 3	17.907 6	0.527 3	134.914	19 610.0	19 610.0	0.502 6	0.538 9	0.518 7
TGDVI	SD	0.371 4	0.371 4	0.371 4	0.371 4	0.371 8	0.371 8	0.368 2	0.371 1	0.371 1
	RMSE	0.527 2	0.527 3	0.527 3	0.524 9	0.526 6	0.526 6	0.519 4	0.525 2	0.525 2

植被指数	评价指标	IACM 值			IACM – τ 值			FLAASH 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.371 0	0.371 2	0.371 0	0.371 2	0.371 3	0.371 4	0.340 3	0.400 9	0.361 9
	RMSE	0.526 7	0.526 9	0.527 0	0.526 9	0.527 2	0.527 4	0.478 0	0.501 3	0.509 4
MSAVI	SD	0.322 4	0.365 6	0.355 0	0.300 0	0.348 5	0.344 5	0.338 8	0.432 7	0.360 0
	RMSE	0.452 6	0.491 7	0.499 2	0.421 3	0.480 7	0.483 9	0.476 7	0.518 0	0.506 9
NDVI	SD	0.242 5	0.297 3	0.291 0	0.242 5	0.297 3	0.291 0	0.331 9	0.497 7	0.355 1
	RMSE	0.335 1	0.413 2	0.409 9	0.335 1	0.413 2	0.409 9	0.468 4	0.589 4	0.500 1
RVI	SD	0.314 0	0.357 0	0.357 0	0.314 0	0.357 0	0.357 0	0.260 7	0.304 2	0.304 2
	RMSE	0.434 2	0.505 7	0.505 7	0.434 2	0.505 7	0.505 7	0.324 7	0.421 7	0.421 7
SAVI	SD	0.326 9	0.361 0	0.361 0	0.326 9	0.361 0	0.361 0	0.326 9	0.367 3	0.355 3
	RMSE	0.461 0	0.511 8	0.511 8	0.461 0	0.511 8	0.511 8	0.459 9	0.490 3	0.500 2
TGDVI	SD	0.314 6	0.351 7	0.351 7	0.314 6	0.351 7	0.351 7	0.371 3	0.371 6	0.371 7
	RMSE	0.440 6	0.494 0	0.494 0	0.440 6	0.494 0	0.494 0	0.525 6	0.527 3	0.527 4

表 5 15 m 分辨率植被覆盖度评价表

Table 5 Evaluation of fraction vegetation coverage in 15 m scale

植被指数	评价指标	DN 值			SRSA 值			ICM 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.364 5	26.948 7	0.364 9	0.289 4	0.339 5	0.339 5	0.356 3	0.364 9	0.364 9
	RMSE	0.495 7	31.843 7	0.496 6	0.390 2	0.459 4	0.460 4	0.485 4	0.497 0	0.497 1
MSAVI	SD	0.364 9	47 615.99	0.365 1	0.279 7	0.332 2	0.320 6	0.264 7	0.319 7	0.319 7
	RMSE	0.497 3	56 504.26	0.497 4	0.381 4	0.434 3	0.436 6	0.340 8	0.432 3	0.432 3
NDVI	SD	9.523 2	104.369 3	104.369 3	0.303 0	0.349 1	0.338 1	0.278 7	0.259 8	0.259 8
	RMSE	9.923 5	115.778 1	115.778 1	0.414 7	0.451 9	0.459 3	0.328 0	0.335 0	0.335 0
RVI	SD	0.259 2	0.283 1	0.283 1	0.259 9	0.282 3	0.282 3	0.259 9	0.282 3	0.282 3
	RMSE	0.311 7	0.377 9	0.377 9	0.311 4	0.376 2	0.376 2	0.311 4	0.376 2	0.376 2
SAVI	SD	0.365 1	236.341 4	0.365 2	0.288 0	0.333 5	0.333 2	0.259 9	0.282 3	0.282 3
	RMSE	0.497 0	261.093 9	0.497 2	0.391 3	0.450 3	0.452 8	0.311 4	0.376 2	0.376 2
TGDVI	SD	0.356 4	0.362 2	0.362 2	0.276 3	0.288 5	0.288 5	0.272 1	0.291 3	0.291 3
	RMSE	0.483 4	0.491 7	0.491 7	0.320 9	0.376 1	0.376 1	0.316 4	0.382 2	0.382 2

