

构造地理要素趋势面的尺度转换普适性方法探讨

王祎婷^{1,2}, 谢东辉¹, 李小文¹

1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 国家海洋信息中心, 天津 300171

摘要: 当前的遥感科学面临着遥感数据获取能力与数据应用能力之间突出的供需矛盾。尺度问题作为遥感科学中的关键问题, 既限制了遥感作为一门科学向系统性、普适性的发展, 又限制了遥感应用能力的发展。本文对定量遥感中的尺度问题进行了梳理, 包括: 遥感与传统站点观测之间的不一致、不同尺度遥感产品之间的一致、机理模型的尺度适用问题, 以及遥感产品与用户需求时空尺度间的不一致。对遥感中的尺度转换方法展开了讨论, 总结了尺度转换的关键问题在于原数据信息量不足时引入额外信息和保留关键信息两方面。提出了构造地理要素趋势面的基本构想, 搭建了一个具有普适性的尺度转换方法框架。核心内容是充分利用地表环境要素时间、空间上的信息作为先验知识, 通过关联遥感观测新信息和先验趋势面生成指定时空尺度的地表要素产品。

关键词: 尺度效应, 尺度转换, 趋势面, 先验知识, 定量遥感

中图分类号: TP79 文献标志码: A

引用格式: 王祎婷, 谢东辉, 李小文. 2014. 构造地理要素趋势面的尺度转换普适性方法探讨. 遥感学报, 18(6): 1139-1146

Wang Y T, Xie D H and Li X W. 2014. Universal scaling methodology in remote sensing science by constructing geographic trend surface. Journal of Remote Sensing, 18(6): 1139-1146 [DOI: 10.11834/jrs.20144108]

1 引言

遥感观测获取的大量数据是国家基础性、战略性的空间信息资源, 在国家全球战略、经济可持续发展、国家安全保障等国民经济关键领域急需遥感数据支撑。一系列重大全球环境问题上中国的话语权也急需数据支撑。然而, 当前的遥感科学面临着遥感数据获取能力与数据应用能力之间突出的供需矛盾。一方面, 截至到2012年底全球在轨运行的遥感卫星数量已达近百颗, 遥感已进入海量数据时代; 另一方面, 遥感数据的自动化、量化处理乃至对遥感数据信息的理解能力与有效利用还远远不足。李小文和王祎婷(2013)总结了当前定量遥感在面向国家需求和全球问题研究上存在的几个突出问题, 将遥感科学中的尺度问题归结为导致海量数据无法有效利用、定量遥感研究和应用难以再上新台阶的根本原因之一。

遥感的优势在于频繁和持久地提供地表时空

多变要素的面状信息, 这对传统的以稀疏离散点为基础的观测手段是一场革命性的变化。遥感观测多时空分辨率并存的特点, 使得由遥感出发的地学描述必然存在多尺度的问题。一方面, 地球表面作为一个具有复杂性的巨系统, 在某一尺度上观测到的性质、总结的原理或规律, 在另一尺度上可能有效、可能相似, 也可能需要修正。遥感观测如何与地球系统过程和现象的特征尺度相匹配, 是遥感地学应用的关键问题之一。另一方面, 尺度问题是遥感科学自身的独特问题。由于地表的空间异质性, 遥感要求对在像元尺度上定义的概念和推导出的定律、定理的适用性进行检验和纠正, 要求对从“点”到“面”多尺度的遥感信息进行尺度转换和一致性检验。

尺度问题自提出后至今已有三十余年, 已经得到了研究者的广泛关注。国外的尺度效应研究还停留在对同一量随空间尺度线性或非线性变化的分析上。国内的研究者通过几何光学模型阐明了

收稿日期: 2014-04-24; 修订日期: 2014-07-16; 优先数字出版日期: 2014-07-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(编号: 2013CB733402)

第一作者简介: 王祎婷(1986—)女, 博士研究生, 主要研究方向为定量遥感尺度问题。E-mail: wangyiting01@gmail.com

通信作者简介: 谢东辉(1976—)女, 博士, 主要研究方向为定量遥感。E-mail: xiedonghui@bnu.edu.cn

不同尺度上量的内涵、变化和性质(Li等,1999a; 1999b; 2000)。但总体上,尺度问题这一遥感科学中的关键问题,其理论和实践挑战依然艰巨,既限制了遥感作为一门科学自身向系统性、普适性的发展,又限制了遥感应用能力的发展。

