



遥感地表数据 重建与时空分析应用

韩玲 赵永华 韩晓勇 著



科学出版社

遥感陆表数据重建与时空分析应用

韩 玲 赵永华 韩晓勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统论述了遥感数据重建、时序分析和应用特点。全书共7章,重点论述陆表产品数据重建、时间序列分析的内容、研究现状、理论基础、不同数据产品特征、数据预处理方法、云覆盖时空特征与提取、NDVI数据空间特征、插值方法、分形插值重建算法、地表温度的影响因素、数据重建流程与精度评价、云覆盖区修正模型、低日照时数对LST的影响、NDVI时序数据模糊分类与评价、不同高程和不同地类地温特征、自向量回归流程及LST与NDVI时间序列时滞分析、典型区NDVI变化参数提取、不同遥感数据反演山区植被变化的特性、适用性与趋势、不同数据源NDVI时间序列特征差异、空间相关性及其与Landsat NDVI空间分布和动态变化的一致性。

本书适合从事地理学、测绘遥感、生态学等专业的科研和教学人员阅读,可作为高等院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

遥感陆表数据重建与时空分析应用 / 韩玲, 赵永华, 韩晓勇著. —北京: 科学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-03-057096-3

I. ①遥… II. ①韩… ②赵… ③韩… III. ①陆地-遥感数据 IV. ①P22

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第067612号

责任编辑: 刘浩旻 韩 鹏 白 丹 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 9

字数: 200 000

定价: 98.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

20 世纪以来, 人类的剧烈活动导致地球表面环境变化明显, 如何快速识别变化的时间、空间特征, 以及建立长时间变化监测序列, 对全球的生态环境改善具有重要意义。在当前生态文明建设和“一带一路”倡议背景下, 如何维持并提高不同尺度的山水林天湖数量与质量, 促进生态环境提升, 需要大尺度、长时间序列数据支撑。航空航天遥感的快速发展, 海量的历史和现势遥感数据可为上述问题提供强有力支撑。

早期的 NOAA/AVHRR NDVI 在生态环境监测中发挥了重要作用; 20 世纪 90 年代 Terra、MODIS 卫星成功发射以来, MODIS NDVI 作为 NOAA/AVHRR NDVI 的继承产品, 应用范围越来越广, 同时专门为植被研究设计的 SPOT-VEGETATION NDVI 产品数据在生态环境监测中的作用也越来越凸显。但由于遥感数据在获取过程中受到云覆盖的影响, 严重影响了遥感卫星对地观测的数据质量, 使传感器无法获取有效的地表观测数据, 产生空间不连续的观测数据, 且时间间隔不规律, 进而影响到后期的数据使用效果, 并降低了数据价值和遥感数据时序分析的应用水平, 限制了对遥感数据时间维度隐藏规律的认知。如何对缺失的和低质量的遥感数据进行数据重建、不同遥感数据源的重建方法与差异性有哪些、如何对重建后的遥感数据进行时序分析、重建后的数据在典型区域中的应用及其评估、不同数据源间存在的差异对后续的生态环境研究造成的影响程度和不同序列的数据集之间一致性如何检验、如何对不同的数据集进行整合从而更适合生态环境研究、不同时间序列数据如何互补及其互补成效等逐渐成为遥感应用领域的研究热点。

鉴于遥感数据重建、时序分析的重要性, 在系统分析基础上, 完成了遥感数据重建、时序分析、对比研究和实际应用。全书共分为 7 章。第 1 章介绍了陆表产品数据重建、时间序列分析的内容、国内外研究现状和理论基础; 第 2 章论述了 MODIS、AVHRR/SPOT VEGETATION、地表反射率产品等数据特征, 遥感数据预处理方法、云覆盖时空特征与提取、研究的辅助数据和区域概况; 第 3 章论述了 NDVI 数据空间特征、插值方法、分形插值重建原理与算法、精度评价; 第 4 章论述了地表温度的影响因子特征、数据重建流程与精度评价、云覆盖区修正模型、低日照时数对 LST 的影响; 第 5 章论述了基于加窗 DTW 距离的 NDVI 时序数据模糊分类与评价、不同高程和不同地类地温特征、自向量回归原理、流程及 LST 与 NDVI 时间序列时滞分析; 第 6 章论述了秦岭地区植被指数变化参数提取、不同遥感数据反演秦岭山区植被变化的特性和适用性分析、秦岭地区植被变化趋势分析; 第 7 章论述了 AVHRR NDVI、MODIS NDVI 和 SPOT NDVI 时间序列特征差异、空间相关关系、与 Landsat NDVI 空间分布和动态变化的一致性及其秦岭地区数据的修正。