植被指数	评价指标	IACM 值			IACM – τ 值			FLAASH 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.371 0	0.371 2	0.371 0	0.371 2	0.371 3	0.371 4	0.340 3	0.400 9	0.361 9
	RMSE	0.526 7	0.526 9	0.527 0	0.526 9	0.527 2	0.527 4	0.478 0	0.501 3	0.509 4
MSAVI	SD	0.322 4	0.365 6	0.355 0	0.300 0	0.348 5	0.344 5	0.338 8	0.432 7	0.360 0
	RMSE	0.452 6	0.491 7	0.499 2	0.421 3	0.480 7	0.483 9	0.476 7	0.518 0	0.506 9
NDVI	SD	0.242 5	0.297 3	0.291 0	0.242 5	0.297 3	0.291 0	0.331 9	0.497 7	0.355 1
	RMSE	0.335 1	0.413 2	0.409 9	0.335 1	0.413 2	0.409 9	0.468 4	0.589 4	0.500 1
RVI	SD	0.314 0	0.357 0	0.357 0	0.314 0	0.357 0	0.357 0	0.260 7	0.304 2	0.304 2
	RMSE	0.434 2	0.505 7	0.505 7	0.434 2	0.505 7	0.505 7	0.324 7	0.421 7	0.421 7
SAVI	SD	0.326 9	0.361 0	0.361 0	0.326 9	0.361 0	0.361 0	0.326 9	0.367 3	0.355 3
	RMSE	0.461 0	0.511 8	0.511 8	0.461 0	0.511 8	0.511 8	0.459 9	0.490 3	0.500 2
TGDVI	SD	0.314 6	0.351 7	0.351 7	0.314 6	0.351 7	0.351 7	0.371 3	0.371 6	0.371 7
	RMSE	0.440 6	0.494 0	0.494 0	0.440 6	0.494 0	0.494 0	0.525 6	0.527 3	0.527 4

表 6　30 m 分辨率植被覆盖度评价表
Table 6　Evaluation of fraction vegetation coverage in 30 m scale

植被指数	评价指标	DN 值			SRSA 值			ICM 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.348 7	10.596 6	0.348 0	0.252 2	0.311 9	0.312 9	0.215 9	0.251 1	0.251 1
	RMSE	0.442 0	12.866 6	0.442 0	0.321 3	0.394 0	0.395 6	0.275 0	0.318 9	0.318 9
MSAVI	SD	0.347 4	120.259 8	0.347 4	0.255 4	0.318 2	0.303 3	0.201 0	0.285 0	0.284 9
	RMSE	0.442 2	147.484 5	0.442 1	0.327 2	0.391 7	0.383 6	0.263 2	0.360 5	0.360 5
NDVI	SD	0.347 6	14 880.58	0.347 6	0.283 1	0.329 3	0.321 7	0.207 2	0.216 9	0.216 9
	RMSE	0.442 3	16 820.02	0.442 3	0.359 5	0.404 4	0.406 6	0.262 3	0.279 6	0.279 6
RVI	SD	0.194 6	0.250 8	0.250 8	0.195 0	0.249 5	0.249 5	0.195 0	0.249 5	0.249 5
	RMSE	0.246 6	0.318 0	0.318 0	0.246 4	0.316 3	0.316 3	0.246 4	0.316 3	0.316 3
SAVI	SD	0.348 3	20.090 1	0.347 5	0.268 0	0.317 9	0.318 8	0.193 4	0.253 9	0.253 9
	RMSE	0.442 3	22.725 1	0.442 1	0.339 2	0.400 6	0.402 5	0.246 1	0.321 8	0.321 8
TGDVI	SD	0.338 5	0.345 3	0.345 3	0.214 7	0.250 0	0.250 0	0.207 7	0.245 8	0.245 8
	RMSE	0.429 8	0.438 6	0.438 6	0.266 4	0.315 1	0.315 1	0.258 1	0.310 8	0.310 8