遥感能够提供由“点”尺度到全球尺度间多级差的观测信息,遥感各应用行业又有其对遥感数据时空尺度和跨度的独特需求。因此,遥感的科学任务可归结为传感器观测时空尺度和各行业业务系统时空尺度间的理解和转换。简而言之,只有发展从传统站点观测到多尺度遥感像元间自洽的尺度转换方法,才有望解决遥感产品真实性检验、不同尺度遥感产品的一致性问题,并在多尺度自洽的遥感产品中提供满足用户要求的最佳尺度产品。本文尝试在解决遥感尺度转换问题方面先搭建一个普适性方法框架,与读者共享。

2 定量遥感中的尺度问题

尺度在遥感科学中可以有两种理解:一是地理范围,比如全球尺度、大洲尺度、全国尺度、流域尺度、地块尺度、叶片尺度等等;二是分辨率的粗细,比如公里尺度,百米尺度,米尺度、亚米尺度等等。对给定象素的矩阵,越细的分辨力,对应越小的地理范围,所以二者是一致的。遥感产品用户的需求也是在地理范围和分辨率上给出的。

定量遥感中的尺度效应问题,根本原因在于地表的空間異質性,集中表现为如下几个方面:

(1) 遥感像元观测与传统点观测间不一致。传统田间地块的测量数据提供的是离散的“点”状信息,空间代表范围有限。遥感观测获取的是目标(地学)要素2维空间的“面”状信息。由于地表的空間異質性,用空间代表性有限的“点”去验证“面”上的信息,给遥感反演产品的真实性检验带来很大困难。此外,遥感观测的“面”信息是地物电磁波谱信息,定量遥感反演将观测电磁波信息与目标(地学)要素波谱特征相链接,往往需要“点”观测数据的介入。“点”信息对“面”信息的代表性误差也会影响最终模型反演的精度。

(2) 不同分辨率遥感产品间不一致。遥感产品是由定量遥感模型链接遥感数据和目标参数特征信息,经过一个复杂的反演过程得到的目标参数反演值。不同分辨率遥感产品间的尺度效应表现为:假定遥感数据自身精度、辅助数据和遥感模型完全

相等的情况下,对同一面积同一目标,大像元与小像元(反演后聚合)反演得到的目标参数值并不相等,且两者差异随像元尺度不同而不同。

由于地表的空間異質性,加之遥感反演模型通常非线性,这是最容易被认识和接受的尺度效应表现(Hu和Islam,1997; Wu和Li,2009; 张仁华等,2010)。为了保证在上述假定成立的情况下分析尺度效应,通常采用相同的遥感数据、辅助数据和反演模型,分析“先聚合后反演”(又称集合式计算)和“先反演后聚合”(又称分布式计算)的目标参数值的差异及其随尺度的变化。

(3) 遥感机理模型的尺度适用问题。遥感机理模型在给定尺度下研究地表参数特征与传感器观测地物电磁波信号间的联系,涉及多方面的尺度问题,包括机理模型尺度域、尺度阈值、不同尺度上机理模型反演参数的差异与联系、像元尺度上基本物理定理的适用性、适用条件及如何修正等。

(4) 遥感尺度与用户需求时空分辨率和跨度间的不一致。遥感观测究竟能在何种尺度上支持何种行业应用,能达到何种精度,遥感科学和各行业应用之间仍然存在较为突出的供需矛盾。以我国耕地调查为例,2013年底国土资源部公布的第二次全国土地调查成果,在采用米级和亚米级高分辨率遥感影像与全面实地调查结合的基础上得出中国耕地面积 $1.35 \times 10^{13} \text{ m}^2$ (国土资源部,2013)。而尺度问题的存在,使得采用更低分辨率(如30 m或1000 m)遥感数据调查得到的耕地面积会有出入。遥感观测能够提供从“点”到地理现象之间多级差的尺度,对地学本身具有巨大的推动作用。但是,地表现象和过程的层次性更为丰富。遥感图像各有自己的分辨率、幅面、重访周期和波段选择,必须有可靠、便捷、自洽的尺度转换,才能满足用户的需求。

遥感的多分辨率或多尺度是现代技术无法解决的科学问题(李小文和王祎婷,2013)。不同分辨率遥感信息间不是简单平均的关系,而是与地表状况和目标(地学)参数的性质相关。与海岸线分形这样传统的地学测量尺度问题相比,遥感中的尺度问题研究更为困难,涉及与地学等多学科的交叉。发展考虑地学描述的、多尺度遥感产品间自洽的尺度转换方法,才有望解决目前定量遥感在尺度效应方面的突出问题,推动定量遥感理论与应用再上新台阶。

