

姚远,陈曦,钱静.定量遥感尺度转换方法研究进展[J].地理科学,2019,39(3):367-376.[Yao Yuan, Chen Xi, Qian Jing. A Review on the Methodology of Scale Issues in Quantitative Remote Sensing. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(3): 367-376.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2019.03.002

定量遥感尺度转换方法研究进展

姚远^{1,3,4}, 陈曦^{1,4}, 钱静^{1,2}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院深圳先进技术研究院,广东 深圳 518055;3. 中国科学院大学,北京 100049;

4. 中国科学院中亚生态与环境研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:首先对遥感科学和气象学、水文学、生态学、地理学等的尺度概念及其转换方法进行了区分。其次对遥感数据空间尺度转换方法的国内外研究进展情况进行了系统梳理,重点比对了目前空间尺度转换常用6种转换方法:统计转换法、分类转换法、数据融合转换方法、分形分析法、基于局域动态模型的转换方法和基于物理意义尺度转换方法及其各自所属方法的优点和缺点。再次以遥感时间尺度转换应用最为广泛的地表蒸散发和农业旱情监测等2个领域为例,对遥感时间尺度转换方法进行了总结。最后预测了今后定量遥感尺度转换研究可能的研究重点,以期今后更好地开展尺度效应和尺度转换研究工作提供参考。

关键词:定量遥感;尺度效应;尺度转换;时间尺度;空间尺度

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2019)03-0367-10

尺度问题是遥感科学、气象科学、生态学、地理学以及水文学等研究领域的核心问题之一,开展尺度研究的根本目的在于寻求复杂观测对象的最佳观测距离和适宜的空间以及时间尺度,以此揭示复杂的自然界变化规律^[1]。不同研究领域对尺度的定义各有不同^[2,3],在遥感科学的研究领域,尺度是航空和航天传感器对地观测的时间量度间隔和空间量度范围。前者指的是遥感数据采集时间的间隔,称之为时间尺度,通常由传感器的轨道高度、轨道倾角、轨道间隔等参数决定;后者可以看作遥感影像上能够区分的有效分辨率单元,即空间尺度^[4]。当前,不同时空分辨率遥感数据产品的相继使用极大丰富了遥感数据源。然而基于遥感数据所得到的目标对象信息、分析结果和揭示的规律、原理往往受不同遥感传感器与地物之间的变化关系以及遥感模型选择等因素的影响而在

不同观测尺度上呈现出明显差异,也就是所谓的“尺度效应”^[5]。李小文院士认为“尺度效应”作为遥感科学的核心问题,是当前制约海量遥感数据有效利用以及遥感应用再上新台阶的主要原因^[6]。

尺度转换是解决尺度效应问题的关键,而自然界不同尺度系统间存在的信息、能量和物质的交换与联系为尺度转换提供了理论依据。在国际上,尺度转换问题已成为定量遥感研究领域的前沿问题之一^[7]。在空间尺度上,遥感数据的尺度转换分为尺度上推和尺度下推两个方面。前者又称为升尺度转换或融合,即从小尺度向大尺度,从高空空间分辨率向低空间分辨率转换的过程;后者又称为降尺度转换或分解,是从大尺度向小尺度,从低空间分辨率向高空空间分辨率转换的过程。在时间尺度上,由于极轨卫星只能提供过境时的瞬时数据,因而如何将单一特定时间尺度下获取的遥

收稿日期:2018-03-05;**修订日期:**2018-07-18

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20060303)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划青年学者A类项目(2016-QNXZ-A-5)、国家自然科学基金项目(41761144079)、深圳国际合作研究项目(GJHZ20160229194322570)和广东省省级科技计划项目(2017A050501027)资助。[Foundation: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA20060303), Chinese Academy of Sciences “Light of West China” Program (2016-QNXZ-A-5), National Natural Science Foundation of China (41761144079), Shenzhen International S&T Cooperation Project (GJHZ20160229194322570) and Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2017A050501027).]

作者简介:姚远(1987-),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要从事干旱区资源遥感研究。E-mail: xinjiangyaoyuan@sina.com

通讯作者:钱静,副研究员。E-mail: jingqian@siat.ac.cn

感数据转换成不同时间长度的序列数据,这就需要进行时间尺度转换和拓展以满足城市、农业、生态、气候、水文等领域的应用和研究需求。

因此,认真梳理遥感尺度转换研究进展,对于未来更好地开展定量遥感研究,推动中国遥感数据处理技术在“一带一路”建设中关键领域的应用有着重要的现实意义。本文在明确尺度转换相关概念的基础上,重点从空间尺度转换和时间尺度转换2个方面,梳理归纳了当前国内外遥感尺度转换研究的最新进展,并系统阐述了各类尺度转换方法的优缺点,以期今后的定量遥感尺度转换研究提供参考。