植被指数	评价指标	IACM 值			IACM – τ 值			FLAASH 值		
		GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型	GI 模型	CR 模型	GC 模型
HYBRID	SD	0.371 0	0.371 2	0.371 0	0.371 2	0.371 3	0.371 4	0.340 3	0.400 9	0.361 9
	RMSE	0.526 7	0.526 9	0.527 0	0.526 9	0.527 2	0.527 4	0.478 0	0.501 3	0.509 4
MSAVI	SD	0.322 4	0.365 6	0.355 0	0.300 0	0.348 5	0.344 5	0.338 8	0.432 7	0.360 0
	RMSE	0.452 6	0.491 7	0.499 2	0.421 3	0.480 7	0.483 9	0.476 7	0.518 0	0.506 9
NDVI	SD	0.242 5	0.297 3	0.291 0	0.242 5	0.297 3	0.291 0	0.331 9	0.497 7	0.355 1
	RMSE	0.335 1	0.413 2	0.409 9	0.335 1	0.413 2	0.409 9	0.468 4	0.589 4	0.500 1
RVI	SD	0.314 0	0.357 0	0.357 0	0.314 0	0.357 0	0.357 0	0.260 7	0.304 2	0.304 2
	RMSE	0.434 2	0.505 7	0.505 7	0.434 2	0.505 7	0.505 7	0.324 7	0.421 7	0.421 7
SAVI	SD	0.326 9	0.361 0	0.361 0	0.326 9	0.361 0	0.361 0	0.326 9	0.367 3	0.355 3
	RMSE	0.461 0	0.511 8	0.511 8	0.461 0	0.511 8	0.511 8	0.459 9	0.490 3	0.500 2
TGDVI	SD	0.314 6	0.351 7	0.351 7	0.314 6	0.351 7	0.351 7	0.371 3	0.371 6	0.371 7
	RMSE	0.440 6	0.494 0	0.494 0	0.440 6	0.494 0	0.494 0	0.525 6	0.527 3	0.527 4

正结果中容易产生异常值有关. 当 GI 模型、CR 模型和 GC 模型利用 ICM 值采用不同植被指数进行植被覆盖度估算时,其估算精度相对较好,且该校正模型计算过程简单易于实现. 因此,在对城市进行植被覆盖度估算时推荐使用 ICM 模型对影像 DN 值进行辐射校正.

2.1.3　较优植被指数模型

对表 2 ~6 中的定量评价结果按估算精度排序分析,各植被指数对不同数据形式或相同数据形式不同空间分辨率,其估算精度差异较大. 分析由辐射校正数值获得的植被覆盖度评价结果,对于高分辨率遥感影像,NDVI 精度最高;中低分辨率遥感影像,以 MSAVI、SAVI 和 RVI 精度相对较好,且以 RVI 估算精度为最好. 对于所有辐射校正的数据形式,HYBRID 的精度均最差,表明 HYBRID 指数不适用于对辐射校正后的数据进行植被覆盖度估算. SAVI 指数表现不突出,主要是该指数的提取精度易受土壤调节系数(l)的影响,可能与本文仅采用文献中推荐值($l=0.5$),未对土壤调节系数不同取值的估算效果进行研究有关.

总之,对高分辨率遥感影像进行植被覆盖度估算时,建议采用 NDVI 指数的植被提取结果作为估算模型的先验数据;在对中分辨率遥感影像进行植被覆盖度估算时,建议采用 RVI 指数或 MSAVI 指数的植被提取结果作为估算模型的先验数据;但如果采用 ICM 模型的校正数据时,不建议采用 MSAVI 指数,而建议采用 SAVI 指数. RVI、SAVI 和 MSAVI 植被指数的精度在不同空间尺度上精度高低出现交替,但 RVI 整体表现较好,为中分辨率遥感影像的较佳植被指数.

2.1.4　较佳空间尺度

根据前面确定的较佳植被覆盖度模型、植被指数和辐射校正模型,进行研究区植被覆盖度估算,获得了各种空间尺度下的较优植被覆盖度图(图 4).