3 尺度转换研究方法

尺度转换(scaling) 即跨越不同尺度的辨识、推断、预测或推绎(Jarvis ,1995)。尺度转换包括升尺度(up-scaling) 和降尺度(down-scaling)。如前所述, 遥感中的尺度可以有地理范围和分辨率两种理解。但用户往往希望大的地理覆盖范围又有较细的分辨率, 所以“升、降尺度”容易混淆。必须明确“升、降尺度”是在金字塔的意义上定义的(图1)。对给定的空间范围, 升尺度指分辨率粗化, 将小尺度(高分辨率) 上的信息推绎到大尺度(低分辨率); 降尺度指分辨率细化, 过程反之。

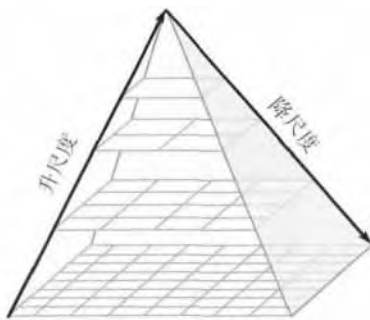


图1 尺度转换金字塔

Fig.1 Scaling pyramid

3.1 升尺度转换

升尺度转换包括由站点观测向遥感像元尺度间的升尺度和遥感产品间的升尺度转换。其中, 站点观测值的特点在其本身信息丰富、但点位稀疏离散、空间代表性有限, 所以升尺度研究主要集中在代表性空间拓展。Crow 等人(2012) 将土壤水分站点观测的升尺度方法归纳为4种, 大体可以反映“点”向“面”升尺度转换的一般方法, 包括: 时间稳定性分析法、高强度采样法、地统计方法和陆面过程模型法。由于站点观测的空间代表性有限, 在点观测向像元尺度转换时总会面临信息不足的问题, 通常需要引入额外信息, 或者是部分站点可以代表像元尺度平均值的假设, 或者是站点间的空间相关性, 或者是陆面过程模式。Qin 等人(2013) 认为上述假设忽略了小尺度上土壤特性、植被、地形、降水等地理要素造成的土壤水分异质性, 提出将遥感反演的表观热惯量作为像元尺度上额外信息引入的站点观测土壤水分升尺度方法。相比土壤水分代表区间小、可认为是“点”观测, 涡动相关仪(EC) 通

量观测值的升尺度更为复杂。由于架设在一定高度, 代表区间(足迹) 取决于传感器高度、地表粗糙程度、风速、风向和大气稳定性等多种因素, 需要通过足迹模型求解(Chen 等 2009)。研究通常在求解足迹模型的基础上将站点 EC 观测反演的地表参数(如总初级生产力、净生态系统碳交换) 在上风向足迹源区按足迹面积加权求和(Chen 等 2009; Fu 等, 2014)。

遥感产品间的升尺度转换, 通常认为小尺度的遥感产品有足够的信息能够推绎到大尺度。将具有能量含义的物理量(辐射亮度、反射率) 面积加权升尺度至大像元再反演得到升尺度遥感产品, 或将遥感产品参数值(NDVI、LAI) 直接面积加权求和, 仍然是应用最为广泛的方法, 如 Agam 等人(2007)。两者间差别即是前述“先聚合再反演”(集合式计算) 和“先反演再聚合”(分布式计算) 导致的尺度效应。围绕减小模型非线性和地表异质性造成的尺度效应, 通常对两种聚合过程进行公式推导或相关分析进行升尺度转换和分析评价, 如 Hu 和 Islam (1997)、Simic 等人(2004)、Jin 等人(2007) 和吴骅等人(2009)。这些尝试理论上能够保证尺度转换产品间的一致性, 但在反演模型适用性、地表异质性描述方面还有待实际应用的检验。

理想的升尺度转换应趋于将内在的关键信息保留在大尺度遥感产品上。但现有的升尺度方法总是趋于产生更同质、方差更小的产品, 即低信息内容的数据集(苏理宏 等 2001)。对遥感产品采用经典的图像处理方法容易产生不可解释的数据, 如将 AVHRR 1 km 分辨率反射率升尺度用于计算全球 20 km 分辨率植被指数, 结果将产生严重偏差(Hay 等, 1997)。理想的升尺度应类似于地图学中的“综合”, 通过对地表状况的描述保留关键信息从而更好地面向地学应用。

