

根据分形理论与五指标评价体系构建 NDVI 连续空间尺度转换模型

栾海军^{1 2 3}, 田庆久^{1 2}, 余涛⁴, 顾行发⁴,
黄彦^{1 2}, 胡新礼⁴, 杨闫君^{1 2}

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 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;

3. 厦门理工学院 计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361024;

4. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 针对目前基于统计或物理模型方法的升尺度转换研究中存在的不足, 以归一化差分植被指数 NDVI 为研究对象, 基于分形理论提出一种连续空间升尺度转换模型 CSSM(Continuous Spatial Scaling Model) 构建方法。所构建的模型尺度适用范围更广, 且具有一定的物理意义。针对已有研究尚未解决的模型构建的最合理尺度层级确定问题, 结合原有的统计学四指标评价体系(r 、 p 、 rlo 、 rup) 融入了真实性检验应用效能评价指标($Max_of_abs(Error)$), 建立了一个基于五指标评价体系的模型构建最合理尺度层级确定方法。以北海市沙田半岛 Landsat ETM+ 影像为实验影像, 设定 $r \geq 0.8$, $p < 0.05$, $rlo \geq r \leq rup$ 及 $Max_of_abs(Error) \leq 0.05$ 为评价体系的边界条件, 从追求模型尺度适用范围更大的角度考虑, 确定出该影像模型构建的最合理尺度层级 $Level = 267$, 则该模型最高可对 $30\text{ m} \times 267$ 即 8 km 分辨率遥感影像进行 NDVI 验证。通过动态调整此评价体系的边界条件, 实现了最合理尺度层级取值的敏感性分析。这些工作使得基于分形理论的 NDVI 的 CSSM 构建研究更为系统。

关键词: NDVI, 空间升尺度转换, 连续空间尺度转换模型, 分形, 五指标评价体系

中图分类号: TP701

文献标志码: A

引用格式: 栾海军, 田庆久, 余涛, 顾行发, 黄彦, 胡新礼, 杨闫君. 2015. 根据分形理论与五指标评价体系构建 NDVI 连续空间尺度转换模型. 遥感学报, 19(1): 116–125

Luan H J, Tian Q J, Yu T, Gu X F, Huang Y, Hu X L and Yang Y J. 2015. Establishing continuous spatial scaling model of NDVI on fractal theory and five-index estimation system. Journal of Remote Sensing, 19(1): 116–125
[DOI: 10.11834/jrs.20153340]

1 引言

空间尺度转换问题是定量遥感重要而基础的问题。其中, 空间升尺度转换研究因可用于解决如反演产品真实性检验等重要问题, 受到广泛关注。栾海军等人(2013c)对目前的定量遥感空间升尺度转换研究进行综述, 发现当前的研究尚存在如下问题: (1) 基于统计方法获取的反演量空间升尺度转换关系(Liang 等, 2002; Hilker 等, 2010; Liang 等, 2011; Nagler 等, 2012), 无明确的物理意义, 在研究

区、传感器类型等变化时不再适用; (2) 基于反演量物理模型进行的空间升尺度转换(Becker 和 Li, 1995; Li 和 Wan, 1999; Li 等, 1999; Zhang 等, 2006; Xu 等, 2009), 由于物理模型数量及精度发展的限制, 其研究无法满足需求。NDVI 作为一个重要的反演量, 其空间升尺度转换研究同样面临上述两方面的问题(Friedl 等, 1995; Meer 等, 2001; Hu 和 Islam, 1997; Zhang 等, 2006)。分形作为一种经典的尺度转换方法, 可以对研究对象连续尺度上的演化规律予以定量描述(陈颙和陈凌, 2005), 其在遥感

收稿日期: 2013-12-27; 修订日期: 2014-06-05; 优先数字出版日期: 2014-06-12

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 30-Y20A01-9003-12/13); 高等学校博士学科点专项科研基金(编号: 20100091110012); 国家自然科学基金(编号: 41105017); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2010CB950800); 厦门理工学院国家基金预研项目(编号: XYK201430)

第一作者简介: 栾海军(1984—)男, 博士, 主要从事定量遥感尺度效应研究。E-mail: luanhaijun1984@163.com

通信作者简介: 田庆久(1964—)男, 教授, 主要研究方向为高光谱遥感与遥感信息定量化。E-mail: tianqj@nju.edu.cn

影像识别与分类领域应用广泛,而在定量遥感空间升尺度转换领域则鲜有使用。Li 等人(1999)提出,当物理定律、定理及模型等应用到遥感领域时,其尺度效应体现于3种尺度转换趋势,其中一种即分形(或者近似分形)尺度转换关系。Kim 和 Barros (2002a, 2002b)曾基于分形理论建立土壤含水量在若干离散尺度上的统计关系,进行降尺度应用。Zhang 等人(2009)将分形方法应用于遥感土地利用覆盖/覆被的降尺度转换研究中。然而,他们所建立的模型并非真正意义上的连续尺度转换模型。Zhang 等人(2008, 2010)首次基于分形理论构建了叶面积指数 LAI 的连续空间升尺度转换模型,具有重要的开拓意义,这是对分形方法在尺度转换研究中的一次重要推进。

针对已有分形尺度转换研究中对象选择及模型在真实性检验中的适用性等问题,栾海军等人(2013a)以 NDVI 为研究对象构建了其连续空间尺度转换模型 CSSM(Continuous Spatial Scaling Model),并对模型在 NDVI 真实性检验中的适用性进行了理论论证。所构建模型尺度适用范围广,且具有一定的物理意义。进而,栾海军等人(2013b)结合模型构建的统计学评价指标,确定了模型构建的最合理尺度层级,使得模型的构建更为系统。

然而,栾海军等人(2013a, 2013b)的研究仍存在以下不足:模型的最合理尺度层级的确定方法(四指标评价体系方法)只考虑了模型构建的统计学评价指标,未顾及模型在真实性检验中的应用效能评价指标,方法不够精确。针对这些问题,本文结合原有的统计学四指标评价体系,融入真实性检验应用效能评价指标,建立一个基于五指标评价体系、更加精确严密的模型构建方法。

2 实验区与数据

实验区位于广西壮族自治区的北海市合浦县东部的沙田半岛(109°42'3"E—109°45'36"E, 21°29'0"N—21°33'25"N)。地物类型主要包括桉树、陆生天然林、红树林、木薯、水稻、宜林地、人工设施和水体等。该地区地类丰富、下垫面空间异质性强、具备潜在的 NDVI 尺度转换分形特性的特点,可以突出分形方法在研究定量遥感尺度转换模型构建方面的优势。