对比图 4 和图 2、表 1 和表 7 可知,各空间分辨率遥感影像获得的植被覆盖度相较于参考植被覆盖度,其全覆盖和高覆盖区域均偏少;微覆盖和低覆盖区域偏多,并且由于遥感影像受“异物同谱”的影响而存在植被错提现象. 随着遥感影像空间分辨的降低,植被覆盖度中的全覆盖、高覆盖和无覆盖区域迅

表7 较佳模型各区间植被覆盖度数据统计表

Table 7 Statistics of fraction vegetation coverage data of optimal model in different categories

区间	1 m		4 m		10 m		15 m		30 m	
	数据个数	面积/m^2	数据个数	面积/m^2	数据个数	面积/m^2	数据个数	面积/m^2	数据个数	面积/m^2
0	105 280	105 280	9 432	150 912	1	100	2	450	1	900
(0.0,0.1)	135 062	135 062	4 560	72 960	301	30 100	12	2 700	193	173 700
[0.1,0.3)	102 553	102 553	3 947	63 152	2 450	245 000	714	160 650	245	220 500
[0.3,0.5)	95 946	95 946	3 479	55 664	1 219	121 900	894	201 150	47	42 300
[0.5,0.7)	11 018	11 018	4 145	66 320	456	45 600	315	70 875	7	6 300
[0.7,1.0)	139	139	2 486	39 776	72	7 200	62	13 950	6	5 400
1	2	2	1	16	1	100	1	225	1	900

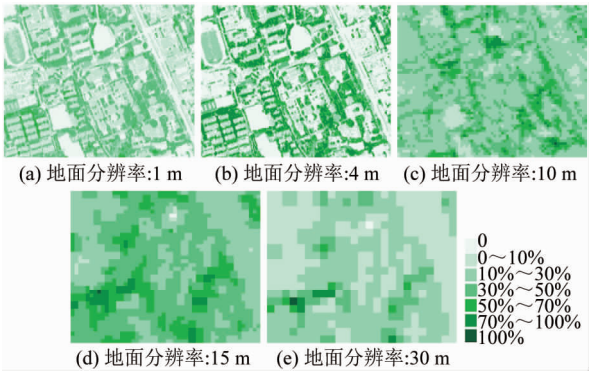


图4 各空间分辨率较佳模型植被覆盖度估算图

Fig. 4 Muti-scale fraction vegetation cover diagram of optimal model

速减少,甚至消失,使得植被覆盖度主要集中在低覆盖和中覆盖区. 当影像空间分辨率为30 m时,低覆盖和微覆盖占主导地位. 通过分析发现,虽然4 m分辨率遥感影像的植被覆盖度相对于参考植被覆盖会整体降低一个分级,但其植被的错判情况最少,整体趋势与参考影像最接近. 因此,4 m空间分辨率遥感影像为研究城市植被覆盖度的较佳空间尺度遥感影像.

2.2 多源同尺度植被覆盖度分析

采用两种数据处理方法获取研究区植被覆盖度,对相同空间尺度下多源遥感影像的植被覆盖度估算精度进行评价分析. 具体数据处理方法为:方法1,先对遥感影像进行上采样获得低空间分辨率的影像,然后进行植被覆盖度估算;方法2,先对遥感影像进行植被覆盖度估算,然后对估算结果进行上采样获得低空间分辨率的植被覆盖度估算数据. 最后,利用评价指标对上述两种方法获得的数据与参考影像进行精度评价,并与对应空间分辨率的原始多光谱影像的植被覆盖度结果进行比较(表8～11).

通过对表2～6的分析可知,评价指标SD和RMSE对所有数据评价具有相同趋势. 因此,在对多源同尺度遥感影像植被覆盖度估算精度的评价中仅采用了RMSE指标,并且各表中计算RMSE时均以对应空间分辨率率的参考植被覆盖度为依据. 表8～11中,符号"→"表示上采样,如1 m→4 m表示影像为由1 m空间分辨率的影像重采样为4 m空间分辨率的影像.

表8 4 m分辨率多源同尺度植被覆盖度RMSE评价结果比较

Table 8 RMSE evaluation results of the same scale vegetation fraction from different source in 4 m scale

植被指数	1 m→4 m		原始4 m
	方法1	方法2	
NDVI	0.412 5	0.381 4	0.347 0
RVI	0.509 4	0.450 4	0.364 7
SAVI	0.533 7	0.487 2	0.413 0

表9 10 m分辨率多源同尺度植被覆盖度RMSE评价结果比较

Table 9 RMSE evaluation results of the same scale vegetation fraction from different source in 10 m scale