1 尺度转换的相关概念

自Robinson在1950年发现地学研究中研究尺度的选择与研究结果有着直接相关性,即尺度依赖性问题的以来^[8],国内外学者从不同学科领域对尺度及尺度转换问题进行了研究。在气象学研究领域,全球气候模式(Global Climate Model, GCM)是当前模拟未来气候变化情景的可行方法和有效手段。大量研究结果表明^[9,10]:GCM虽然能够较好地模拟大尺度气候变化,但由于其输出结果的空间分辨率较低,因而在体现小尺度气候差异以及反映流域尺度气候精确特点等方面存在不足。此外,由于发展更高分辨率的GCM模式所需要的计算量大,且对空间分辨率的提高潜力有限,因而降尺度方法目前已成为弥补上述不足最有效的手段。目前降尺度方法主要有2种:一是借助区域气候模式的动力降尺度法。其优点在于面向覆盖区域的格点可应用不同分辨率,且不受观测资料的影响,物理意义明确。缺点在于机时费高、计算量大;GCM所提供的边界易对区域气候模式的性能造成影响;在不同区域应用气候耦合模式需要重新调整参数等。二是统计降尺度法,具体分为天气发生器、天气形势法和传递函数法等3种方法^[11]。其优点在于计算量小,易于应用于不同的GCM模式;气象要素由大尺度到区域尺度转换的计算速率快;能够输出较高分辨率的站点尺度信息;可以模拟地面气候和非气候要素场信息。缺点在于所需要的观测资料数据量大、模型缺少物理机理、能应用于大尺度和区域尺度气候要素相关明显的地区。在水文学领域的尺度是指水文模型、水文观测、水文过程的特征时间或长度,包括模拟尺度、

观测尺度和过程尺度等3个方面^[12]。水文尺度转换本质就是实现信息在不同水文尺度的转换,具体包括流域参数、状态变量、水文输入和模式的转换^[13]。在生态学研究领域,尺度问题始终是生态学研究的基础和核心问题。Wu等^[14]提出了维数、种类和组分等3个生态学尺度概念。从维数的角度出发,尺度包括组织尺度、时间尺度和空间尺度。从种类的角度出发,尺度包括模拟尺度、分析尺度、观测尺度和现象尺度。从组分的角度出发,尺度包括分辨率、比例尺、覆盖度、支撑、间隔、幅度、粒度等。张娜在综合国内外研究的基础上,将生态学尺度转换的方法归结为随机法(模型法)、基于局域动态模型的尺度转换法、基于相似性的尺度转换法和空间分析法等4种^[15]。在地理学研究领域,McCarthy提出在地理学研究中,某一个尺度上研究得出的结论并不能假设在其他尺度依然适用^[16]。Openshaw^[17]系统研究了尺度效应问题,提出了对地理学研究方法有着深远影响的“可塑性面积单元问题”。Cao和Lam^[18]针对地理空间信息技术的快速发展涉及的尺度问题,将尺度划分为:测量尺度、地理尺度、制图尺度和运行尺度。而Bierkens等^[19]在此划分基础上补充了另外两种尺度:模型尺度和决策尺度。其中,遥感科学应用领域所讨论的尺度主要是测量尺度^[20]。定量遥感尺度转换是指将遥感影像信息从一种空间或时间尺度转换到另一种空间或时间尺度的过程,在转换过程中所面临的主要问题包括^[21]:① 如何有效的实现遥感信息和数据在不同尺度间的转换;② 不同空间、时间尺度的遥感数据在尺度转换前后对相同地理现象和地物的反映会出现怎样的差异,其转换结果会出现什么样的尺度效应和信息损失;③ 如何对尺度转换结果进行有效的评价。针对上述问题,本文将分别从定量遥感空间尺度转换和时间尺度转换等方面进行细致探讨。

2 空间尺度转换研究进展

本文根据国内外已有的研究成果,系统的梳理了当前主要的空间尺度转换方法(图1),并重点阐述其中常用的统计转换法、分类转换法、数据融合转换方法、分形分析法、基于局域动态模型的转换方法和基于物理意义尺度转换方法。

2.1 统计转换法

统计转换方法主要指以遥感数据的像元亮度

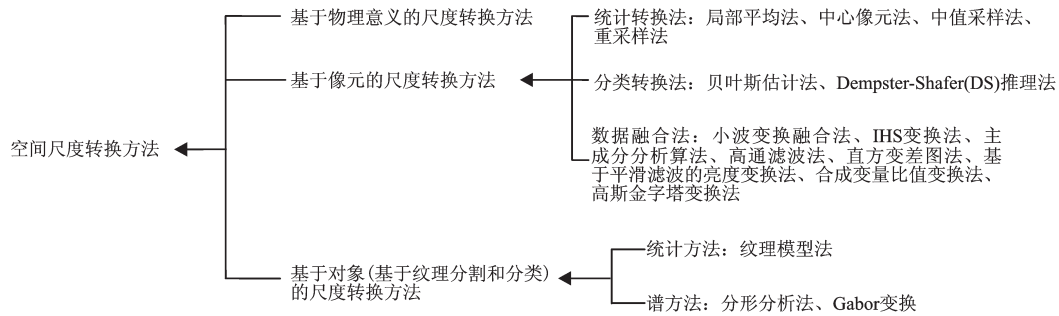


Fig.1 The mainly methodology of spatial scale transformation in quantitative remote sensing

值(Digital Number, DN)为尺度转换的基础和依据,应用数理统计回归分析,通过建立某一特征量,如归一化植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),差值植被指数(Difference Vegetation Index, DVI),归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)等光谱指数在不同分辨率遥感影像之间的函数关系,从而由高空间分辨率遥感影像上获得的参数或变量的平均值推算出低空间分辨率遥感影像的参数或变量的平均特征,以此实现不同空间分辨率遥感影像之间的尺度转换。其中,先利用遥感影像计算光谱指数,再进行空间尺度上推的方法称为“分布式”,而先基于遥感影像进行空间尺度上推,再计算光谱指数的方法称为“聚合式”^[22]。统计转换方法主要包括:局部平均法^[23]、中心像元法^[24]、中值采样法^[25]和重采样方法^[26,27](表1),其主要优点在于无需明晰遥感信息的物理机理,而是单纯从数据的角度出发用于遥感信息的尺度转换。