本书由韩玲总体设计并拟定了章节内容。第 1 章和第 2 章由韩玲、赵永华和韩晓勇撰写; 第 3 章~第 5 章由韩玲和韩晓勇撰写; 第 6 章和第 7 章由韩玲和赵永华撰写。全书由韩玲和赵永华统稿。

遥感数据重建和时序分析处在发展和不断完善之中, 作者殷切期望本书的出版能引起

各界有关人士对遥感数据重建、时序分析和推广应用的更多关注和兴趣，并希望能对从事不同尺度上遥感数据重建、时序分析和应用的专家学者及高等院校有关本科生、研究生的研究工作和学习有所裨益，进一步推动国内外的遥感数据重建与应用的快速发展和不断提高。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

韩 玲

2017年11月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 MODIS 陆表产品数据重建与时间序列分析	1
1.1.1 陆表产品数据重建与时间序列分析研究背景与意义	1
1.1.2 陆表产品数据重建与时间序列分析国内外研究现状	4
1.1.3 陆表数据重建与时间序列分析研究内容	9
1.1.4 秦岭地区植被覆盖变化研究现状	9
1.2 基于不同遥感数据源的秦岭地区植被指数对比分析	10
1.3 理论基础	10
1.3.1 植被与植被指数	10
1.3.2 常见的植被指数	11
1.3.3 植被指数的影响因素	13
1.4 小结	15
参考文献	15
第 2 章 研究数据及云覆盖时空特征分析	23
2.1 NDVI 遥感数据	23
2.1.1 MODIS 数据	23
2.1.2 AVHRR 数据	26
2.1.3 SPOT VEGETATION 数据	28
2.1.4 三种 NDVI 数据比较	29
2.1.5 地表反射率产品	30
2.1.6 云掩膜产品及地温数据	31
2.2 辅助数据	32
2.2.1 气象数据及 DEM 数据	32
2.2.2 MODIS 数据地理定位文件	33
2.3 遥感数据预处理	33
2.3.1 HDF 数据集解压、投影转换和镶嵌处理	34
2.3.2 质量控制处理	34
2.3.3 数据转换	35
2.3.4 研究区介绍	36
2.4 云覆盖数据提取	39
2.4.1 云掩膜产品的数据结构	40
2.4.2 云掩膜数据处理流程	42

2.5	云覆盖时空特征	44
2.5.1	月份无云概率	44
2.5.2	子区云特征	45
2.6	秦岭植被指数来源及处理	48
2.6.1	数据来源	48
2.6.2	数据预处理	49
2.6.3	研究方法	50
2.7	小结	50
	参考文献	51
第3章	基于分形插值的 NDVI 数据重建	52
3.1	NDVI 的空间特征	52
3.1.1	NDVI 空间平稳性特征	52
3.1.2	NDVI 空间分形特征	54
3.2	通用空间插值方法	57
3.2.1	反距离加权插值法	58
3.2.2	克里格空间插值	59
3.3	NDVI 数据分形插值重建	61
3.3.1	分形插值原理	61
3.3.2	NDVI 分形插值算法	64
3.4	NDVI 分形插值算法精度评价	66
3.4.1	检核点集 C 的效用分析	66
3.4.2	分形插值精度分析	68
3.5	小结	71
	参考文献	71
第4章	LST 数据时序重建	73
4.1	LST 与影响因子的相关性	73
4.1.1	总相关性特征	74
4.1.2	时点相关性特征	75
4.2	LST 数据重建	77
4.2.1	LST 重建流程	77
4.2.2	LST 数据重建精度	79
4.3	云覆盖区修正模型	87
4.3.1	低日照时数对 LST 的影响	87
4.3.2	云覆盖区 LST 重建数据修正	89
4.4	小结	92
	参考文献	93
第5章	NDVI 及 LST 重建数据时序分析	94
5.1	基于加窗 DTW 距离的 NDVI 时序数据模糊分类	94