3.2 降尺度转换

降尺度转换将大尺度(低分辨率) 上的信息推绎到小尺度(高分辨率), 得到信息更丰富的数据或产品, 因此, 总会面临原图信息量不足的问题, 需要引入额外信息。Atkinson(2013) 将遥感中的降尺度方法归纳为3种: 借助目标参数空间变化的假定或先验知识、插值, 以及不同空间分辨率数据或产品间的相关关系。Atkinson(2013) 重点关注得到小尺度上的连续信息和超分辨率制图两大目标, 因此将讨论集中于克里金插值和多点地统计方法。但插

值方法依靠的是已知点和未知点之间的地理关系,并不必然意味着地表信息量的增加。Zhan 等人(2013)将基于热红外波段 DN 值的降尺度方法概括为借助波段间相关关系、借助短波图像分类结果、基于调制的方法、多分辨率金字塔方法和地统计方法。而对热红外辐射亮度或地表温度的降尺度则通常需要借助与相关地理要素(如植被、不透水面)关系。Kustas 等人(2003)首先将 NDVI 与地表温度间相关关系用于地表温度降尺度。随后,一系列研究围绕植被指数(Zakšek 和 Oštir 2012)、植被面积比例(Agam 等,2007)、发射率(Stathopoulou 和 Cartalis, 2009)、各种光谱指数(Essa 等 2012)与地表温度相关性及在地表温度降尺度中的应用展开。基于这种思路,研究者利用 NDVI 与地表参数的相关性进行相应产品的降尺度转换,如 Immerzeel 等人(2009)、Jia 等人(2011)、Duan 和 Bastiaanssen(2013)利用 NDVI 与降水间相关关系将 TRMM 0.25°分辨率降水产品降尺度至 1 km; Hwang 等人(2011)利用 NDVI 与 FPAR 的线性关系,将 250 m 分辨率 FPAR 产品降尺度至 30 m。借助相关地理要素的降尺度转换方法以地理要素间的联系为先验知识,引入更高分辨率上可获得的地表要素信息,从而解决降尺度中信息量不足的问题,近来日益受到研究者关注。

4 构造地理要素趋势面的尺度转换普适性方法

由于地表的空时异质性,尺度问题广泛存在于定量遥感模型反演、真实性检验、多尺度产品一致性检验、遥感应用的方方面面。只有发展从传统站点观测到多尺度遥感像元间自洽的尺度转换方法,才有助于解决困扰定量遥感在普适性、系统性发展和行业应用中的关键问题。要这么做,困难是很大的:在尺度转换中总会面临原图信息量不足或保留关键信息的问题;如何减少和控制不确定性;以及如何生产满足用户要求的空时分辨率的特定产品等等。而尺度转换的可能性在于,总是能够获得关于地表的辅助信息和先验知识,包括相关地理要素、过程模型等等,应充分加以利用。因此,本文提出构造地理要素趋势面的基本构想,在遥感尺度转换方面先搭建一个普适性方法框架,如下:

(1) 构建先验知识库。由于遥感瞬时观测信息量有限,李小文等人(1998)提出了基于先验知识的定量遥感反演理论,提出通过先验知识积累补充观

测信息量的不足,并将遥感模型反演中的先验知识分为两类:一是对模型参数的物理限制,称为“硬边界”,即按各参数的物理意义决定其取值范围;一是对研究对象各种观测数据的积累,称为“软边界”,包括各类地学辅助信息和先期野外测量数据。

类似地,遥感尺度转换中也总会面临信息量不足或如何保留关键信息的问题,应该尽量完善地利用相关地理要素的信息。按照以上思路,尺度转换中的先验知识也可分为两类:一类是由遥感反演模型获取的目标参数值构成的“硬边界”;一类是其他各种地学辅助信息和实测数据。

由于在遥感观测中需要对测量条件、目标要素的结构、季相等给予充分的考虑,观测数据的外延能力差,关于地表要素的大量信息难以形成知识。此外,由于传感器时间、空间、光谱分辨率等特征各异,获取的大量数据不经过有效整合难以面向特定应用进行时间、空间上的外延和推理,进而难以构成尺度转换中所需的知识。因此,需要将各类辅助信息有效组织、构建先验知识库,才能将相关信息转化为尺度转换中所需的先验知识。

先验知识库中包含所有模型反演和尺度转换所需的先验知识,由链接模型库、波谱知识库、空间分辨率为 s_0 地理要素趋势面库 Q_{s_0} 、近期时变记录、时间分辨率为 t_0 的过程模型库 M_{t_0} 等构成。其中,链接模型库和波谱知识库用于从遥感观测数据中反演目标要素产品;地理要素趋势面库 Q_{s_0} 包括 DEM、近期地表覆盖及变化、月均、年均光照、温度、降水、土壤质地、植被等地学辅助趋势面;近期时变记录包括近期湿度、物候、降水等天气或气候过程记录,可对静态趋势面进行时变调整;过程模型库包括水文学、动力学、生态学等地表过程模型,可用于对瞬时观测目标要素产品进行时间尺度扩展。