2.2 统计转换法

分类转换就是针对不同分辨率的遥感数据进行地表分类,在分析各自特征影像的基础上,实现不同地物类型的空间尺度转换。其主要方法包括:贝叶斯估计法和Dempster-Shafer(DS)推理法等^[21]。贝叶斯估计法的基本思路是在对不同尺度的遥感数据进行相容性分析的基础上,保留下可信度高的有用信息,剔除错误信息,利用样本信息和先验信息合成为后验分布,为求得目标数据最优的融合概率,对检测目标应用贝叶斯估计以此实现目标的识别决策^[28]。该方法的优点在于在各个尺度遥感数据呈正态分布的情况下能获得最小的分类误差,而不足之处在于无法解决遥感影像的同物异谱和同谱异物的问题。此外,贝叶斯估

计法的计算复杂度高、对细节信息保持能力较差^[29]。DS推理法则是在20世纪70年代初由Dempster和Shafer师生二人共同在贝叶斯理论的基础上提出的,被称作是广义的贝叶斯估计法^[30]。二者之间的区别在于前者对未知特征不赋予先验概率,而后者则相反。DS推理法通过构造无知函数、确认函数和概率函数将数理统计中的发生时间变为命题,同时赋予每个命题一个信任度以此代替先验概率,而基本概率分布函数则是通过提取不同尺度数据的特征参数来构造。该方法的应用领域从早期的人工智能逐步发展到遥感图像分类及尺度转换^[31],其优势在于可以避免错误的数据分布假设,弥补传统方法要求数据必须服从正态分布的不足,还可以根据实际掌握的知识程度,清晰的表达数据融合过程中的不确定性。不足之处在于缺乏完善的数学基础做支撑,证据理论的使用范围受到组合规则要求的证据独立性条件的限制,证据本身存在的矛盾也会被组合规则的正规化过程所掩盖^[21]。

2.3 数据融合转换方法

随着遥感卫星数据产品的增多,不同空间尺度遥感数据之间的融合转换已成为遥感领域的关键技术。其实质在于:通过一定的算法,将低空间分辨率遥感影像融入到高空间分辨率遥感影像中,实现数据互补并消除数据冗余,以此提高影像的空间分辨率并达到尺度转换的目的^[32]。当前应用较多的方法主要有小波变换融合法、IHS变换法、主成分分析算法、高通滤波法等。

小波变换融合法(Wavelet Decomposition, WD)的基本思路是将待融合的遥感影像通过小波变换分解成多级小波系数图像,同时将图像的频率信息分为体现光谱信息和结构特征的低频部

表1 基于统计的遥感尺度转换方法

Table 1 Scale transformation method in remote sensing based on statistics

方法名称	定义	优点	缺点
(1)局部平均法 ^[23]	将高分辨率遥感影像中一定大小窗口内的像元合并,以其平均值作为合并后像元的值,通过计算所有窗口来获取转换后的较低分辨率影像	够较好地保持影像均值信息,且运算简单	易丢失部分细节信息
(2)中心像元法 ^[24]	将高分辨率遥感影像中一定大小窗口内中心像元的值作为新像元的值,通过计算所有窗口来获取转换后的较低分辨率影像	方法简单易行,能够在一定程度上保持原影像的纹理特征	转换后的图像质量较差,且在窗口较大的情况下接近于随机图像
(3)中值采样法 ^[25]	将高分辨率遥感影像中一定大小窗口内所有像元值的中位数值作为新像元的值,通过计算所有窗口来获取转换后的较低分辨率影像	该方法运算量小,能够较好地保持原图像的均值	尺度转换过程中信息损失量大,像元值不连续的问题
(4)重采样法 ^[26]	将高分辨率遥感影像中一定大小窗口内离采样点最近的像元值赋予转换后低分辨率影像所对应的像元值	算法简单、易实现	没有考虑除最近像元点以外的其它点,因而图像质量易受损失,像元不连续,且转换后的图像人为加工痕迹较明显
① 最近邻法			
② 双线性内插法	将高分辨率遥感影像中2个正交方向上的像元值,按照先水平方向后垂直方向的顺序进行一阶线性插值,通过加权平均作为转换后较低分辨率影像中对应点的新像元值。	能够克服最近邻法的不足,避免转换后图像像元的不连续	运算量较大,转换精度不高、图像边缘信息易丢失
③ 无重叠平均法	将高分辨率遥感影像中无重叠方形窗口内的像元平均值赋予转换后低分辨率影像所对应的像元值	Hay等 ^[27] 认为该方法的转换效果较好,而最近邻法、双线性内插法和立方卷积内插法在转换尺度超过5个像元时,不适用于遥感影像的尺度上推,转换可信度低	当影像中涉及大量复杂地物时,尺度转换精度不高
④ 立方卷积内插法	与双线性内插法原理相似,将高分辨率影像中的某像元周边的4个像元值改为16个进行加权平均,通过转换得到较低分辨率影像中对应点的新像元值	计算精度较高,考虑了相邻像元间的灰度值和其间的变化率,影像的边缘信息和纹理得到较好地保留	计算量大

分,以及体现空间信息和细节特征的高频部分,然后将每一级图像的高频部分和低频部分进行融合处理,再综合各级图像的融合结果进行重建从而得到转换后的图像^[33]。该方法的优点是既可以保持图像的光谱特征,又能保留高分辨率影像的信息。不足之处在于:高分辨率影像的低频部分直接被低分辨率影像的低频部分替换,易损失高分辨率影像的细节信息,并产生明显的分块效应^[34]。随着近年来小波理论不断发展,基于小波变换方法的新算法不断涌现^[35,36]。IHS变换法是将低分辨率的多光谱遥感影像经变换得到亮度(Intensity, I)、色调(Hue, H)和饱和度(Saturation, S)3个分量,然后保持H和S两个分量不变,将高分辨率的全色影像代替I分量,通过IHS空间逆变换得到新的高空间分辨率图像。该方法的优点在于既增强