5.1.1	S-G 滤波	94
5.1.2	加窗 DTW 距离	95
5.1.3	贴近度模糊分类	96
5.1.4	时序分类精度评价	97
5.2	LST 时序特征	100
5.2.1	不同高程地温特征	100
5.2.2	不同地类地温特征	101
5.3	LST 与 NDVI 时间序列时滞分析	103
5.3.1	VAR 方法原理	103
5.3.2	VAR 模型构建流程	104
5.3.3	NDVI 与 LST 的时滞分析	107
5.4	小结	111
	参考文献	112
第 6 章	秦岭地区植被指数时空变化特征分析	113
6.1	秦岭地区植被指数变化分析	113
6.2	不同遥感数据反演秦岭山区植被变化的特性和趋势	119
6.2.1	不同传感器 NDVI 值分析	119
6.2.2	不同传感器生长季多年平均 NDVI 空间特征分析	121
6.2.3	不同传感器 NDVI 像元尺度分析	123
6.2.4	秦岭地区植被变化趋势分析	124
6.3	小结	125
	参考文献	126
第 7 章	3 种不同遥感 NDVI 与 Landsat NDVI 的相关性分析	127
7.1	NDVI 数据的时序特征与相关性分析	127
7.1.1	3 种 NDVI 数据的时序特征	127
7.1.2	3 种 NDVI 数据的空间相关关系分析	128
7.2	NDVI 数据一致性分析	129
7.2.1	3 种 NDVI 数据与 Landsat NDVI 空间分布的一致性分析	129
7.2.2	不同遥感 NDVI 与 Landsat NDVI 动态变化的一致性分析	131
7.3	AVHRR NDVI 数据的修正	134
7.4	小结	136
	参考文献	136

第1章 绪 论

随着航天遥感的快速发展，累积了海量的遥感数据。但云覆盖严重影响了遥感卫星对地观测的数据质量，使传感器无法获取有效的地表观测数据，导致出现遥感观测数据产生空间不连续、时间间隔不规则的现象，从而降低了遥感数据时序分析的应用水平，限制了对遥感数据时间维度隐藏规律的认知。如何对遥感缺失和低质量数据进行数据重建、不同遥感数据源重建的方法与差异性、对重建数据进行时序分析，以及重建后的数据在典型区域的应用研究等逐渐成为遥感应用领域一个新的研究热点。

基于 MODIS 陆表产品中时序变化特征有代表性的归一化植被指数（normalized difference vegetation index, NDVI）和地表温度（land surface temperature, LST）数据的时空特征，设计了用分形插值算法进行 NDVI 数据重建和逐步回归模型的 LST 时序重建算法，进行了时间序列分析，探求它们时间维度包含的信息，实现提高数据时空连续性的目的，为遥感应用提供定量化数据服务；在比较 AVHRR NDVI、SPOT NDVI 和 MODIS NDVI 3 种数据在监测山区植被变化中各自具有的特点基础上，开展秦岭地区植被指数的时空变化特征分析，验证数据的有效性。

1.1 MODIS 陆表产品数据重建与时间序列分析

1.1.1 陆表产品数据重建与时间序列分析研究背景与意义

1. 研究背景

人类活动是生态环境演变的重要驱动力之一，近代以来，人类活动对地球的影响范围和强度不断增强（Vitousek et al., 1997）。人类活动及其影响对地球环境的干扰使得地球的土壤圈、水圈、大气圈和生物圈不断变化，其中许多剧烈的变化表现为，干旱、洪水、荒漠化和泥石流等自然灾害加重，另有一些变化则表现为新灾害发生，如酸雨、雾霾、赤潮和疾病传播等（魏建兵等，2006）。20 世纪 80 年代以来，全球性环境问题不断涌现及气候变化问题不断凸显，作为全球性问题，得到国际社会、研究机构越来越多的关注和重视。为此，国家在过去 30 年里，先后启动了“三北防护林工程”“退耕还林还草工程”“北京风沙源治理工程”“天然林保护工程”“江河源保护工程”“内陆河流域生态建设和水资源保护工程”等一系列重大生态环境治理工程项目，并取得了一定的成绩。但由于对陆表过程，如水文过程、生物过程和土地退化及其演变规律的研究相对薄弱、认识不足、理论滞后，使得生态环境仍面临“局部治理，整体恶化”的严峻态势（王涛，2007）。面对全球气候变化及其对人类生存造成的影响，国际组织及相关国家长期以来一直努力寻求解决这些问题的方案，并将发现全球变化的基本规律和准确模拟未来全球环境变化的方向

及其影响作为未来深入研究的方向,其中,陆面过程研究已成为当前地球科学领域的一个前沿课题,80年代以来,在全球不同气候区开展的大规模国际性陆面过程观测实验将陆面过程研究推向了深入发展,并取得了引人注目的新成果(Li et al., 2013; Gallo et al., 2011)。