实验数据为2009年10月23日获取的沙田半岛 Landsat7 ETM+ 影像(图1(a))。原始的 ETM+

影像存在坏条带,首先利用 ENVI4.7 软件的“Destripe”模块对其进行坏条带去除。由于 ETM+ 影像为 WGS-84 坐标系、UTM 投影,其系统级几何校正精度较高;同时影像并不用于地类识别、专题信息提取等方面,而是侧重于本文方法的研究上,故在未获取充足的地面控制点的条件下,未对实验影像进行几何精校正。进一步,为控制影像内像元观测天顶角的差异所带来的影响、精确计算地表辐亮度,对整幅影像进行裁剪,选取了400像元×300像元的区域为实验区。根据影像成像时的大气、成像几何及地表状况,利用 ENVI FLAASH 模块进行大气校正,得到地表反射率影像。根据地表辐亮度与地表反射率的转换关系(地表辐亮度=地表入射辐照度×地表半球-方向反射率)(Martonchik 等,2000),最终计算得到实验区的地表辐亮度影像,如图1(b)所示。

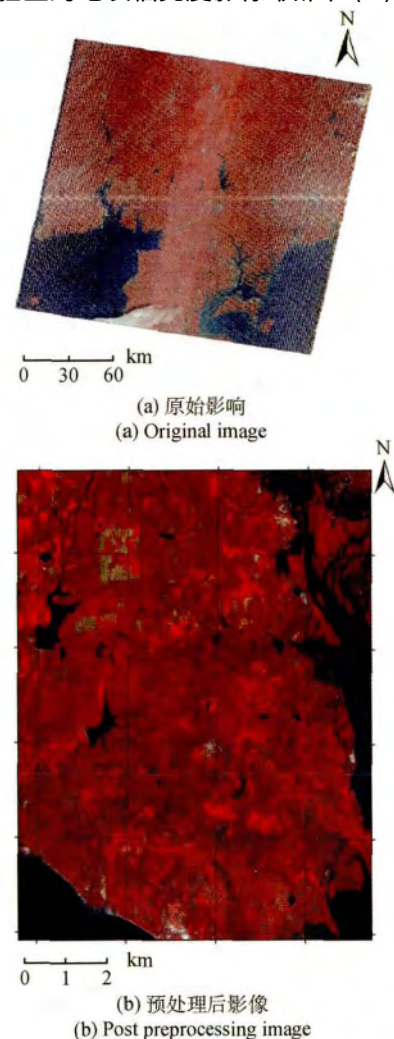


图1 实验区原始影像与预处理后 ETM+ 假彩色合成影像(R:4,G:3,B:2)

Fig. 1 Original and post-preprocessing ETM+ false color composite images (R: 4, G: 3, B: 2) of experimental area

3 研究方法

根据已有的研究基础,选定合适的分形数学模型(式(1)),并且实现了模型中尺度、研究对象等参数的移植,同时为了确保模型具备一定的物理基础,选用了NDVI的地表辐亮度计算模型(地表辐亮度具备面积加和的尺度上推规律(Xu等,2009;Zhang等,2010)),最终设计出NDVI连续空间尺度转换模型构建的流程(图2)、并构建得到其模型(栾海军等,2013a,2013b)(式(2))。

$$D = \log_{\frac{1}{s}} u = \frac{\lg u}{\lg \frac{1}{s}} \quad (1)$$

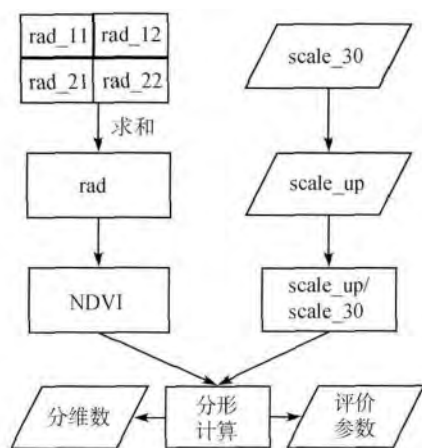


图2 NDVI连续尺度转换模型的构建流程
(栾海军等,2013a,2013b)

Fig. 2 Flowchart of modeling continuous scaling of NDVI by fractal method

设拟合直线方程为:

$$\log_2 \text{NDVI} = d \log_2 \frac{1}{\text{scale}} + b \quad (2)$$

$$\text{NDVI} = 2^b \left(\frac{1}{\text{scale}} \right)^d \quad (3)$$

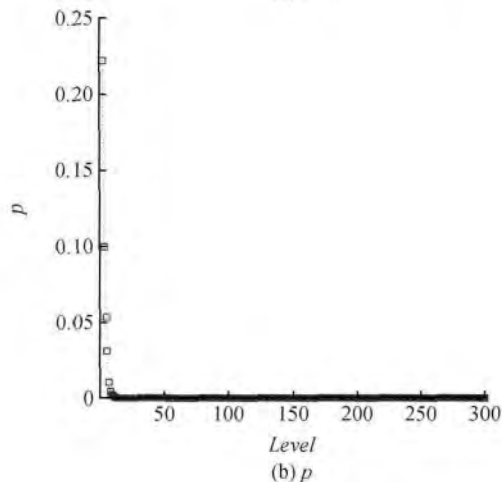
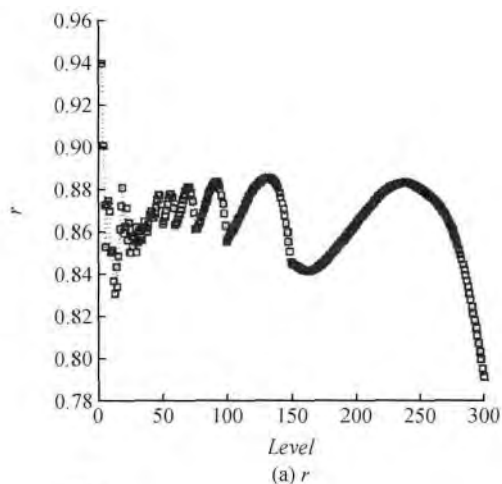
式中, scale 为影像尺度, d 为拟合直线的斜率, b 为拟合直线的截距, b 是常量。