植被指数	1 m→10 m		4 m→10 m		原始10 m
	方法1	方法2	方法1	方法2	
NDVI	0.362 6	0.327 7	0.318 1	0.303 8	0.512 9
RVI	0.459 3	0.388 7	0.314 8	0.310 3	0.326 8
SAVI	0.485 6	0.419 8	0.362 8	0.366 7	0.502 6

表10 15 m分辨率多源同尺度植被覆盖度RMSE评价结果比较

Table 10 RMSE evaluation results of the same scale vegetation fraction from different source in 15 m scale

植被指数	1 m→15 m		4 m→15 m		10 m→15 m		原始15 m
	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2	
NDVI	0.335 0	0.294 4	0.303 2	0.286 2	1.436 2	0.483 5	0.328 0
RVI	0.428 4	0.343 8	0.272 4	0.279 5	0.298 7	0.296 9	0.311 4
SAVI	0.456 2	0.377 7	0.323 8	0.339 6	0.858 1	0.473 4	0.311 4

表 11　30 m 分辨率多源同尺度植被覆盖度 RMSE 评价结果比较
Table 11　RMSE evaluation results of the same scale vegetation fraction from different source in 30 m scale

植被指数	1 m→30 m		4 m→30 m		10 m→30 m		15 m→30 m		原始 30 m
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	
NDVI	0.307 1	0.293 0	0.315 6	0.288 6	2.159 2	0.425 6	0.279 9	0.278 1	0.262 3
RVI	0.375 8	0.308 3	0.249 2	0.246 0	0.243 5	0.243 8	0.251 1	0.250 7	0.246 4
SAVI	0.405 8	0.339 0	0.305 6	0.314 2	1.128 1	0.332 0	0.251 1	0.250 7	0.246 1

通过对表 8 ~ 11 分析可知,上述两种采样方法获得的植被覆盖度估算精度整体比同尺度的原始多光谱遥感影像获得的植被覆盖度估算精度低. 经尺度转换获得的 10 m 空间分辨率的植被覆盖相较于原始 10 m 的估算精度要高,造成该现象的主要原因是时相差异所引起的,本文中所用的原始 10 m 空间分辨率的 SPOT 影像时相为 2003 年 12 月份,而 IKONOS 为 2003 年 6 月份,对于植被来说 6 月份的生长情况要比 12 月份好的多,并且参考植被覆盖度的数据也是以 6 月份为基准获得的,所以空间转换获得植被覆盖度会优于原始 10 m 的估算结果. 由高分辨率遥感影像先进行上采样获得低分辨率遥感影像再进行植被覆盖度估算所获得的植被覆盖度比先对高分辨率遥感影像进行植被覆盖度估算再进行空间尺度转换获得的植被覆盖度估算精度要低. 因此,在进行植被覆盖度估算时,如需进行空间尺度转换应先计算出植被覆盖度后再进行尺度转换.

3　结论

(1)在城市区域进行植被覆盖度估算时,利用 ICM 模型进行辐射校正后影像的植被覆盖度估算精度整体较高. CR 模型和 GC 模型偶尔也会表现出较好的估算精度,但由于该两模型的估算结果会造成植被覆盖度被低估,因此建议采用 GI 模型;空间分辨率为 4 m 的遥感影像是研究城市植被覆盖度的较佳空间尺度遥感影像

(2)在对高分辨率遥感影像进行植被覆盖度估算时建议采用 NDVI 指数的植被提取结果作为估算模型的先验数据;在对中分辨率遥感影像进行植被覆盖度估算时建议采用 RVI 指数或 MSAVI 指数的植被提取结果作为估算模型的先验数据;

(3)利用不同空间分辨率的遥感影像进行植被覆盖度研究时其具有明显的尺度效应,因此,应该根据空间尺度的不同,采用相应的模型组合方式. 当空间分辨率为 1 m 和 4 m 时,推荐先采用 ICM 模型对遥感影像进行辐射校正,然后采用 NDVI 指数和 GI 模型组合进行植被覆盖度估算;当空间分辨率为 10 m和 15 m 时,推荐先采用 ICM 模型对遥感影像进行辐射校正,然后采用 RVI 指数和 GI 模型组合进行植被覆盖度估算;当空间分辨率为 30 m 时,推荐先采用 IACM-τ 模型对遥感影像进行辐射校正,然后采用 MSAVI 指数和 GI 模型组合进行植被覆盖度估算;

(4)若需对多源多尺度遥感影像获得的植被覆盖度进行尺度统一,应先对高分辨率遥感影像进行植被覆盖度估算后再进行空间尺度转换.