自1972年美国发射了第一颗陆地卫星ERTS后,标志着民用航天遥感时代的真正开始。遥感技术的运用使人类可以从一个新的维度观测全球和区域的资源、环境、水文、气象、地质和地理等各个领域数据,也是长期监测地表覆盖变化的主要数据来源(Hall et al., 1995)。遥感技术以其独特的优势,在陆面过程研究中的应用受到了广泛关注,利用卫星遥感资料反演区域尺度上地表特征参数的有效性在科学界已达成共识(何晴和吕达仁, 2008)。大多数国际陆面过程实验将遥感作为重点项目列入了实验,它们已用于分析陆面过程中的地表辐射能量收支及温度和湿度的变化,并在全球碳生物地球化学循环方面的研究也日益深入(Qin and Karnieli, 2001)。所建立的数据信息不仅为气候模式提供了精确的陆面特征参数,也为模型模拟预测结果的验证提供了依据。在全球气候观测系统(GCOS)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、陆地生态系统-大气过程综合研究(iLEAPS)等项目中,遥感观测手段处于十分突出的地位。随着遥感技术的不断发展,它在陆面过程研究中将发挥越来越重要的作用,利用遥感数据获取陆面参数、对陆面过程的参数化方案进行改进已成为陆面过程研究的热点课题。

随着遥感技术的发展,美国的NOAA卫星、VEGETATION传感器搭载的SPOT-4卫星和Terra卫星的发射成功,全球时间系列卫星遥感产品的产生就备受期待,从开始产生之日起就被高度重视,目前该产品已经被广泛应用于各种尺度的地表动态监测,并且同时与气温和降水等气候变化资料结合起来,进行全球的地表动态变化分析。随着时间的推移,遥感产品的时间序列逐渐延长,新一代的传感器也不断涌现,时间系列的遥感产品的内容逐渐丰富,其应用领域也越来越广泛。因此,不同时间序列数据之间的比较和相互转换就成了这两年一个新的研究热点,很多学者(侯美亭等, 2013; 韩鹏等, 2014; 刘远和周买春, 2015)在这方面进行了初步的尝试研究,最早的基于NOAA AVHRR传感器的是长时间序列可见光波段和近红外波段产品,此阶段的数据比较主要是针对AVHRR传感器生成不同的遥感产品,其中,Pathfinder就曾对AVHRR和FASIR两种数据进行了比较,他比较的主要内容是导致产品差异的其中一个原因是不同数据的预处理方法不同。20世纪末期,一些新的传感器开始出现,如MODIS、MERIS和SPOT VEGETATION等,由于不同传感器在获取数据的时间上有覆盖,因此基于这些传感器的产品之间的比较就成了研究的热点(Song et al., 2010; 毛德华等, 2011, 2012; Fensholt et al., 2012; 陈燕丽等, 2011)。由于不同传感器的时间序列资料覆盖的时间有所不同,如AVHRR NDVI数据持续到2006年,而VEGETATION和MODIS传感器却持续到现在,但是却缺少早期的数据,因此,有不少学者就在时间序列的延长上做尝试研究。

2. 研究意义

航天遥感的快速发展,使用可见-反射红外,热红外、微波遥感多波谱段进行遥感数据获取,累积了海量遥感数据,为人类提供多种可利用信息。但是由于技术上的限制,现有的航天遥感传感器无法同时获取高时间分辨率、高空间分辨率、高光谱分辨率的数据,

因此, 大多传感器会在这三者之间做出一定权衡 (王志慧等, 2013)。多数卫星具有高空间分辨率或高光谱分辨率, 如 TM 影像的空间分辨率为 30m、QuickBird 的空间分辨率可达 0.4m, Hyperion 的光谱分辨率可达到 10nm。不过这些高空间分辨率和高光谱分辨率的卫星传感器重返周期往往较长, 如 Landsat 系列卫星每 16d 才能获取一景影像, 且受云覆盖等非理想气象条件的影响, 往往不能保证卫星过境当天获取到高质量的数据, 极大地降低了一年之中卫星可提供的有效数据的数目, 因此, 不便于开展大范围、连续的地表特征的监测。这种情况极大地压缩了遥感数据在时间尺度上的信息, 将遥感数据的应用限制在利用其空间和光谱信息上 (Zhao et al., 2009)。自美国实施“地球观测系统” (Earth Observation Satellite, EOS) 以来, 尤其是 MODIS、MERIS、ASTER 等传感器的投入使用, 遥感定量反演地表特征的真实性的进一步得到增强, 并使全球日覆盖的遥感数据产品得以实现 (Friedl and Mciver, 2002)。但由于可见光/近红外和热红外遥感数据, 成像时受云覆盖、传感器未响应等因素的影响, 则无法获取地表的有效观测数据, 在遥感图像上表现为地表观测数据空间不连续, 有效数据的时间间隔不规律, 这导致遥感数据使用时常选择某一 (若干) 时点的数据, 难以进行连续时点的数据分析, 降低了遥感数据时间维度信息的识别应用。