由上述分析可知,基于各上推地表辐亮度、NDVI影像所构建的升尺度转换模型尺度适用范围更广,且具有一定的物理意义。但同时这也导致了模型最终形式依赖于上推影像尺度范围,即不同的上推尺度范围将构建得到不同的转换模型,这就产生了模型构建的最合理尺度层级确定问题。

可接受的模型不仅需要满足统计学评价指标

r 、 p 、 rlo 、 rup 的基本要求,而且需要满足模型在NDVI真实性检验中应用效能评价的基本条件,即模型计算所得 Error 绝对值的最大值可接受(栾海军等,2013b)。这里,将此 Error 绝对值的最大值定义为 $\text{Max_of_abs}(\text{Error})$,以作为模型是否可适用于NDVI真实性检验的评价指标。下面将综合考虑模型构建的评价指标 r 、 p 、 rlo 、 rup 和 $\text{Max_of_abs}(\text{Error})$,为各参数设立合适的边界条件,以确定模型构建的最合理尺度层级。

依照栾海军等人(2013a)尺度层级的获取方法,可以得到实验影像的 $\text{Level} = 3$ (即包含尺度的第一层级 $30 \text{ m} \times 1$ 、尺度的第二层级 $30 \text{ m} \times 2$ 及尺度的第三层级 $30 \text{ m} \times 3$ 等共3个层级,以下同理), $\text{Level} = 4, \dots, \text{Level} = 150, \text{Level} = 151, \dots, \text{Level} = 299, \text{Level} = 300$ 各个尺度层级。在获得上述影像各尺度层级 Level 的条件下,依照图2及相应的分形计算公式对影像进行计算,可以构建NDVI连续空间尺度转换模型,以及模型的评价指标 r 、 p 、 rlo 、 rup 和 $\text{Max_of_abs}(\text{Error})$ 。对尺度层级—评价指标进行绘图,可得图3。



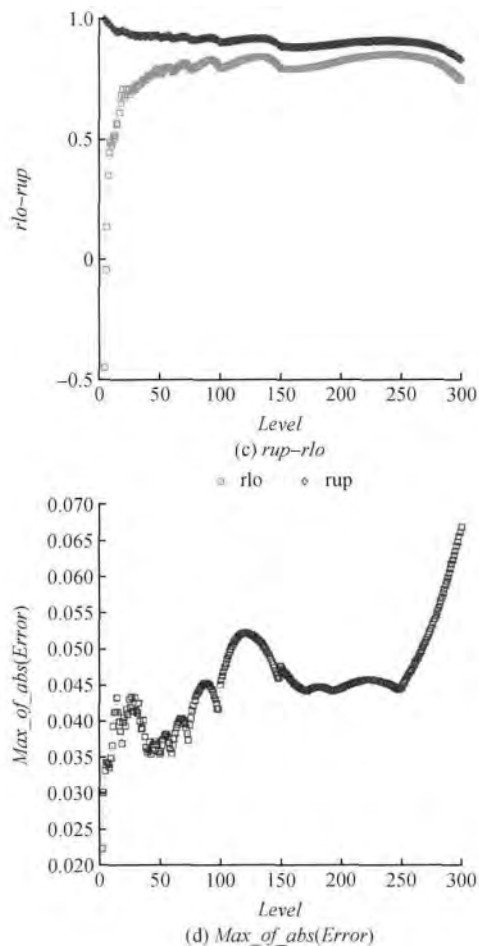


图3 各尺度层级所得模型评价

Fig. 3 Estimation of NDVI's CSSM on each Level

诚然,当 r 值更大、 p 更小、 $Max_of_abs(Error)$ 更小时,所对应的模型更好。但是若这些条件限制得太过严苛,将限制模型的尺度适用范围。故有必要在满足一定的评价指标条件下,获得尺度适用范围更广的尺度转换模型。分析各评价指标的具体意义,参考经验知识,认为 $r \geq 0.8$ 标准可较好地满足模型构建的统计学合理性要求,而 $Max_of_abs(Error) < 0.05$ 标准可较好地满足模型在 NDVI 真实性检验中可适用的要求,其他 3 个参数的边界条件确定以分形模型构建的统计学一般要求为准。最终,本文以 $r \geq 0.8$ 、 $p < 0.05$ 、 $rlo \geq r \leq rup$ 及 $Max_of_abs(Error) < 0.05$ 作为标准,从追求模型尺度适用范围更大的角度考虑,进行 NDVI 连续尺度转换模型构建的最合理尺度层级确定。

4 模型构建的最合理尺度层级计算

4.1 EMT + 影像模型构建的最合理尺度层级计算

考察图 3 中所有尺度层级下计算所得评价参数

r 、 p 、 rlo 、 rup 及 $Max_of_abs(Error)$,可确定出沙田半岛 ETM + 影像的 NDVI 连续尺度转换模型构建的最合理尺度层级 $Level = 267$ (此时 $r = 0.8705$ ($r_0 < 0.80$) $p = 1.469e-083$ $rlo = 0.8380$ $rup = 0.8968$, $Max_of_abs(Error) = 0.04969$),模型的尺度适用范围为 30—8010 m。该尺度层级下所得模型如图 4 所示,图中,横坐标 $\log_2(1/scale)$ 中的 $scale$ 代表不同的上推尺度与(作为上推基础的)基础影像尺度的比值, $scale = 1, 2, \dots, 267$, 纵坐标 $\log_2(NDVI)$ 中的 NDVI 代表各上推尺度下的 NDVI 影像均值; D 代表所构建的 NDVI 连续空间尺度转换模型的分维数,真实数据代表基于实际影像(这里为 ETM + 影像)不同上推尺度的统计数据所绘的图形,拟合数据代表基于实际统计数据所得拟合直线(即式(2)所示的 NDVI's CSSM)上各尺度计算数据所绘的图形。