了影像的空间细节表现力,又保留了影像的光谱特征,同时还提高了影像的地物纹理特征,且操作简单,适用于不同分辨率影像的尺度转换。缺点在于转换易造成光谱信息失真,且处理的多光谱影像波段数必须为3^[37]。

主成分分析算法(Principal Component Analysis, PCA)的提出就是由于遥感影像各个波段之间有很高的相关性,而其中相当一部分有用信息是重复和多余的。因此,PCA算法的目的就是尽可能的去除转换前低分辨率影像的冗余信息,通过特征提取和数据压缩,用变换后的高分辨率影像作为第一主分量,再经过主成分逆变换得到转换后的影像。PCA算法的优点在于对于尺度不同,但成像机理相同的影像融合效果较好^[38]。缺点是对成像机理不同的影像,在转换过程中会丢失

大量光谱信息,从而导致转换后图像的光谱畸变严重^[39]。

高通滤波法(High Pass Filtering, HPF)是一种将高频信息从高分辨率影像叠加到低分辨率影像的方法。按照叠加方式的不同又分为加权和不加权两种方法^[40]。不加权方法是采用空间高通滤波器对高分辨率影像进行滤波,直接将高频信息进行叠加,以此获得空间分辨率增强的影像。其优点在于通过信息叠加,实现不同尺度影像的有效转换和融合,同时还具有一定的去噪功能;加权方法又称为高频调制融合法,主要通过空间配准,将不同分辨率影像进行相乘后得到的高分影像进行滤波处理、归一化处理后,将高频信息叠加到低分辨率影像上。该方法的优点在于可以有效保留影像的光谱信息,且对转换影像没有波段限制。总体上,滤波器的选择和构建是转换效果的关键。

2.4 分形分析法

分形理论是基于数学方法提出的一种非线性科学方法,并与孤波、混沌一起被称为非线性科学研究的前沿,在遥感尺度转换和改进影像空间方面具有很大的潜力。Xia和Clarke^[41]基于分形方法开展了地形模拟研究,认为分形理论及其方法是当前遥感影像尺度转换的先进方法。徐希孺^[42]认为以分形分析法为代表的数学方法是当前促进定量遥感理论体系建立,解决定量遥感问题的有效手段。其中,分维数是分形是反映特征空间分布变化、复杂程度和趋势的一个重要指标^[43]。这是由

于在遥感的研究对象——自然界中,许多现象和物体都具有统计自相关性,其结构特征只是会随着研究对象空间尺度变化而缩小或放大,整体为局部的无穷嵌套。遥感影像的分维数等于地面空间三维表面体在二维表面投影,也就是二维影像的灰度表面的分维法向向量,因而可以有效反映地面真实表面的分形特征。大量研究表明,遥感影像的分形分析能定量表达图像的信息量和空间复杂性。一方面,遥感影像能够真实记录地球表面的地物信息,而地球表面易形成形态多变且粗糙不平的复杂景观,这既是受随机因素的影响,也是分形表现的例证。另一方面,具有分形特征的表面与遥感接收的电磁波信息相互作用后的回波信号也具有部分反射面的分形特征。因此,不同尺度遥感影像能够根据分形的测量来进行比较和评价,从而实现遥感信息的尺度转换。

2.5 基于局域动态模型的转换方法

张娜从生态学的角度,总结了局域动态模型在生态学领域尺度转换的应用^[44]。局域动态模型在遥感领域的应用主要通过选择基于该模型的尺度转换方法,并通过遥感影像反演的生态学变量进行尺度转换。在转换过程中,由于形成机制或主导过程的变化,因而易造成小尺度过程模型的实效,这就需要修正局域模型,或建立大尺度过程模型。当前常用的基于局域动态模型的转换方法包括:简单聚合法、显示积分法、期望外推法和直接外推法等^[45](表2)。

表2 基于局域动态模型的尺度转换方法

Table 2 Scale transformation method based on local dynamic model in remote sensing

方法名称	定义	优点	缺点
简单聚合法	通过同时增加不同遥感影像的空间分辨率,将较高分辨率影像的参数或变量的平均值转换为较低分辨率影像	方法简单,容易实现	忽略了变量或参数在遥感影像尺度变化时发生的非线性变化,误差较大
显示积分法	要求高分辨率影像模型在空间上能够积分,是空间显示的数学函数,通过显示积分进行尺度转换,已连续函数表示空间异质性	计算复杂度较期望外推法和直接外推法有所降低,且在理论上是一种有效和精确的方法	以连续函数形式表达空间异质性的难度较大,方法尚待进一步完善,因而限制了该方法的推广应用
期望外推法	通过高分辨率影像模型按照地物类别的不同进行模拟,并根据结果计算较低空间分辨率影像的空间结构特征期望值与影像面积相乘,以此实现尺度转换	是当前较为通用的一种方法。通过蒙特卡罗模拟法估算得出的期望值,经得起不确定性分析	转换结果的准确性易受类别现象描述的准确性或空间变异性的影响
直接外推法	将局部分析模型从高分辨率影像应用到适合该模型的所有区域,通过计算不同地物的像素输出综合,实现尺度转换	计算方法简单直接,概念明晰,应用推广度最好	尺度转换的准确性易受到影像尺度转换过程中的误差积累影响