(2) 构造地理要素趋势面。趋势面方法是地学中广泛应用的一种全局插值方法,通过拟合已知数值的点来构建一个方程或模型用于估算未知数值(Chang 2005)。趋势面通过数学方程拟合目标要素的实际面,形成一个模拟目标要素空间分布趋势的近似曲面。与实际面相比,趋势面抽象并过滤掉了一部分局域随机因素,使目标要素区域性空间分布规律显现,因而被广泛用于气象、水文、地质等领域(Chorley 和 Haggett, 1965)。目标要素的空间分布曲面通常以多项式形式进行拟合,通过调整多项式次数能够反映目标要素连续变化的分布趋势。趋势面构建通常是在确定多项式方程形式后,利用

最小二乘法原则由已知点求出使得趋势面残差趋于最小化的多项式系数。

地学中的趋势面从本质上是先有“点”后有“面”的。这里提出地理要素趋势面的构想,借鉴了其中目标要素区域分布趋势和“面”的概念,提出充分利用已知地学环境要素和遥感反演产品等关于目标要素区域分布“面”上的信息,本质上是先有“面”的,不同于由点插值的思路。

构造地理要素趋势面,就是尽量完善地利用地学环境时不变要素、关系密切的时变要素、站点观测以及陆面过程模型得到的相关地理要素空间分布趋势,判断目标要素观测点、观测像元在空间上的代表性,从而为解决尺度转换中信息量不足和保留关键信息的问题提供依据。

地理要素趋势面是连接遥感观测和用户需求的桥梁,涉及时间和空间两个尺度。首先,通过地学环境时不变要素构造空间分辨率为 s_0 的静态趋势面。其次,为了与遥感新观测数据达成时间上的匹配,通过近时期变记录或过程模型库对静态趋势面进行时变调整,得到 t_1 时刻的、空间分辨率 s_0 的趋势面。最后,根据遥感新观测数据和用户需求时空尺度,融合站点观测数据 $o(x, y, z, t)$ 对趋势面进行调整,得到 t_1 时刻、空间分辨率 s_n 的趋势面 $q_{s_n}^t$,将此趋势面作为关于地表描述的先验知识。

(3) 先验知识表达与先验趋势面更新。地理要素趋势面提供了关于目标要素空间分布的先验知识。尺度转换就是在先验知识支持下,在遥感反演产品和用户需求时空尺度间达成匹配。因此,首先需要对先验知识进行表达,连接先验趋势面和遥感反演产品。

首先, t_1 时刻、空间分辨率 s_1 的遥感观测数据 $g_{s_1}^t$ 在链接模型和波谱知识库的支持下生成 t_1 时刻、空间分辨率 s_1 的目标参数产品 $u_{s_1}^t$ 。

其次,将 t_1 时刻的遥感产品 $u_{s_1}^t$ 作为新信息,构造的地理要素趋势面 $q_{s_n}^t$ 作为先验知识。先验知识的表达有多种形式,如数学符号形式、逻辑运算形式或者是统计表达等。这里可以按照 Bayes 反演理论,把相关地表参数看作一个有一定概率分布的随机变量,先验知识由 m 维参数空间 Q 上的概率密度分布函数 $P(q_1, q_2, \dots, q_m)$ 表达,通过前向模型,这一分布将对对应 m 维观测数据的一个概率密度分布函数 $P(q)$ 。

由贝叶斯定理可将遥感反演产品和先验知识联系起来,有:

$$P(q|u) = \frac{P(u|q)P(q)}{P(u)}$$

式中, $P(u|q)$ 表示在给定趋势面值 q 时得到要素反演值 u 的条件概率; $P(q)$ 为关于趋势面的先验分布; $P(u)$ 为给出遥感要素值的全概率,可表示为 $P(u) = \int_q P(u|q) \cdot P(q) dV_q$; $P(q|u)$ 为 q 的后验概率,综合了先验知识与遥感反演值 u 提供的信息,是对 q 的全部知识。

通过贝叶斯定理,可将先验趋势面 $q_{s_n}^t$ 更新为后验趋势面 $q_{s_n}^{t, \text{post}}$ 。

(4) 误差评估和尺度转换。后验趋势面融合了遥感新观测信息和先验知识,是关于目标要素的全部知识。因此,对先验趋势面 $q_{s_n}^t$ 和后验趋势面 $q_{s_n}^{t, \text{post}}$ 进行误差评估,一方面将后验趋势面更新到地理要素趋势面库中,可作为下一次尺度转换的先验知识;另一方面在满足精度要求的情况下,生成满足用户需求时空分辨率的产品 $u_{s_n}^t$ 。