图 4 中分维数 D 比较小,说明 $\log_2 \frac{1}{Scale} - \log_2 NDVI$ 曲线的结构不复杂。

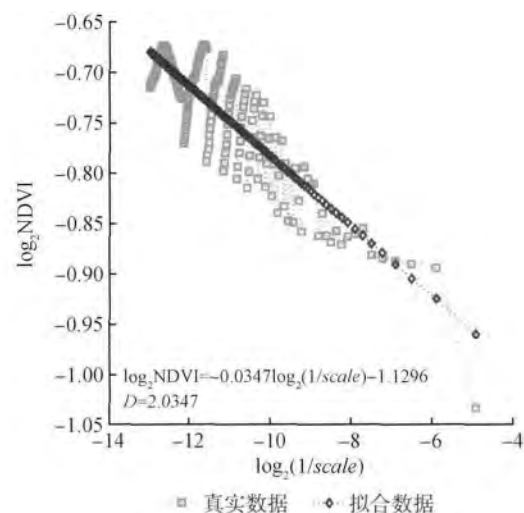

 图4 最合理尺度层级下 ($Level = 267$) 所得 NDVI 连续尺度转换模型

 Fig. 4 Establishing NDVI's CSSM on the most reasonable Level ($Level = 267$)

基于上述分析,比较不同尺度层次下所得模型的评价参数,认为选取 $Level = 267$ 尺度层级下所得模型(对应最大尺度为 30×267 m,即 8010 m)作为最终的模型比较合适。原因是:此时的 r 值为 0.8705,表明线性拟合程度良好,NDVI 随尺度变化具备典型的分形特征,但非完全自相似分形; p 值为 $1.469E-083$,说明计算的 r 值有意义; r 的真实值不足 0.8705 的概率小于 5%。

为进一步论证在 $Level = 267$ 尺度层级下建立模型的应用效果,对该模型在真实性检验中的适用性进行实验分析。

这里直接引用栾海军等人(2013a)推演出的反映分形模型计算值与各上推尺度影像的“近真值”两者差异的公式:

$$Diff = NDVI_1 - NDVI_2 \quad (4)$$

$$Error = Diff/NDVI_2 \quad (5)$$

式中, $NDVI_1$ 为利用模型计算得到的某尺度下影像 NDVI 均值, $NDVI_2$ 为各上推尺度 NDVI 影像的均值(该值可认为是“近真值”), $Diff$ 代表 $NDVI_1$ 、 $NDVI_2$ 的差值,即模型值 $NDVI_1$ 的误差, $Error$ 代表差值 $Diff$ 在 $NDVI_2$ 中所占的比重,即模型值 $NDVI_1$ 相对于“近真值” $NDVI_2$ 的误差百分比。

在 $Level = 267$ 条件下,计算各尺度($Scale$)下的 $Error$,并对结果进行图形化显示,结果如图 5 所示。图中,横坐标中 $Scale$ 代表各上推尺度, $Scale = level \times 30 \text{ m}$, $Level = 1, 2, \dots, 267$; 纵坐标 $Error$ 即在对应的各上推尺度下模型计算得到的 NDVI 误差百分比。

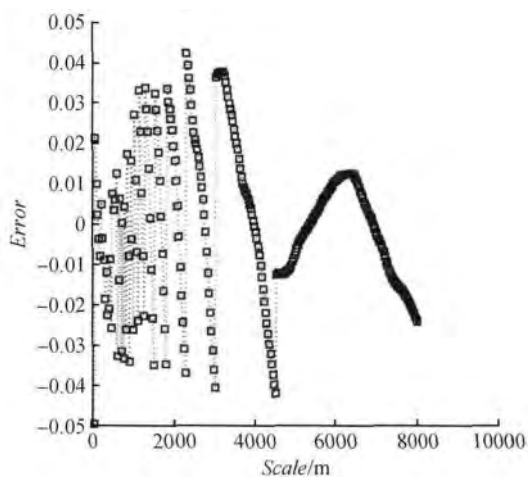


图 5 两种方法所得影像 NDVI 结果的差异曲线
($Level = 267$)

Fig. 5 Difference between the NDVI results of the two methods ($Level = 267$)

由上图可知:在不同上推尺度下,两种方法所得结果差异绝对值 $Error$ 通常不为 0; 在 $Level = 267$ (即最大上推尺度为 8010 m) 的条件下,此差异绝对值 $Error$ 的最小值为 3.6308×10^{-5} (对应于上推尺度 $Scale = 5370 \text{ m}$),最大值为 0.0497 (对应于上推尺度 $Scale = 30 \text{ m}$)。则模型所得结果与各上推尺度 NDVI 影像的均值(“近真值”)的差异可以接受。故所得模型可用于 NDVI 的真实性检验中。

综上所述,针对研究区 ETM + 实验影像,所确定的最合理 NDVI 连续空间尺度转换模型为 $\log_2 NDVI = -0.0347 \log_2 \frac{1}{Scale} - 1.1296$,该模型的

尺度适用范围为(30—8010 m)。根据此模型,可实现此尺度范围内研究区上任一 ETM + 影像分辨率(30 m)整数倍的遥感影像的 NDVI 真实性检验。

上述研究对于 NDVI 的真实性检验具有重要意义:基于所构建的 NDVI 连续空间尺度转换模型,可以建立 NDVI 在(模型尺度适用范围内)小尺度影像(对应于高空间分辨率遥感影像)与任意大尺度影像(对应于低空间分辨率遥感影像)间的转换关系,有利于快速、有效地实现大量不同的低空间分辨率遥感影像的 NDVI 真实性检验。

4.2 模型构建的最合理尺度层级取值的敏感性分析

在第 2 节中模型构建的最合理尺度层级确定的标准和条件是:以 $r \geq 0.8$, $p < 0.05$, $r_{lo} \geq r \leq r_{up}$ 及 $Max_of_abs(Error) < 0.05$,从追求模型尺度适用范围更大的角度考虑进行模型构建的最合理尺度层级确定。但在实际应用中,根据不同的需求(如追求 NDVI 的 CSSM 直线拟合的线性程度更高,或者追求模型在真实性检验中应用时的整体误差更小),需要对五指标评价体系的两个最关键的指标 r 取值的下限 $lowerlimit(r)$ (如第 2 节中所设定的 0.8)、 $Max_of_abs(Error)$ 取值的上限 $upperlimit(Error)$ (如第 2 节中所设定的 0.05) 做出调整,或者是从追求模型在特定尺度上的真实性检验误差最小的角度考虑,此时模型构建的最合理尺度层级取值将发生动态变化。