2.6 基于物理意义的尺度转换方法

李小文等认为不同尺度之间存在“尺不变”的关系,即观测对象的过程和格局不会随着遥感数据尺度变化而变化,反之则称之为具有“尺度依赖性”^[46]。一些学者基于物理、生物机理的融合影像因子尺度校正的“尺不变”模型。代表性研究如:Li 和 Wan^[47], Albert 等^[48], Becker 和 Li^[49]探讨了Helmholtz互易原理、Beer定律、Planck定律等物理学定律和原理在遥感像元尺度上的适用性。针对类似研究,栾海军等^[50]做过较为详细的综述,这里就不再赘述。

3 时间尺度转换研究

时间尺度一般指年、月、旬、日、小时、瞬时等。基于遥感影像获取的地表下垫面信息为卫星过境时刻的瞬时值,在时间上是不连续的,因而难以满足不同研究对象对于特定时间尺度的需要,亟待将遥感反演得到的瞬时值进行时间尺度扩展。当前,地表蒸散发和农业旱情监测是当前遥感影像时间尺度转换应用最为广泛的2个主要研究领域,本研究重点从上述2个领域对时间尺度扩展方法进行总结。

3.1 地表遥感蒸散发时间尺度转换方法

蒸散发(Evapotranspiration, ET)作为陆面过程

研究的关键参数和地面能量与水量平衡的重要组成部分,对于深入开展全球气候变化、水循环及水文过程、生态环境变化等相关研究工作具有重要的现实意义^[51]。遥感技术因其能克服单点观测方法的不足,目前已成为模拟区域尺度地表ET最为主要的途径。基于遥感影像所获得的ET资料,为不同区域尺度范围卫星过境的瞬时数据,因而亟待将遥感数据进行时间尺度扩展,将瞬时尺度的数据转换为更有实际应用价值的日、旬、月、年等长时间序列数据,以满足ET研究的需要^[52]。目前常见的的时间尺度扩展方法主要有蒸发比法^[53, 54]、作物系数法^[55, 56]、冠层阻力法^[57, 58]和正弦关系法^[59](表3)。

如表3所示,地表遥感蒸散发时间尺度转换方法存在的问题主要包括以下2个方面:一是时间尺度转换的不确定性较大。突出表现在遥感观测信息受地表状态、气象条件、辐射状况以及遥感传感器本身等因素的制约,难以实现区域ET的精准观测^[60]。二是不同时间尺度转换方法其本身具有一定的不确定性,适用性差异较大。主要表现为不同方法对区域下垫面类型、气候条件的要求各异,方法本身的不确定性较大,相同方法在不同气候和下垫面条件下的模拟结果具有较大差异^[61]。

3.2 农业旱情监测信息时间尺度转换方法

农业旱情的发生、作物水分的亏缺是一个时

表3 常见的地表遥感蒸散发时间尺度转换方法对比
Table 3 Temporal transformation method for surface heat and water fluxes in remote sensing

方法名称	定义	优点	缺点
蒸发比法 ^[53, 54]	在云量保持恒定或晴朗的白天,由于正午瞬时蒸发比近似日均蒸发比,以此建立基于蒸发比的尺度转换模型,实现区域ET的估算	方法简易,且较为常用	在实际应用中误差较大,需要进一步改进,并校正偏差,提高精度
作物系数法 ^[55, 56]	由于实际ET与作物ET比值(作物系数)在日内变化较小,因而主要由联合国粮农组织提供的基于作物系数的时间尺度扩展方法,将遥感影像所获取的瞬时作物系数代替日作物系数,实现由瞬时ET到日的时间尺度扩展	在地表植被均匀的情况下,所得到的结果精度较高	在作物生育中后期,该方法所确定的作物系数与实测值有较大误差,必须进行参数调校,才能提高精度
冠层阻力法 ^[57, 58]	以蒸散发估算最为有效,应用最为广泛的Penman-Monteith模型为基础,采用遥感瞬时数据估算模型中的下垫面、通量数据等相关参数,进而推导出卫星过境时刻的冠层阻力。据此,估算不同时间尺度区域ET值	大量研究结果表明,该方法可以有效实现大区域尺度、长时间序列ET数据的扩展	易受遥感数据及模型局限性的限制,估算结果的变异性较大
正弦关系法 ^[59]	太阳辐射在日尺度范围内呈现周期性变化。在晴朗的天气条件下,卫星过境时获取的瞬时辐射与日内辐射间存在正弦曲线关系,其比值可用于瞬时ET与日ET比值的替换,以此实现ET的时间尺度扩展	简单易用,便于理解,在天气晴朗的条件下,具有较好的可行性,结果精度较高	扩展后的日ET数值易受复杂天气和地面条件的影响,与实测数值日ET数值相比有所偏离