MODIS 已经先后发布 40 多个系列产品, 其中包括标定产品、大气产品、海洋产品和陆表产品, 该系列产品是当前种类最多的全球遥感产品数据集, 被广泛地应用于陆表过程及其动态变化规律研究中, 其中, NDVI 和 LST 是两类应用较广的数据。NDVI 作为可见光/近红外生成的数据产品, 与植被的许多参数密切相关, 如吸收光合有效百分率、叶绿素密度、叶面积指数、发育程度、生物量、植被覆盖率和蒸散率, 因此, NDVI 在区别植被类型和植被季节物候特征方面非常有效 (Zhang et al., 2013; Zhu and Liu, 2015); LST 作为热红外遥感数据的主要产品, 是全球变化研究的关键参数, 对生态、环境、水文等研究都有重要的意义, 并且在农业气象、热惯量计算等方面也有重要的研究价值 (牛国跃等, 1997; Kustas et al., 1998; 文小航等, 2014)。

MODIS 遥感数据是可见光/近红外和热红外遥感数据, 导致 NDVI 和 LST 在使用中存在下述问题, 严重影响了其应用水平。

首先, 云覆盖对遥感数据影响严重, 致使遥感数据时空不完整。云覆盖通过影响太阳和地气系统的辐射, 对整个地气系统的能量平衡具有强烈的调节作用, 云的生成和变化会引起日照、气温和相对湿度等的变化。段皎和刘煜 (2011) 的研究表明, 中国南方大部分地区总云量在 65% 以上, 尤其是在四川地区, 常年存在总云量的高值区, 可以达到 75% 以上; 我国北方地区、渤海湾、内蒙古中部地区总云量在 50% 以上, 且有逐年增加的趋势; 这意味着云覆盖对遥感对地观测的影响非常严重, 其表现为遥感数据获取时, 云层遮挡地物, 使得影像中存在“盲区”。去除影像中的“盲区”, 再现清晰地物, 以便于遥感影像的进一步分析处理和应用, 具有十分重要的意义。

其次, 遥感数据缺失限制了遥感数据时序分析的应用水平。时间序列分析方法是利用统计的方法描述事物在时间维度发展变化的规律性, 并利用此规律进行事物发展的预测、识别, 以及不同事物之间时序关系分析。时间序列通常要求数据具有等时间间隔, 以便于分析事物的时间变化规律。但遥感数据获取时受环境因素制约产生的数据缺失却增加了遥

感数据时间序列的构建难度,从而限制了遥感时序分析的应用水平(李儒等,2009)。遥感时序数据作为标准的时空大数据,其价值在于时间、空间、对象之间的关联关系(Quartulli and Olaizola, 2013),如何利用遥感时序数据进行地物识别、植被物候期变化及陆表参数间的时序关系已成为遥感应用的一个重要研究方向。

最后,山地系统是地球表层系统的重要组成部分,山地系统的变化与全球系统的变化有着密不可分的联系,同时它在全球系统变化研究过程中的作用不容忽视。目前,关于山地系统的环境变化对全球系统环境变化的影响、贡献及反馈机制等方面的研究越来越多。土地利用及土地覆盖变化作为山地环境组成系统的重要组成部分,也是研究热点。AVHRR NDVI、MODIS NDVI 和 SPOT NDVI 作为时间记录最长和时空分辨率较高数据的典型代表,是未来植被动态监测极为重要的数据源,也是目前植被研究方面应用最为广泛的植被指数数据集。选择合适的 NDVI 数据集来反演秦岭地区的植被覆盖信息,对比分析多源 NDVI 数据集在反映秦岭地区植被信息方面的差异,并建立秦岭地区更长时间的 NDVI 时间序列,可以更好地了解秦岭地区的植被发展过程,为今后秦岭地区生态环境的可持续发展提供更有利的政策制定依据具有很重要的实际意义。

1.1.2 陆表产品数据重建与时间序列分析国内外研究现状

1. 遥感数据重建国内外研究现状

遥感数据重建旨在利用多种统计和数值分析方法,模拟缺失数据或提高反演模型精度,从而实现插补缺失观测值,优化时间序列数据,为相关研究提供更加完备的基础数据(江东等,2011)。

在遥感数据重建过程中,可以看作利用已知数据来估计未知数据,而未知数据的估计是一个统计的过程。遥感数据重建方法根据其已知数据选择的不同可分为两大类:一是空间邻域数据已知,根据遥感数据间的空间关系,建立合适的空间插值模型;二是时间邻域数据已知,利用研究数据的时间变化特征,建立相应的时序重建模型。