References

[1] CHEN Yun-Hao, LI Xiao-Bing, SHI Pei-Jun, *et al*. Estimating vegetation coverage change using remote sensing data in Haidian district, Beijing [J]. *Acta Phytoecologica Sinica* (陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 北京海淀区植被覆盖度的遥感动态研究. **植物生态学报**), 2001, **25**(5): 588 - 593.

[2] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor [J]. *Ecology*, 1969, 50: 663 - 666.

[3] Rouse J W, Haas R H. Schell J A, *et al*. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [A]. In: *Proceeding of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 [C], Washington DC, USA, 1973, **1**: 309 - 317.

[4] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **25**(3): 295 - 309.

[5] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, *et al*. A modified soil adjusted vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **48**: 119 - 126.

[6] TANG Shi-Hao, ZHU Qi-Jiang, WANG Jin-Di, *et al*. Vegetation index theory and application base on gradient difference of three bands [J]. *Science in China* (Series D) (唐世浩, 朱启疆, 王锦地, 等. 三波段梯度差植被指数的理论基础及其应用. **中国科学(D 辑: 地球科学)**), 2003, **33**(11): 1094 - 1102.

[7] Ouattara A, Frazier B E, Konare A. A new enhanced soil adjusted vegetation index: HYBRID [J]. *Journal of Earth Sciences*, 2009, 3(2):40 - 45.

[8] YUE Wen-Ze, XU Jian-Hua, XU Li-Hua, *et al*. Spatial variance characters of urban synthesis pattern indices at different scales [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (岳文泽, 徐建华, 徐丽华, 等. 不同尺度下城市景观综合指数的空间变异特征研究. **应用生态学报**), 2005b, **16**(11): 2053 - 2059.

[9] WAN Hua-Wei, WANG Jin-Di, QU Yong-Hua, *et al*. Preliminary research on scale effect and scaling-up of the vegetation spectrum [J]. *Journal of Remote Sensing* (万华伟,

王锦地，屈永华，等. 植被波谱空间尺度效应及尺度转换方法初步研究. **遥感学报**)，2008，**12**(4)：538－545.
[10] Homer C G，Aldridge C L，Meyer D K，*et al*. Multi-scale remote sensing sagebrush characterization with regression trees over Wyoming，USA：Laying a foundation for monitoring [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*，2012，**14**：233－244.
[11] Carlson T N，Ripley D A. On the relation between NDVI，fractional vegetation cover，and leaf area index [J]. *Remote sensing of Environment*，1997，**62**：241－252.
[12] Gutman G，Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*，1998，**19**：1533－1543.
[13] Gan T Y，Burges S J. Assessment of soil-based and calibrated parameters of the sacramento model and parameter transferability [J]. *Journal of Hydrology*，2006，**320**：117－131.
[14] Li X B，Chen Y H，Shi P J，*et al*. Detecting vegetation fractional coverage of typical steppe in northern China based on multi-scale remotely sensed data [J]. *Acta Botanica Sinica*，2003，**45**(10)：1146－1156.
[15] Gebremichael M，Barros A P. Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions [J]. *Remote Sensing of Environment*，2006，**100**：150－166.
[16] Gallo K，Owen T，Reed B. Land use and seasonal green vegetation cover of the conterminous USA for use in numerical weather models [C]. *Paper presented at* 17*th Conference on Hydrology*，Annual Meeting of the American Meteorological Society，California，2003.
[17] GAO Yong-Gang，XU Han-Qiu. An improved SVR image fusion algorithm base on low-pass filter and histogram matching[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*(高永刚，徐涵秋. 利用直方图匹配和低通滤波改进的SVR融合算法. **武汉大学学报(信息科学版)**)，2012，**37**(11)：1316－1320.
[18] Taylor M. IKONOS planetary reflectance and mean solar exoatmospheric irradiance [R]. *QSOL*，2009，Rev. 2.
[19] Chander G，Markham B L，Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS，TM，ETM + and EO-1 ALI sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*，2009，**113**：893－903.
[20] XU Han-Qiu. Image based normalization technique used for landsat TM/ETM + imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*(徐涵秋. 基于影像的Landsat 7 TM/ETM+数据正规化技术. **武汉大学学报(信息科学版)**)，2007，**32**(1)：62－66.
[21] ITT. Atmospheric correction module：QUAC and FLAASH user's guide [R]. *ITT Visual Information Solutions Inc.*，2009，Version 4.7，pp：10－11.