间累积的过程,由于不同作物的生育期不同,不同生育期发生旱情对作物的产量影响亦不相同。因而亟待将遥感数据所获取的瞬时尺度旱情信息进行时间尺度转换,获取不同农作物关键生育时期的农业旱情监测信息,提高旱情评估精度。陈素华等^[61]将作物受灾敏感值进行时间尺度转换,以此确定了内蒙古作物春播期、生长期、生育期和成熟期等4个关键时期旱情对作物减产量之间的关系,并建立了区域粮食产量旱情损失量评估模型,有效开展了内蒙古赤峰市粮食产量评估。Bayarjargal等^[62]运用最大值合成法将月尺度遥感数据转换为植物生长季(4~9月)的农业旱情监测产品以监测农业旱情的时空变化。Tian等^[63]基于MODIS数据构建了旬尺度条件植被温度指数(Vegetation Temperature Condition Index)用于中国关中平原冬小麦旱情监测。王蕾等^[64]在此基础上提出对基于遥感数据获取的不同生育期旱情监测信息进行时间尺度转换的关键在于确定不同时期旱情的发生对农作物产量影响的权重系数。目前,常见的赋权方法主要包括以下3种:一是以层次分析法、专家调查法、因子权重排序法、特征值法为代表的主观赋权法。其优点在于解释性较强,缺点在于主观性和随意性较大^[65]。二是以熵值法、变异系数法、主成分分析法、灰色关联法为代表的客观赋权法。其优点在于有较好的数据基础,不受人为因素的影响,缺点在于完全忽略了决策者的经验知识,容易导致赋权结果与实际情况出入较大^[64]。三是综合主客观赋权方法的组合赋权法。其优势在于能够将数学方法和专家决策相结合,有效规避主、客观赋权法的不足,提高应用精度^[66]。白雪娇等^[67]在此基础上,尝试分别利用遗传算法、穷举法以及熵值法与因子权重排序法相结合的归一组合赋权法开展了关中平原冬小麦关键生育时期的遥感旱情监测指数的时间尺度扩展研究。研究结果表明,利用遗传算法获取的加权农业旱情监测指数所估测的区域单产精度较高,是该区域多时相遥感监测数据时间尺度转换的最佳方法。

4 展望

本研究在厘清气象、水文、生态、地理等不同学科所涉及的尺度转换概念及方法的基础上,系统总结了当前遥感科学在空间尺度和时间尺度上的主要转换方法,重点比较分析了以统计转换法、

分类转换法、数据融合转换方法、分形分析法、基于局域动态模型的转换方法和基于物理意义尺度转换方法等6种方法为代表的空间尺度转换方法,以及地表遥感蒸散发和农业旱情监测领域所涉及的时间尺度转换方法所包含的每种方法的优势与不足。研究结果表明,目前国内外在尺度效应和尺度转换研究方面所取得的成果较30 a前尺度问题刚提出时已取得较大突破,但在实际应用过程中还存在很大的发展提升空间。例如,应进一步加强地面遥感观测实验,以此获取不同时空尺度遥感数据与地面观测数据从而支持尺度转换研究。李新等^[68]为此详细论述了在中国2012年启动的黑河生态水文遥感实验中关于进一步推进尺度转换问题研究所做的尝试以及在发展普适性尺度转换方法等方面取得的进展。此外,如何参考李小龙院士^[6]所提出的“自下而上归纳方法和自上而下的演绎方法”的思路,建立统一、严谨的定量遥感尺度转换理论,融合多学科交叉知识,推进尺度研究进一步向深层次迈进,始终是未来需要进一步研究的方向。最后,从最新国内外研究进展来看,进一步挖掘基于数学方法提出的分形理论在遥感尺度转换方面所具有的潜力,提高分形理论及其方法在尺度转换中的应用,从而构建具有较强普适性的遥感时空尺度转换方法亦是今后研究的热点方向之一。

参考文献(References):

- [1] 胡云峰,徐芝英,刘越,等.地理空间数据的尺度转换[J].地球科学进展,2013,28(3):294-304. [Hu Yunfeng, Xu Zhiying, Liu Yue et al. A review of the scaling issues of geospatial data. *Advances in Earth Science*, 2013,28(3):294-304.]
- [2] Stoter J, Visser T, Van Oosterom P et al. A semantic-rich multi-scale information model for topography[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(5): 739-763.
- [3] Abdulle A, Weinan E, Engquist B et al. The heterogeneous multiscale method[J]. *Acta Numerica*, 2012, 21:1-87.
- [4] 明冬萍,王群,杨建宇.遥感影像空间尺度特征与最佳空间分辨率选择[J].遥感学报,2008,12(4):529-537. [Ming Dongping, Wang Qun, Yang Jianyu. Spatial scale of remote sensing image and selection of optimal spatial resolution. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4):529-537.]
- [5] Estes J E, Jensen J R, Simonett D S. Impacts of remote sensing on U.S. geography[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 10: 43-80.
- [6] 李小龙,王祎婷.定量遥感尺度效应刍议[J].遥感学报,2013,