本文提出的方法框架如图 2 所示。

5 结 论

围绕尺度问题这一困扰定量遥感应用和发展的关键问题,对定量遥感中的尺度问题进行了梳理,对遥感中升、降尺度的转换方法展开了讨论。在从站点观测到像元尺度以及遥感产品的降尺度转换研究中,由于原数据信息量的不足,引入额外信息成为普遍共识。理想的升尺度转换应趋于保留关键信息,而现有的升尺度方法总是趋于产生更同质的低信息量数据。因此,探讨建立从传统站点观测到像元尺度、以及多尺度遥感产品间自治、便捷的尺度转换方法具有重要意义。

借鉴了定量遥感反演中先验知识和地学中趋势面等概念,并赋予其新的内涵,提出构造地理要素趋势面的基本构想,先搭建了一个具有普适性的尺度转换方法框架。核心内容包括:充分利用地表环境要素时不变趋势面、关系密切的时变要素、近时期变记录、站点观测和过程模型构建先验知识库;在先验知识库支持下对地理要素趋势面在时间、空间两个尺度上进行调整,作为尺度转换中的先验知识;将新获取的遥感产品作为新信息,通过贝叶斯定理更新先验趋势面为后验趋势面;误差评估,更新先验知识库,并生成用户指定时空分辨率的地表要素产品。该方法框架还是一个概念模型,

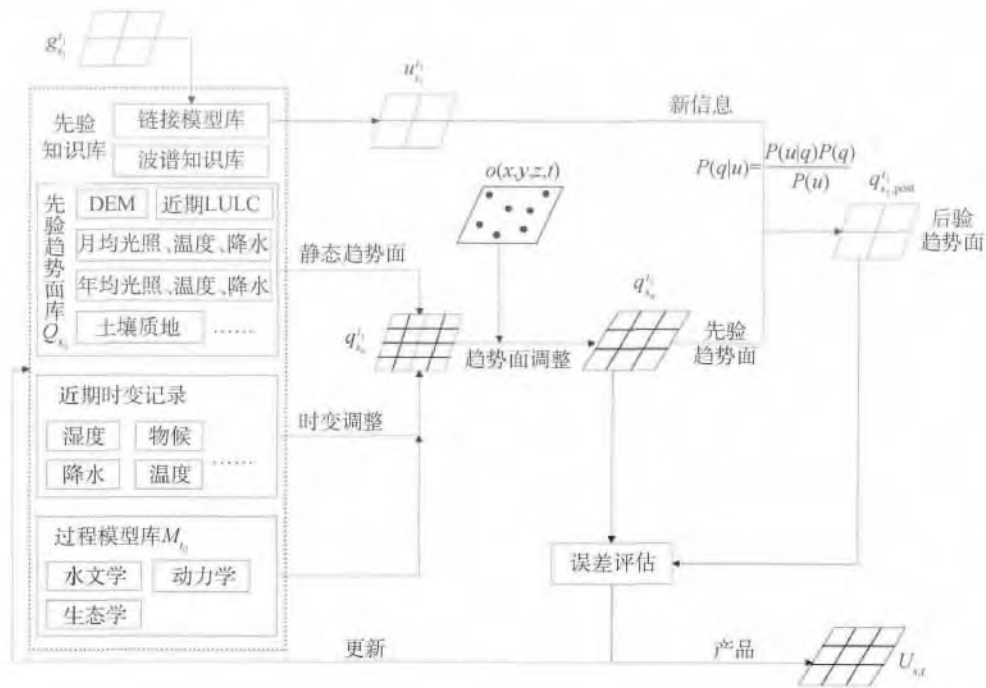


图2 构造地理要素趋势面的普适性尺度转换方法

Fig. 2 Universal scaling methodology by constructing geographic trend surface

有很多问题还需要具体化。希望与读者共享并请批评指教。

参考文献(References)