(上接第224页)

[5] Ferguson B. Abbott D. De-noising techniques for terahertz responses of biological samples [J]. *Microelectronics Journal*. 2001，**32**(12)：943－953.
[6] Huang YR，Chen HP，Chiu PC，*et al*. Propagation，Resonance，and Radiation on Terahertz Optoelectronic Integrated Circuits[J]. *IEEE Photonics Journal*. 2012，**4**(3)：699－706.
[7] Wood C，Cunningham J，Hunter I C，*et al*. On-chip pulsed terahertz systems and their applications[J]. *Journal of Infrared，Millimeter and Terahertz Waves*. 2006，**27**(4)：557－569.
[8] Yanagi S，Onuma M，Kitagawa J，*et al*. Propagation of terahertz pulses on coplanar strip-lines on low permittivity substrates and a spectroscopy application[J]. *Applied Physics Express*. 2008，**1**(1).
[9] Nagel M，Boliva rH，Brucherseifer M，*et al*. Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics [J]. *Applied Physics Letters*. 2002，**80**(1)：10.1063/1.1428619.
[10] Gregory I S，Baker C，. Tribe W R，*et al*. High resistivity annealed low-temperature GaAs with 100 fs lifetimes[J]. *Applied Physics Letters*. 2003，**83**(20)：4199－4201.
[11] HoriuchiS，Hakukawa H，KimY J，*et al*. Study of the adhesion and interface of the low-temperature bonding of vacuum ultraviolet-irradiated cyclo-olefin polymer using electron microscopy[J]. *Polymer Journal*. 2016，**48**(4)：473－479.
[12] Grischkowsky D，Duling I N，Chen J C，*et al*. Electromagnetic shock waves from transmission lines[J]. *Physical Review Letters*. 1987，**59**(15)：1663－1666.
[13] Cheng H J，Whitaker J F，Weller T M. Terahertz-bandwidth characteristics of coplanar transmission lines on low permittivity substrates[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*. 1994，**42**(12)：2399-2406.
[14] Zeon Corporation，Cyclo Olefin Polymer(COP)[M/OL]. 2016[2016.6]. http://www.zeon.co.jp/business_e/enterprise/speplast/speplast1.html.
[15] Niu Z C，Han Q，Ni H Q，*et al*. Material growth and device fabrication of GaAs based 1.3μm Ga In NAs quantum well laser diodes[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*. 2005，**26**(9)：1860－1864.
[16] Mooney P M，Kavanagh K L，Owen D，*et al*. Characterization of solution-bonded GaAs/InGaAs/GaAs features on GaAs[J]. *Semiconductor Science and Technology*. 2014，**29**(7)：075009.
[17] TONG Zhao-Min，XUE Chen-Yang，ZHANG Bin-Zhen，*et al*. Fabrication technology of a novel hydrophone based on GaAs/AlAs etch-stop[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*(仝召民，薛晨阳，张斌珍，等. 基于GaAs/AlAs腐蚀自停止的新型水听器工艺. **纳米技术与精密工程**). 2007，**5**(3)：230－234.
[18] Tong M，Nummila K，Sec J W，*et al*. Process for enhancement/depletion mode GaAs/InGaAs/AlGaAs pseudomorphic MODEFETs using selective wet gate recessing [J]. *Electron Lett.*，1992，**28**(17)：1633－1634.
[19] Tong M，Balegeer D G，Ketterson A，*et al*. A comparative study of wet and dry selective etching processes for GaAs/AIGaAs/InGaAs pseudomorphic MODFETs [J]. *Electron Mater.*，1992，**21**(1)：9－15.
[20] LI Chang-Ze，TONG Chuang-Ming，WANG Tong，*et al*. Analysis of terahertz wave scattering characteristics of non-uniform unstable roughness surface target[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(李昌泽，童创明，王童，等. 非均匀不稳定表面粗糙目标的太赫兹波段散射特性分析[J]. **红外与毫米波学报**). 2016，**35**(2)：234－242.