空间插值模型建立的基本假设前提是,待估数据满足地理空间的相关性特征。常用于 NDVI 空间重建的插值方法主要包括反距离加权(IDW)、全局多项式(GPI)、普通克里格(OK)、协同克里格(CK)插值法等。Garrigues 等(2006)分析 NDVI 的变程、基台与地类之间的关系,认为农田区的变程大于林区;Tarnavsky 等(2008)则分析了不同影像空间分辨率 NDVI 的变程特征,认为 MODIS 250m 分辨率的 NDVI 平均变程是 2.5km;这说明可利用空间插值的方法进行 NDVI 数据重建。Seaquist 等(2002)利用 OK 的方法改进了 NDVI MVC 合成时间序列的精度,Berterretche 等(2005)则利用空间插值的方法重建叶面积指数(leaf area index, LAI)数据;Bhattacharjee 等(2013)对不同空间插值方法重建的遥感数据精度进行对比分析,认为 OK 的插值精度优于 IDW,且两者均优于多层神经网络的插值精度。国内学者对 NDVI 空间插值的研究较少,开展了大量与 NDVI 密切相关变量的空间插值研究。陈健等(2006)对 LAI 的空间变异性进行研究认为,随着观测尺度的增大,其块金效应逐渐增强;赵安玖等(2014)的研究发现协同克里格、回归克里格插值方法能降低 LAI 统计误差值;俞晓群和马翱慧(2013)利用 OK 的方法修复海表叶绿

素遥感缺失数据。LST 因其时空变异性强, 常从 LST 与其他因子的相关性出发, 通过建立回归模型实现 LST 数据重建。Goetz (1997) 利用多源遥感数据证实了植被指数与地表温度之间存在明显的负相关关系; Carlson 等 (1994) 和 Gillies 等 (1997) 的研究表明, NDVI 和 LST 构成的散点图呈三角形分布; Carlson 等 (1995) 进一步从理论角度出发阐明了 LST-NDVI 的梯形关系。Geiger 等 (2003) 和 Florinsky 等 (1994) 则分别研究了高程、纬度、坡向和坡度等地形因子与 LST 之间的关系, 认为高程和纬度与年均温度呈负相关关系。Duan 等 (2014) 则综合利用 NDVI 和 DEM 数据以提高 MODIS、LST 的数据重建精度, 并取得了较好的效果。柯灵红等 (2011) 利用高程与温度的回归关系重建青藏高原 MODIS 8d 地表温度产品, 并用气象站 0cm 地表温度进行验证; 孟鹏燕等 (2015) 研究复杂地形对 LST 的影响, 结果表明地表温度和 DEM 呈负相关关系, 与山体阴影呈正相关关系; 刘梅等 (2011) 利用无云区像元 NDVI-LST 的负相关关系, 基于短期 NDVI 稳定的特点, 重建临近时段云区 LST; 陈云浩等 (2005) 利用信息熵和平均梯度定量分析 NDVI、LST 和 LST/NDVI 数据在信息表达丰富度方面的差异; 钱乐祥 (2006) 对 NDVI 和两种植被丰度指标与地表温度之间的负相关关系进行了比较, 指出植被比例和地表温度间的负相关关系较为明显。韩丽娟等 (2005) 分析了 NDVI 与 LST 之间的关系, 并利用 LAI 与 LST 构成的三角形特征空间分析了 NDVI 达到饱和后 NDVI 与 LST 之间的数量关系; 余德等 (2014) 则研究了洞庭湖区地表温度与 LST 的相关关系, 结果表明冬季植被 NDVI 与 LST 相关性不明显, 而坡度、高程与 LST 呈正相关关系; 韩晓勇等 (2016) 综合利用 LST 与 NDVI、高程、经纬度的相关关系, 对秦巴山区的 LST 进行重建。张军等 (2011)、涂丽丽等 (2011) 则直接利用 IDW 和 OK 近似估算 3 种典型地表类型云覆盖区域的 LST, 结果表明较小的空间尺度 (13.5km^2) 能够保证较高的插值精度。