- Agam N, Kustas W P, Anderson M C, Li F Q and Neale C M U. 2007. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 107(4): 545 - 558 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.006]
- Atkinson P M. 2013. Downscaling in remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22: 106 - 114
- Chang K T. 2005. Introduction to Geographic Information Systems. Chen J F, et al. Translator. Beijing: Science Publisher: 247 - 248 (Chang K T. 2005. 地理信息系统导论. 陈健飞等译. 北京: 科学出版社: 247 - 248)
- Chen B Z, Black T A, Coops N C, Hilker T, Trofymov J A and Morgenstern K. 2009. Assessing tower flux footprint climatology and scaling between remotely sensed and eddy covariance measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 130(2): 137 - 167 [DOI: 10.1007/s10546-008-9339-1]
- Chorley R J and Haggett P. 1965. Trend-surface mapping in geographical research. *Transactions of the Institute of British Geographers*, (37): 47 - 67
- Crow W T, Berg A A, Cosh M H, Loew A, Mohanty B P, Panciera R, de Rosnay P, Ryu D and Walker J P. 2012. Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Reviews of Geophysics*, 50(2): RG2002 [DOI: 10.1029/2011RG000372]
- Duan Z and Bastiaanssen W G M. 2013. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new down-scaling-calibration procedure. *Remote Sensing of Environment*, 131: 1 - 13
- Essa W, Verbeiren B, van der Kwast J, van de Voorde T and Batelaan O. 2012. Evaluation of the DisTrad thermal sharpening methodology for urban areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19: 163 - 172 [DOI: 10.1016/j.jag.2012.05.010]
- Fu D, Chen B, Zhang H, Wang J, Black T A, Amiro B D, Bohrer G, Bolstad P, Coulter R, Rahman A F, Dunn A, McCaughey J H, Meyers T and Verma S. 2014. Estimating landscape net ecosystem exchange at high spatial-temporal resolution based on Landsat data, an improved upscaling model framework, and eddy covariance flux measurements. *Remote Sensing of Environment*, 141: 90 - 104 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.029]
- Hay G J, Niemann K O and Goodenough D G. 1997. Spatial thresholds, image-objects, and upscaling: a multiscale evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 62(1): 1 - 19 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)81622-7]
- Hu Z and Islam S. 1997. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 747 - 755 [DOI: 10.1109/36.581996]
- Hwang T, Song C, Bolstad P V and Band L E. 2011. Downscaling real-time vegetation dynamics by fusing multi-temporal MODIS and Landsat NDVI in topographically complex terrain. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2499 - 2512 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.010]
- Immerzeel W W, Rutten M M and Droogers P. 2009. Spatial downscal-

- ing of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 113(2): 362 – 370 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.10.004]
- Jarvis P G. 1995. Scaling processes and problems. *Plant, Cell & Environment*, 18(10): 1079 – 1089 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1995.tb00620.x]
- Jia S, Zhu W, Lü A and Yan T. 2011. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3069 – 3079 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.009]
- Jin Z, Tian Q, Chen J M and Chen M. 2007. Spatial scaling between leaf area index maps of different resolutions. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 628 – 637 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.08.016]
- Kustas W, Norman J, Anderson M and French A. 2003. Estimating sub-pixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 429 – 440 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00036-1]
- Li X W, Wang J D, Hu B X and Strahler A H. 1998. Role of prior knowledge in remote sensing retrievals. *Science in China (Series D)*, 28(1): 67 – 72(李小文, 王锦地, 胡宝新, Strahler A H. 1998. 先验知识在遥感反演中的作用. *中国科学(D 辑)*, 28(1): 67 – 72)
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 1999a. Apparent reciprocity failure in directional reflectance of structure surfaces. *Progress in Natural Science*, 9(10): 747 – 752
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 1999b. Scale effects of Planck's Law over a non-isothermal blackbody surface. *Science in China (Series E)*, 42(6): 652 – 656 [DOI: 10.1007/BF02917003]
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 2000. Scale effects and scaling-up by geometric-optical models. *Science in China (Series E)*, 43(Suppl): 17 – 22 [DOI: 10.1007/BF02916574]
- Li X W and Wang Y T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163 – 1169(李小文, 王祎婷. 2013. 定量遥感尺度效应刍议. *地理学报*, 68(9): 1163 – 1169)
- Ministry of Land and Resource. 2013. Communiqué on main data results of the second national land investigation. Beijing: Ministry of Land and Resource(国土资源部. 2013. 关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报. 北京: 国土资源部)
- Qin J, Yang K, Lu N, Chen Y, Zhao L and Han M. 2013. Spatial up-scaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 138: 1 – 9 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.003]
- Simic A, Chen J M, Liu J and Csillag F. 2004. Spatial scaling of net primary productivity using subpixel information. *Remote Sensing of Environment*, 93(1-2): 246 – 258 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.07.008]
- Stathopoulou M and Cartalis C. 2009. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2592 – 2605 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.017]
- Su L H, Li X W and Huang Y X. 2001. A review on scale in remote sensing. *Advances in Earth Sciences*, 16(4): 544 – 548(苏理宏, 李小文, 黄裕霞. 2001. 遥感尺度问题研究进展. *地球科学进展*, 16(4): 544 – 548)
- Wu H, Jiang X G, Xi X H, Li C R and Li Z L. 2009. Comparison and analysis of two general scaling methods for remotely sensed information. *Journal of Remote Sensing*, 13(2): 183 – 189(吴骅, 姜小光, 习晓环, 李传荣, 李召良. 2009. 两种普适性尺度转换方法比较与分析研究. *遥感学报*, 13(2): 183 – 189)
- Wu H and Li Z L. 2009. Scale issues in remote sensing: a review on analysis, processing and modeling. *Sensors*, 9(3): 1768 – 1793 [DOI: 10.3390/s90301768]
- Zakšek K and Oštir K. 2012. Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. *Remote Sensing of Environment*, 117: 114 – 124 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.027]
- Zhan W, Chen Y, Zhou J, Wang J, Liu W, Voogt J, Zhu X, Quan J and Li J. 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: literature survey, taxonomy, issues, and caveats. *Remote Sensing of Environment*, 131(0): 119 – 139 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.014]
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B and Chen S H. 2010. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Science China (Series Earth Science)*, 53(5): 741 – 751(张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 2010. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. *中国科学(地球科学)*, 40(2): 211 – 222)