这里以 r 、 $Max_of_abs(Error)$ 两个指标为例,动态调整 $lowerlimit(r)$ 、 $upperlimit(Error)$ 的取值,同样从追求模型尺度适用范围更大的角度考虑,分析模型构建的最合理尺度层级取值的动态变化。其中, $lowerlimit(r)$ 的取值为 0.80—0.95,间隔为 0.01,共 16 个数值; $upperlimit(Error)$ 的取值为 0.050—0.005 结束,间隔为 0.005,共 10 个数值。分别计算两个指标变化下的 $Level$ 值,并对结果绘制 3 维图,可得图 6。

图 6 中表现出的变化趋势为:(1) 当 $upperlimit(Error)$ 不变时,随着 $lowerlimit(r)$ 值的增大,对模型构建时直线拟合线性化程度要求的提高,模型构建的最合理尺度层级在减小,意味着所得模型的尺度

适用范围在减小,这符合统计学的基本规律。当 $\text{lowerlimit}(r)$ 值达到临界值 0.8800 后(此时 $\text{Level} = 250$) ,随着 $\text{lowerlimit}(r)$ 值的增大, Level 值皆为 0; (2) 当 $\text{lowerlimit}(r)$ 不变时,随着 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 值的减小,对模型构建时直线拟合线性化程度要求的提高,模型构建的最合理尺度层级在减小,意味着所得模型的尺度适用范围在减小。同样地,当 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 值达到临界值 0.0350 后(此时 $\text{Level} = 10$) ,随着 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 值的增大, Level 值皆为 0; (3) 结合 (1) 、(2) 的分析可知,当 $\text{lowerlimit}(r)$ 值增大、同时 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 减小时,模型构建的最合理尺度层级减小的速度更快,其值迅速达到 0,并随着 $\text{lowerlimit}(r)$ 值的持续增大和 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 的持续减小保持不变。

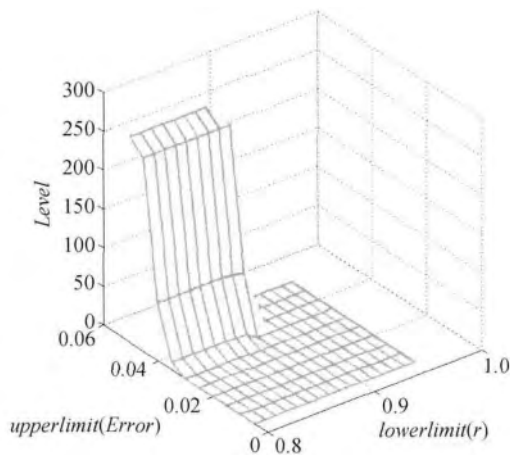


图 6 Level 随 $\text{lowerlimit}(r)$ 与 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 动态变化图
Fig.6 Curved surface of $\text{lowerlimit}(r)$, $\text{upperlimit}(\text{Error})$ and Level

为更细致地分析上述现象,从图 6 结果中提取 $\text{lowerlimit}(r) = 0.8$ (即 $r \geq 0.8$)、 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 动态变化时的截面图,如图 7 所示;同样可以从图 6 结果中提取 $\text{upperlimit}(\text{Error}) = 0.05$ (即 $\text{Max_of_abs}(\text{Error}) < 0.05$)、 $\text{lowerlimit}(r)$ 动态变化时的截面图,如图 8 所示。

从图 7 和图 8 的结果中可以更清晰地获知:随着 $\text{lowerlimit}(r)$ 的增大,模型构建的 Level 值减小;随着 $\text{upperlimit}(\text{Error})$ 的减小,模型构建的 Level 值减小。

同样地,在五指标评价体系阈值确定的条件下,若从追求模型在特定尺度上的真实性检验误差最小的角度考虑,此时模型构建的最合理尺度层级取值也将发生动态变化。具体的实施方式为:将所有尺度层级下构建所得模型的评价参数与五指标评价体系相比较,筛选得到符合此评价指标体系的

所有尺度层级;进而对筛选得到的尺度层级,比较各尺度层级所得模型在特定尺度上的真实性检验误差,将其中误差最小的模型所对应的尺度层级定义为最合理的尺度层级。

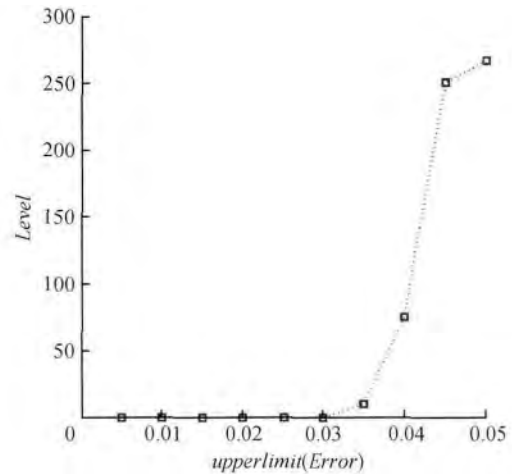


图 7 $\text{upperlimit}(\text{Error}) - \text{Level}$ 曲线

Fig.7 Curve of $\text{upperlimit}(\text{Error})$ and Level

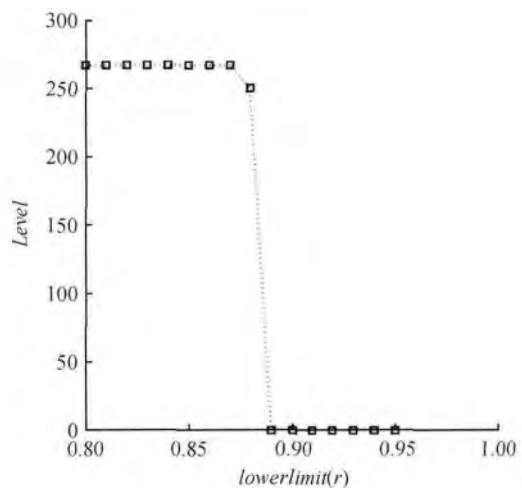


图 8 $\text{lowerlimit}(r) - \text{Level}$ 曲线

Fig.8 Curve of $\text{lowerlimit}(r)$ and Level

需要说明的是:基于 30 m ETM+ 地表辐亮度影像可以获得 1 km 地表辐亮度影像、NDVI 影像,而且此影像均值比基于模型计算所得的 1 km 尺度 NDVI 影像均值更为精确,直接用此影像对 1 km MODIS 的 NDVI 影像进行验证将更为可靠。但是,基于本文方法构建的 NDVI 连续空间尺度转换模型的优势就在于:此模型有利于快速、有效地实现不同大尺度(低空间分辨率) NDVI 影像的真实性检验。特别是当从追求模型在特定空间分辨率影像上真实性检验误差最小的角度出发,确定模型构建的最合理尺度层级时,所得模型在该特定空间分辨率影像上