- 68(9):1163-1169. [Li Xiaowen, Wang Yiting. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 68(9):1163-1169.]
- [7] Silvestri S, Marani M, Settle J et al. Salt marsh vegetation radiometry: Data analysis and scaling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3):473-482.
- [8] Robinson W S. Ecological correlations and the behavior of individuals[J]. *American Sociological Review*, 1950, 15(3):351-357.
- [9] Boville B A. Sensitivity of simulated climate to model resolution[J]. *Journal of Climate*, 1991, 4:469-485.
- [10] Boyle J S. Sensitivity of dynamical quantities to horizontal resolution for a climate simulation using the ECMWF(Cycle33) Model[J]. *Journal of Climate*, 1993, 6:796-815.
- [11] Kioutsioukis I, Melas D, Zanis P. Statistical downscaling of daily precipitation over Greece[J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(5):679-691.
- [12] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review[J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3-4):251-290.
- [13] 钟晔, 金昌杰, 裴铁璠. 水文尺度转换探讨[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8):1537-1540. [Zhong Ye, Jin Changjie, Pei Tiefan. Discussion on hydrological scaling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8):1537-1540.]
- [14] Wu J G, Jones K B, Li H et al. Scaling and uncertainty analysis in ecology[M]. Dordrecht: Springer, 2006.
- [15] 张娜. 生态学中的尺度问题[J]. *生态学报*, 2007, 27(10):4252-4266. [Zhang Na. Scale issues in ecology: Upscaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10):4252-4266.]
- [16] McCarthy Albert J P. The Irish national electrification scheme [J]. *Geographical Review*, 1957, 47(4):539-554.
- [17] Openshaw S. Ecological fallacies and the analysis of the areal census data[J]. *Environment and Planning A*, 1984, 16(1):17-31.
- [18] Cao C Y, Lam N. Understanding the scale and resolution effects in remote sensing and GIS[M]. New York: Lewis Publishers, 1997.
- [19] Bierkens M F P, Finke P A, De Willigen P. Upscaling and downscaling methods for environmental research[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [20] Woodcock C E, Strahler A H. The factor of scale in remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(3):311-332.
- [21] 彭晓鹃, 邓儒儒, 刘小平. 遥感尺度转换研究进展[J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(5):6-14. [Peng Xiaojuan, Deng Ruru, Liu Xiaoping. A review of transformation in remote sensing. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(5):6-14.
- [22] Quattrochi D A, Goodchild M F. Scale in remote sensing and GIS[M]. New York: Lewis Publishers, 1997:100-118.
- [23] 周觅, 张杰林. 遥感影像尺度转换及最优尺度选择探讨[J]. *世界核地质科学*, 2011, 28(2):94-98. [Zhou Mi, Zhang Jieli. Review on scale transformation for remote sensing image and selection of optimal spatial resolution. *World Nuclear Geoscience*, 2011, 28(2):94-98.]
- [24] 秦承志, 呼雪梅. 栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J]. *地理研究*, 2014, 33(2):270-283. [Qin Chengzhi, Hu Xuemei. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis. *Geographical Research*, 2014, 33(2):270-283.]
- [25] Bian L, Butler R. Comparing effects of aggregation methods on statistical and spatial properties of simulated spatial data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, 65(1):73-84.
- [26] Liang S L. Quantitative remote sensing of land surfaces[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.
- [27] Hay G J, Niemann K O, Goodenough D G. Spatial thresholds, image-objects, and upscaling: A multiscale evaluation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(1):1-19.
- [28] Jin Z, Tian Q, Chen J M et al. Spatial scaling between leaf area index maps of different resolutions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3):628-637.
- [29] 梁顺林, 李小文, 王锦地, 等. 定量遥感: 理念与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [Liang Shunlin, Li Xiaowen, Wang Jindi et al. Quantitative remote sensing: Idea and algorithm. Beijing: Science Press, 2013.]
- [30] Brice M, Michael A. An approach using Dempster-Shafer Theory to fuse spatial data and satellite image derived crown metrics for estimation of forest stand leading species[J]. *Information Fusion*, 2012, 12(4):122-134.
- [31] Al-Ani A, Deriche M. A new technique for combining multiple classifiers using the Dempster-Shafer Theory of evidence[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002, 17:333-361.
- [32] Zhang Y, Hong G. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural color IKONOS and QuickBird images[J]. *Information Fusion*, 2005, 6(3):225-234.
- [33] Da Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10):3089-3101.
- [34] 卢炎. 多源遥感影像融合方法研究[J]. *吉林大学学报*, 2007, 37: 176-179. [Lu Yan. The research on multi-source remote sensing images fusion technology. *Journal of Jilin University*, 2007, 37: 176-179.]
- [35] Arivazhagan S, Ganesan L, Kumar T G S. A modified statistical approach for image fusion using wavelet transform[J]. *Signal Image and Video Processing*, 2009, 3(2):137-144.
- [36] Amolins K, Zhang Y, Dare P. Wavelet based image fusion techniques-An introduction, review and comparison[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4):249-263.
- [37] Pohl C, Genderen J L V. Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5):823-854.
- [38] 高永刚. 多尺度多平台遥感影像在城市遥感中的应用研究[D]. 福州:福州大学, 2013. [Gao Yonggang. Study on the application of multi-source and multi-scale images in the urban re-