Universal scaling methodology in remote sensing science by constructing geographic trend surface

WANG Yiting^{1, 2}, XIE Donghui¹, LI Xiaowen¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing, Beijing Key Laboratory of Environmental Remote Sensing and Digital City, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

Abstract: Contemporary remote sensing science is challenged by serious supply-demand contradiction between data acquisition and application capabilities. Scale issue is attributed as a major and essential problem retarding the development of remote sensing in both theories and applications. Due to heterogeneity and complexity of land surface, scale issue naturally arises as how remote sens-

ing observations match phenomenon or process on earth surface or how multi-scale remote sensing observations maintain consistency. Therefore, this paper endeavors to build up a universal scaling methodology framework, which would hopefully help interpret and transfer remote sensing products between sensor-defined scales and user-demand scales.

To begin with, scale issues in remote sensing are analyzed as: inconsistency between pixel-based remote sensing observation and conventional point-based field measurement, inconsistency between remote sensing products at varied scales, scale adaptabilities of physically-based models and scale inconsistency between remote sensing product and user demand. It is pointed out that multi-scale remote sensing information is related to characteristics of land surface and simple averaging or classic image processing will result unexplainable data.

Second, scaling methods are explored in terms of up-scaling and down-scaling. Up-scaling involves scaling from point-based field observations to pixel-based remote sensing observations and scaling between remote sensing products at varied scales. For the former a general way is to introduce extra information while the latter always uses two approaches as clumped or distributed computation. Preferred up-scaling is supposed to reserve key information, but most current methods tend to derive more homogeneous product of low information quantity. Down-scaling refers to derive data with more detailed information. The insufficiency of information of the original image is unavoidable and it is mandatory to introduce extra information. The earlier downscaling methods largely rely on pre-defined assumptions or interpolation, while a recent trend is to use relevant geographic features as prior knowledge. The central issue in scaling is concluded as how to reserve key information or how to introduce extra information.

Third, borrowing ideas of prior knowledge from quantitative remote sensing retrieval and trend surface in geographic applications, the paper proposes the concept of geographic trend surface and establishes a universal scaling methodology. The core is: (1) to construct prior knowledge warehouse by integrating all necessary information in retrieval and scaling, including link model, spectral knowledge, geographic trend surface, recent temporal change records and process models; (2) to adjust the geographic trend surface in spatial and temporal frame under the support of prior knowledge warehouse. All kinds of geographic information, including temporally stable geographic features, temporal change records, field observations and process models, are used to derive the spatial patterns of the target feature, based on which the spatial representativeness of observation at each location can be identified; (3) to update prior trend surface to post trend surface through Bayes theorem, where prior trend surface is expressed as prior knowledge and new remote sensing observations are taken as new knowledge; (4) to derive the product of land surface parameter at demanded scales based on error analysis and then update the post trend surface into prior knowledge warehouse. As a whole, construction of geographic trend surface lays the foundation of the methodology, which aims at addressing problems of information insufficiency or key information reservation in scaling. The paper provides a conceptual scaling model, while many technical details need to be fulfilled further in practice.

Key words: scale effects, scaling, trend surface, prior knowledge, quantitative remote sensing