的真实性检验误差将十分接近前面所述的直接基于上推尺度影像进行检验的误差。此时,模型在 NDVI 真实性检验中的精确性与尺度的广泛适用性将得到充分体现。

综上所述,当五指标评价体系阈值发生变化的条件下,或者从不同的角度和使用目的考虑时,模型构建的 *Level* 取值都会发生动态变化。因此,本文提出的基于五指标评价体系的模型构建的最合理尺度层级确定方法更为稳定和严密。

5 分析与讨论

5.1 NDVI 存在尺度效应的原因

论文以分形模型的形式揭示了 NDVI 尺度效应的存在。NDVI 存在尺度效应的原因包含 NDVI 存在空间异质性及 NDVI 计算模型的非线性(Xu 等, 2009; 栾海军等, 2013a, 2013b)。其中最根本的一点是 NDVI 存在空间异质性下文进行重点分析。

采用影像平均空间异质性指数 SHI (Spatial Heterogeneity Index) (张雪红, 2012) 定量评价影像的空间异质性。某像元 $f(i, j)$ 空间异质性指数定义为该像元与其八邻域的像素值差的绝对值之和:

$$SHI_{ij} = \sum_{a=-1}^1 \sum_{b=-1}^1 |f(i, j) - f(i+a, j+b)| \quad (6)$$

影像大小为 $m \times n$ 的实验区的空间异质性指数 SHI 定义为:

$$SHI = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} SHI_{ij} \quad (7)$$

基于式(6)(7),在 *Level* = 267 的条件下,可计算得到不同上推尺度影像的 SHI,对尺度-SHI 数组绘图,可得图 9。图中,横坐标中 *Scale* 代表各上推尺度, $Scale = Level \times 30 \text{ m}$, $Level = 1, 2, \dots, 267$; 纵坐标 *Mean SHI* 为各上推尺度对应的影像平均空间异质性指数。

若 ETM+ 影像 NDVI 空间分布均一,不存在异质性,则各上推尺度影像 SHI 相同。分析图 9 可知,不同上推尺度影像间 SHI 变化显著,这说明 ETM+ 影像 NDVI 存在显著的空间异质性。

影像平均异质性指数与地类复杂性及地类的破碎程度间的密切关系在文献(栾海军等, 2013b)中已做过细致论述。结合实验影像的地类分布状况,图 9 中曲线先增大后减小的变化趋势符合上述分析,印证了分析的合理性;拐点 (*Mean SHI* = 0.6393) 所对应的特征尺度(180 m)为影像主要地类桉树、陆生天然林等林地斑块的尺度。

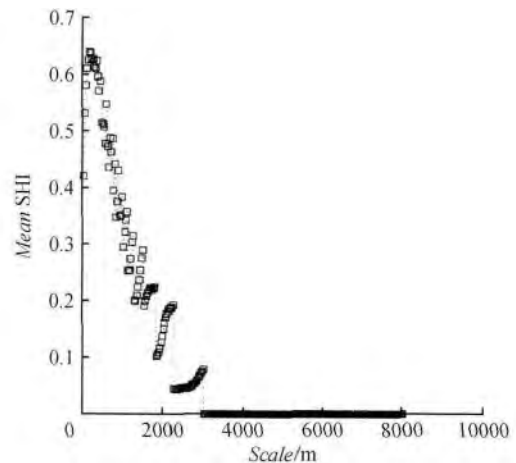


图 9 影像尺度-影像 SHI 曲线 (*Level* = 267)

Fig. 9 Scale-Mean SHI curve of the image (*Level* = 267)

5.2 对模型在真实性检验中的适用性分析的讨论

对前文所用的“模型在 NDVI 真实性检验中的适用性分析”的方法可行性做进一步的讨论。

该方法的合理性体现在以下 3 个方面:

(1) 对于一幅原始遥感影像(如本文的 ETM+ 影像)经过一系列预处理得到地表辐亮度影像。若预处理过程中辐射定标、大气校正及几何校正等操作精度高,可认为所得地表辐亮度影像是接近真实的。

(2) 符合面积加和法则的地表能量参量不存在尺度效应(Zhang 等, 2010)。故可以基于某一传感器(如本章的 ETM+)的地表辐亮度影像得到各上推尺度的地表辐亮度影像,进而计算得到各上推尺度的 NDVI 影像。基于单一传感器影像获得上推尺度影像的方法在 Zhang 等人(2010)及 Xu 等人(2009)的研究中已有使用。不同的是,由于地表反射率存在尺度效应,基于单一传感器地表反射率影像得到各上推尺度的地表反射率影像实现的困难较大,而基于单一传感器地表辐亮度影像获得各上推尺度的地表辐亮度影像实现起来更为直接、有效。可以认为基于单一传感器地表辐亮度影像获得的各上推尺度的地表辐亮度影像、NDVI 影像是接近真实的,可接受的,即文中所说的“近真值”。

(3) 由分形计算的原理可知,它建立的是各上推尺度 *scale* 与各上推尺度 NDVI 影像均值的数学关系。若获得此模型,就可以推导出各上推尺度的 NDVI 影像均值(如式(2)(3)),实现尺度上推。进而,可基于前段所述的各上推尺度 NDVI 影像(“近真值”)评价分形模型计算得到的各尺度 NDVI 影像的真实性,实现模型在 NDVI 真实性检验中的适用性分析。

严格地讲,对模型在 NDVI 真实性检验中适用性的验证,是需要利用与分形算法相对独立的数据作为参考而进行的。故文中所进行的 NDVI 连续尺度转换模型在真实性检验中的适用性分析只能看作是在理想条件下进行的理论论证,但这并不影响结论的有效性。在实际应用中,不同尺度传感器影像不具备如前文所述的各上推尺度影像那样理想的特性(与作为尺度上推基础的单一传感器影像具有相同的成像参数)。利用该模型对实际影像进行应用验证时,一个重要前提就是以(作为模型构建基础的)单一传感器影像为基准对待检验影像进行成像参数归一化。此模型的应用验证需要另外撰文单独论述。