- mote sensing. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.]
- [39] 庞振平. 遥感影像融合技术理论与方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008. [Pang Zhenping. Research on the theory and method of remote sensing image fusion. Changchun: Jilin University, 2008.]
- [40] 刘宇琼. 基于像素级多源遥感影像融合技术的研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. [Liu Yuqiong. Study on pixel-level multi-source remote sensing data fusion technique. Xi'an: Chang'an University, 2007.]
- [41] Xia Z G, Clarke K C. Approaches to scaling of geo-spatial data [M]. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1997.
- [42] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005. [Xu Xiru. Physical principles of remote sensing. Beijing: Peking University Press, 2005.]
- [43] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. [Xu Jianhua. Mathematical methods in contemporary geography. Beijing: Higher Education Press, 2002.]
- [44] 张娜. 生态学中的尺度问题[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4252-4266. [Zhang Na. Scale issues in ecology: Upscaling. Acta Ecology Sinica, 2007, 27(10):4252-4266.]
- [45] Turner M G, Gardner R H. Quantitative methods in landscape ecology, ecological studies[M]. New York: Springer, 1991.
- [46] Li X W, Wang J D, Alan S. Scale effects and scaling-up by geo-metric-optical model[J]. Science in China (Series E), 2000, 43(Suppl.):17-22.
- [47] Li X W, Wan Z M. Comments on reciprocity in the BRDF Modeling[J]. Progress in Natural Science, 1999, 8(3):354-358.
- [48] Albert B J, Strahler A H, Li X W et al. Radiometric measurements of gap probability in conifer tree canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34:179-192.
- [49] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement, and related problems[J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 12:225-253.
- [50] 栾海军, 田庆久, 余涛, 等. 定量遥感升尺度转换研究综述[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6):657-664. [Luan Haijun, Tian Qingjiu, Yu Tao et al. Review of up-scaling of quantitative remote sensing. Advances in Earth Science, 2013, 28(6):657-664.]
- [51] Long D, Singh V P, Li Z L. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116:D21107.
- [52] Kalma J D, Mcvicar T R, McCabe M F. Estimating Land Surface Evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data[J]. Surveys in Geophysics, 2008, 29 (5):421-469.
- [53] Gentile P, Entekhabi D, Chehbouni A et al. Analysis of evaporative fraction diurnal behaviour[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1):13-29.
- [54] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1):85-99.
- [55] Allen R G, Smith M, Wright J L et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1):2-13.
- [56] Wright J L, Allen R G, Tasumi M et al. Satellite-based energy balance to assess within population variance of crop coefficient curves[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1):94-109.
- [57] Liu G, Liu Y, Xu D. Comparison of evapotranspiration temporal scaling methods based on lysimeter measurements[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2):270-280.
- [58] Colaizzi P D, Evett S R, Howell T A et al. Comparison of five models to scale daily evapotranspiration from one time of day measurements[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(5): 1409-1417.
- [59] Jackson R D, Hatfield J L, Reginato R J et al. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements[J]. Agricultural Water Management, 1983, 7(1/3):351-362.
- [60] 刘素华, 田静, 米素娟. 遥感估算蒸散发量的日尺度扩展方法综述[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4):10-17. [Liu Suhua, Tian Jing, Mi Sujuan. Review of methods on estimation of daily evapotranspiration from one time of day remotely sensed transient evapotranspiration. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(4):10-17.]
- [61] 陈素华. 干旱对内蒙古粮食产量的影响及其评估方法的建立[J]. 华北农学报, 2004, 19(S1):81-85. [Chen Suhua. Effect on the grain yield for the drought and establish the model in Inner Mongolia. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2004, 19(S1): 81-85.]
- [62] Bayarjargal Y, Karnieli A, Bayasgalan M et al. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105 (1):9-22.
- [63] Tian M, Wang P, Khan J. Drought forecasting with vegetation temperature condition index using ARIMA Models in the Guanzhong Plain[J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 690.
- [64] 王蕾. 基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育期干旱影响评估研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [Wang Lei. Estimation of drought impact on the main growth stage of winter wheat based on vegetation temperature condition index. Beijing: China Agricultural University, 2015.]
- [65] Xu Z S. On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(3):683-687.
- [66] 白雪娇. 条件植被温度指数的时空尺度上推方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [Bai Xuejiao. Temporal and spatial up-scaling methods for vegetation temperature condition index. Beijing: China Agricultural University, 2017.]
- [67] 白雪娇, 王鹏新, 张树誉, 等. 基于遗传算法的条件植被温度指数的时间尺度转换方法[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 190-196. [Bai Xuejiao, Wang Pengxin, Zhang Shuyu et al. Time-scale transform of multi-temporal vegetation temperature

condition index based on the genetic algorithm. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 190-196.]

[68] 李新, 晋锐, 刘绍民, 等. 黑河遥感实验中尺度上推研究的进

展与前瞻[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):921-932. [Li Xin, Jin Rui, Liu Shaomin et al. Upscaling research in Hiwater: Progress and prospects. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):921-932.]

A Review on the Methodology of Scale Issues in Quantitative Remote Sensing

Yao Yuan^{1,3,4}, Chen Xi^{1,4}, Qian Jing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, Beijing, China; 4. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The advance of remote sensing technology provides an effective way for disaster prediction, environmental monitoring, resource surveys. Remote sensing technology has become a effective tools to get geo-information comprehensively, accurately, and quickly. Undoubtedly, remote sensing technology in the 21th century has entered an era of quantitative analysis. Thus, the scale issues have always attracted increasing the attention in quantitative remote sensing owing to scale effects limite the accuracy of retrieval the development of its applications. It is a significant problem in remote sensing research, and the methods of scale transformation have been proved is useful to resolve this problem. In ordert to study the scale issues of remote sensing, the advances in methodology of scale issues in quantitative remote sensing must be discussed. Firstly, as we know, the concept of scale is now suffering from a discrepancy in different research area, such as remote sensing, meteorology, hydrology, ecology and geography. Therefore, the definition of scale and relevant methodology in above mentioned research area are introduced in the first of this paper. Secondly, in reviewing the scale issues in remote sensing, the approaches for spatial and temporal scale transformation are reviewed. We summarize the advanges and disadvantages of the mainly spatial scale transformation methods, such as statistical transformation method, classification transformation method, data fusion transformation method, fractal analysis method, local dynamic model based scaling approach and scale transformation method based on physical meaning. Thirdly, the application of measured vapotranspiration and agricultural drought are restricted by remotely sensed data owing to the direct result are instantaneous value estimated at the passing time of satellite. Consequently, different time scales values have practiacal significance. We have summarized many remote sensing data time scale extrapolation methods. The results obtained show that each method has its own advantages and disadvantages. Finally, the future research directions were equally proposed in order to provide a reference for future researchers interested in quantitative remote sensing.

Key words: quantitative remote sensing; scale effect; scale transformation; spatial scale; temporal scale