遥感数据时序重建要求重建的要素满足一定的时间变化规律。Holben (1986) 最早假定 NDVI 在植被生长季的满足单调增长的假设, 提出了最大值合成 (maximum value composite, MVC) 的方法, 并已被 PAL (pathfinder AVHRR land) 数据集、GIMMS (global inventory modeling and mapping studies) NDVI 数据集、SPOT VGT 产品和 MODIS NDVI 等产品集所使用; 但是这种方法只能在一定程度上减小由于大气条件影响而引起的噪声, 由其他因素引起的噪声仍然存在。目前, 时间序列数据重建方法已超过 20 种, 依据数据重建的计算方法, 可将其分为以下几类: 阈值法、滤波法、函数拟合法、综合方法及其他方法。典型的阈值法主要有最佳指数斜率提取法 (the best index slope extraction, BISE) (Viogy et al., 1992), BISE 法通过设置滑动窗口和阈值达到去除噪声点的目的, 但 BISE 算法对连续的下降点执行效率比较低, 据此 Lovel 和 Graetz (2001) 提出了修正的最佳斜率指数提取法 (modified BISE, M-BISE); 通常使用的滤波法主要有 Savitzky-Golay (S-G) 滤波 (Chen et al., 2004) 和均值迭代滤波 (mean-value iteration filter, MVI) (Ma and Veroustraete, 2006)。主要函数拟合方法有傅里叶变换 (fourier transform, FT) (Roerink et al., 2000)、谐波分析法 (harmonic analysis of time series, HANTS) (Hermance, 2007)、非对称高斯拟合法 (asymmetric gaussian model function, A-G) (Jönsson and Eklundh, 2002)、双逻辑拟合法 (double logistic function, D-L) (Beck et al., 2006) 等; 为进一步提高时间序列数据的重建效果, 有研究者提出将两种或多种重建算法相结合对时间序列数

据进行重建。Hernance 等 (2007) 较早提出 FT 与样条函数相结合的方法, 随着重建方法的不断丰富, 近年来时序重建的综合方法也有进一步发展。黎治华 (2011) 提出了 M-BISE 与 S-G 滤波相结合的方法, 分别对 MODIS 的 LST、增强植被指数 (EVI) 和 SWCI (surface water content index) 时间序列产品进行重构, 结果发现两种方法相结合对 3 种时序产品均取得较好的重构效果; Zhang 等 (2011) 将反距离权重内插 (T-IDW) 和离散小波变换 (DW-T) 方法相结合, 比较发现两种方法结合后的重建效果优于其中任意一种重建方法; 李杭燕等 (2010) 使用了标准差权重法对 5 种重建方法进行综合使用; 马明国等 (2012) 提出从分析噪声点的特性选择重建方法和根据多种方法重建结果进行噪声概率分析后再进行重建两方面来实现综合方法的发展。目前, 从时序数据滤波处理的角度开展 LST 数据重建研究, 主要是借鉴 NDVI 时序滤波的方法进行数据重建。例如, Neteler (2010) 利用 S-G 滤波的方法对意大利北部阿尔卑斯山地区的 LST 进行重建研究; 严婧等 (2014) 利用 S-G 滤波的方法进行了江苏省 MODIS LST 数据重建, 表明重建数据与实测 LST 的相关性较强; Julien 等 (2006) 使用 HANTS 变换对欧洲地区 1982 ~ 1999 年的 LST 数据进行去云重建, 并对 LST 的年际变化特征进行了分析; Xu 和 Shen (2013) 利用 HANTS 方法对长江三角洲地区的 2005 年 8d LST 合成数据进行谐波拟合, 得到重建的 LST 时间序列产品; Crosson 等 (2012) 根据 LST 的日谐波变化规律, 综合使用 MODIS Terra 和 Aqua 时点 LST 数据, 通过谐波分析对缺失时点的 LST 数据进行修复; 苏红等 (2014) 综合考虑 LST 年变化和日变化的周期性, 利用谐波分析方法对河南省 2011 年的 LST 时间序列进行拟合。

2. 遥感数据时序分析国内外研究现状

遥感数据时序分析是从遥感时序数据中提取出时间维度隐含的、未知的、有用的信息和知识。植被类型遥感识别是提取植被空间分布和长势分析及生态安全评价的基础。植被类型复杂多样, 不同类型之间存在明显的光谱重叠, 因此, 利用单一时相遥感影像数据进行作物分类时易出现“错分、漏分”现象, 很难达到理想的分类精度 (Conese and Maselli, 1991; 张焕雪等, 2015; 苗翠翠等, 2011; Knight et al., 2006)。考虑到不同植被类型随季节变化的差异, 许多学者探索利用多时相影像数据增强不同作物之间的光谱可分性, 分析不同作物的物候期规律在遥感影像上表现出的时相变化特征, 从而利用作物波谱时间效应特征实现作物遥感识别能力与分类精度的提高 (潘志强等, 2003; Zhang et al., 2003)。随着遥感数据源的不断丰富, NDVI 时间序列已经成为植被类型分类研究的热点, NDVI 时间序列数据能够精确地反映植被物候信息, 不同植被类型在其生长周期内拥有不同 NDVI 时间序列特征, 如落叶林表现为振幅较大的单峰曲线, 一年两熟的农田则为双峰值曲线, 可用植被自有的时间序列特征进行植被信息的识别, 有效削弱“同物异谱, 同谱异物”现象, 在植被分类研究中发挥了重要作用 (郑长春等, 2009; Nuarsa et al., 2012)。Hansen 等 (2000) 利用 AVHRR 遥感数据对地表植被分类进行研究; Jakubauskas 等 (2002) 使用 AVHRR NDVI 时间序列数据, 根据不同作物的生长过程特征进行玉米、大豆和苜蓿作物制图, 但是分类精度相对较低; Muchoney 等 (2000) 对美国中部地区应用 MODIS 数据进行土地覆盖分类, 同时比较了最大似然法、决策树、神经网络等不同分类算法的精度; Geerken 等 (2005) 利用傅里叶滤波对 NDVI 时间序列进行重