5.3 模型适用性分析

根据本文对于模型构建方法及构建时最合理尺度层级确定方法的描述,文中方法对于地域及影像类型无特定的限制。此外,在地表异质性更大区域可充分体现本文方法在升尺度转换模型构建方面的优势。下面以沙田半岛 GEOEYE-1 多光谱影像为例验证本文方法的适用性。

2009 年 10 月 16 日获取的沙田半岛 GEOEYE-1 影像如图 10 所示,其最合理尺度层级下所构建模型如图 11 所示。

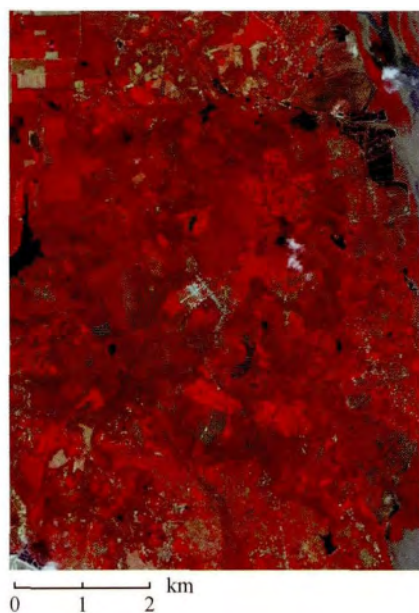


图 10 沙田半岛 GEOEYE-1 假彩色合成影像
(R: 4, G: 3, B: 2)

Fig. 10 GEOEYE-1 false color composite image
(R: 4, G: 3, B: 2) of Shatian Byland

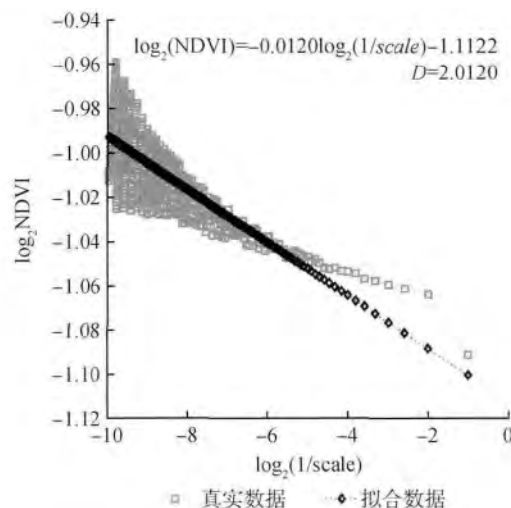


图 11 最合理尺度层级下(Level = 495)

所得 NDVI 连续尺度转换模型

Fig. 11 Establishing NDVI's CSSM on the most reasonable Level (Level = 495)

分析图 11,即认为 Level = 495(对应最大尺度为 2×495 m)时所确定的 NDVI 连续空间尺度转换模型最合理,为 $\log_2 \text{NDVI} = -0.0120 \log_2 \frac{1}{\text{Scale}} - 1.1122$ 。根据此模型,可实现其尺度适用范围内(2—900 m)研究区上任一 2 m 整数倍分辨率的遥感影像的 NDVI 真实性检验。

6 结 论

基于模型构建的五指标评价体系(r 、 p 、 rlo 、 rup 与 $Max_of_abs(Error)$),从追求模型尺度适用范围更大的角度考虑,确定出模型构建的最合理尺度层级。针对沙田半岛实验区,其模型构建的最合理尺度层级 Level = 267,说明该模型最高可对 $30 \text{ m} \times 267$ 即 8 km 分辨率遥感影像进行 NDVI 验证。进一步,根据实际应用需求的差异,通过此评价体系取值的动态变化,进行了模型构建的最合理尺度层级取值的敏感性分析。这些工作使得基于分形理论的 NDVI's CSSM 构建方法更为系统,同时对其他反演量空间升尺度转换研究具有参考意义。

参考文献(References)

- Becker F and Li Z L. 1995. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement, and related problems. Remote Sensing Reviews, 12 (3 - 4): 225 - 253 [DOI: 10. 1080/ 02757259509532286]

- Chen Y and Chen L. 2005. Fractal Geometry. 2nd ed. Beijing: Earthquake Press: 5-6, 95-98 (陈颢, 陈凌. 2005. 分形几何学. 2版. 北京: 地震出版社: 5-6, 95-98)
- Friedl M A, Davis F W, Michaelsen J and Moritz M A. 1995. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: an analysis using a scene simulation model and data from FIFE. *Remote Sensing of Environment*, 54(3): 233-246 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00156-5]
- Hilker T, Hall F G, Coops N C, Lyapustim A, Wang Y J, Nesic Z, Grant N, Black T A, Wulder M A, Kljun N, Hopkinson C and Chasmer L. 2010. Remote sensing of photosynthetic light-use efficiency across two forested biomes: Spatial scaling. *Remote Sensing of Environment*, 114(12): 2863-2874 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.004]
- Hu Z L and Islam S. 1997. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 747-755 [DOI: 10.1109/36.581996]
- Kim G and Barros A P. 2002a. Spatial characterization of soil moisture fields using passive remotely sensed soil moisture images. *Remote Sensing of Environment*, 81: 1-11 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00014-7]
- Kim G and Barros A P. 2002b. Downscaling of remotely sensed soil moisture with a modified fractal interpolation method using contraction mapping and ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, 83: 400-413 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00044-5]
- Li X W and Wan Z M. 1999. Comments on reciprocity in the BRDF modeling. *Progress in Natural Science*, 8(3): 354-358
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 1999. Scale effect of Planck's law over nonisothermal blackbody surface. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 42(6): 652-656 [DOI: 10.1007/BF02917003]
- Liang L, Schwartz M D and Fei S L. 2011. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*, 115(1): 143-157 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.08.013]
- Liang S L, Fang H L, Chen M Z, Shuey C J, Walthall C, Daughtry C, Morissette J, Schaaf C and Strahler A. 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 149-162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00092-5]
- Luan H J, Tian Q J, Yu T, Hu X L, Huang Y, Du T L, Zhao L M, Wei X, Han J, Zhang Z W and Li S P. 2013a. Modeling continuous scaling of NDVI based on fractal theory. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(7): 1857-1862 (栾海军, 田庆久, 余涛, 胡新礼, 黄彦, 杜灵通, 赵利民, 魏曦, 韩杰, 张周威, 李少鹏. 2013a. 基于分形理论的 NDVI 连续空间尺度转换模型研究. 光谱学与光谱分析, 33(7): 1857-1862)
- Luan H J, Tian Q J, Gu X F, Yu T and Hu X L. 2013b. Establishing continuous scaling of NDVI based on fractal theory and GEOYE-1 image. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 32(6): 538-544, 549 (栾海军, 田庆久, 顾行发, 余涛, 胡新礼. 2013b. 基于分形理论与 GEOYE-1 影像的 NDVI 连续空间尺度转换模型构建及应用. 红外与毫米波学报, 32(6): 538-544, 549)
- Luan H J, Tian Q J, Yu T, Hu X L, Huang Y, Liu L, Du L T and Wei X. 2013c. Review of up-scaling of quantitative remote sensing. *Advances in Earth Science*, 28(6): 657-664 (栾海军, 田庆久, 余涛, 胡新礼, 黄彦, 刘李, 杜灵通, 魏曦. 2013c. 定量遥感升尺度转换研究综述. 地球科学进展, 28(6): 657-664)
- Martonchik J V, Bruegge C J and Strahler A H. 2000. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 19(1-4): 9-20 [DOI: 10.1080/02757250009532407]
- Nagler P L, Brown T, Hultine K R, Van Riper III C, Bean D W, Dennison P E, Murray R S and Glenn E P. 2012. Regional scale impacts of *Tamarix* leaf beetles (*Diorhabda carinulata*) on the water availability of western U. S. rivers as determined by multi-scale remote sensing methods. *Remote Sensing of Environment*, 118: 227-240 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.011]
- Van Der Meer F, Bakker W, Scholte K, Skidmore A, De Jong S, Clevers J, Addink E and Epema G. 2001. Spatial scale variations in vegetation indices and above-ground biomass estimates: Implications for MERIS. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17): 3381-3396 [DOI: 10.1080/01431160152609227]
- Xu X R, Fan W J and Tao X. 2009. The spatial scaling effect of continuous canopy Leaves Area Index retrieved by remote sensing. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(3): 393-401 [DOI: 10.1007/s11430-009-0024-0]
- Zhang H, Cao C X, Li G P, Yang H, Li X W and Qin J. 2009. Downscaling LUCC based on the histo-variogram. *Science in China Series E*, 52: 1348-1353 [DOI: 10.1007/s11431-009-0074-8]
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Sun X M and Jiang X G. 2008. Spatial scaling and information fractal dimension of surface parameters used in quantitative remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18): 5145-5159 [DOI: 10.1080/01431160802036581]
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B, Chen S H and Tang X Z. 2010. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Science China Earth Sciences*, 53(5): 741-751 [DOI: 10.1007/s11430-010-0021-3]
- Zhang X, Yan G, Li Q, Li Z L, Wan H and Guo Z. 2006. Evaluating the fraction of vegetation cover based on NDVI spatial scale correction model. *International Journal of Remote Sensing*, 27(24): 5359-5372 [DOI: 10.1080/01431160600658107]
- Zhang X H. 2012. Study on spatial heterogeneity and scale effect of eucalyptus forest based on high resolution remote sensing. Nanjing: Nanjing University, 49-50 (张雪红. 2012. 基于高分辨率遥感的桉树林空间异质性与尺度效应研究. 南京: 南京大学, 49-50)

Establishing continuous spatial scaling model of NDVI on fractal theory and five-index estimation system

LUAN Haijun^{1 2 3}, TIAN Qingjiu^{1 2}, YU Tao⁴, GU Xingfa⁴,
HUANG Yan^{1 2}, HU Xinli⁴, YANG Yanjun^{1 2}

1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,
Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. College of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

4. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Spatial scale transformation is one of the basic and important scientific problems in quantitative remote sensing field. Spatial up-scaling has particularly drawn much attention, as it can effectively help solve difficult problems, e. g., validation of quantitative remote sensing products. However, some issues remain concerning spatial up-scaling research. (1) The transformation formula established by statistical methods has no explicit physical meaning and its available range is limited. (2) The lack of reasonable retrieved physical models hampers the development of up-scaling based on these models. As an important retrieval method, the up-scaling of NDVI also faces these two issues. To address these problems using statistical and physical methods, continuous spatial scaling model (CSSM) of NDVI on the basis of fractal theory was established. The CSSM exhibits a wide available scale range and partial physical meanings. However, the means of determining the most reasonable *Level* (scale hierarchies) for establishing the model remains an important problem, which is studied in this research.

In this research, a precise and rigorous method of determining the most reasonable *Level* was developed based on a five-index estimation system. The system integrates statistical estimation indices (r , p , rlo , and rup) and an availability-in-validation index [largest error in validation, $Max_of_abs(Error)$]. It was computed as follows. First, the NDVI CSSM of an image was established on each of the different *Levels*. Second, the indices (r , p , rlo , and rup) on each *Level* were compared and analyzed. Third, the most reasonable *Level* could be computed based on the defined $Max_of_abs(Error)$ to establish the widest scale CSSM.

Shatian Byland (Beihai City, Guangxi Zhuang Autonomous Region) was selected as the experimental area because of its variety of ground objects and high spatial heterogeneity. Taking the values ($r \geq 0.8$, $p < 0.05$, $rlo \geq r \leq rup$ and $Max_of_abs(Error) \leq 0.05$) as estimation system, the most reasonable *Level* ($Level = 267$) was computed. On that *Level*, the model was $\log_2 NDVI = -0.0347 \log_2 \frac{1}{scale} - 1.1296$ and its scale range was from 30 m to 8010 m. Within the range, validating the NDVI image on any up-scale (corresponding to the integral multiple of the 30 m resolution of ETM+ image) could be implemented by the model. Furthermore, the sensitivity of the *Level* to values of the estimation system was analyzed. The *Level* would dynamically change when the threshold values of the five-index estimation system were different and the application purpose changed, which meant that the method in the research was steady and rigorous.

In this research, the method of determining the most reasonable *Level* for establishing the CSSM of NDVI was developed based on a five-index [r , p , rlo , rup , and $Max_of_abs(Error)$] estimation system. This model quantitatively described the transformation relationships of NDVI on continuous scales. On the basis of this result, NDVI validation of different low-resolution images could be implemented rapidly and effectively. This work results in a more systematic research on modeling the CSSM of NDVI.

Key words: NDVI, spatial up-scaling, continuous spatial scaling model, fractal, five-index estimation system