构,使用相似性度量方法对草地植被类型进行提取;Wardlow等(2007)通过构建MODIS NDVI时间序列决策树来提取美国中部的农作物信息,总体精度达84%以上。那晓东等(2007)将离散傅里叶变换应用于NDVI时间序列重构,采用傅里叶组分相似度分类方法提取三江平原湿地植被分布数据,总体分类精度达到79.67%,Kappa系数为0.7525;徐晓桃等(2008)基于单时相MODIS数据进行土地覆盖自动分类时,应用了最大似然法、BP神经网络及基于See5.0的决策树分类方法;Peng等(2011)利用水稻灌水期NDVI时序特征提取了湖南省水稻种植面积。管续栋等(2014)对MODIS NDVI时间序列进行去噪后,引入动态时间规整(dynamic time warping, DTW)距离相似性方法,分类提取泰国东北部地区单季稻、双季稻的面积,总体正确分类精度为83.38%。LST的空间分布受到土地利用类型的影响,土地使用类型的改变会影响LST的空间分布特征。Van等(2015)对越南红河三角洲2002~2012年不同地类的LST特征进行分析,显示林地、湿地的LST呈缓慢降低的趋势,而农田和城市的地温增长较快;许娟等(2015)对成都地区的LST与NDVI,归一化建筑指数和归一化水汽指数的相关性进行分析认为,后两个指数可作为城市热岛分析中NDVI的补充;李栋梁等(2005)研究了青藏高原区LST随高程、经纬度的变化特征;此外,学者还综合分析LST随NDVI、经纬度、地类和高程变化的关系(Voogt and Oke, 2003; 侯光雷等, 2010; 于晓静等, 2012)。

3. 几种不同遥感数据在植被覆盖变化研究中的应用现状

NOAA/AVHRR NDVI 现已有 20 多年的长时间连续序列的数据,自从 20 世纪 90 年代 Terra、MODIS 卫星成功以来,MODIS NDVI 作为 NOAA/AVHRR NDVI 的继承产品,已有逐步取代之的趋势。除此之外,作为植被研究设计的专门产品 SPOT-VEGETATION NDVI 数据在植被研究中也得到了广泛的应用(严晓瑜, 2008)。但是由于 MODIS NDVI 和 SPOT NDVI 数据的累积时间较短,这在植被指数研究时,尤其是需要很长时间的序列资料时就不能够满足需求,在这种情况下,长时间序列的 AVHRR NDVI 就具有了两者不具备的优势。但是由于 NOAA-AVHRR NDVI 数据相比于 MODIS NDVI 和 SPOT NDVI 数据,其时间、空间、光谱和辐射的分辨率都不相同,以及获取影像后的大气矫正和辐射纠正的一些预处理的方式有所不同(严晓瑜, 2008),三种数据间存在的这些差异会对后续的植被研究造成什么影响呢?这些不同序列的数据集之间会不会存在一致性呢?它们之间是否存在一定的关系和差异呢?能不能将这些不同的数据集进行整合,从而更适合植被指数的研究呢?这些问题的答案都是地表覆盖长时间监测能否持续进行的关键。关于这些问题,国内外已经有了很多这方面的研究。Fensholt 和 Proud (2012)对比了 AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 在反映全球植被变化趋势方面的能力,它们的研究结果表明,AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 两种数据在总体上是一致的,植被的变化趋势基本一致,与地面实测的数据对比后发现,尤其是在半干旱地区 AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 数据之间的一致性更好(Fensholt et al., 2009; Fensholt and Rasmussen, 2011)。Gallo 等(2005)对比了美国相同时间段内不同植被类型的 NOAA/AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 数据,研究结果表明,在合成时间段内,两种 16d 的合成数据很相似,存在明显的线性相关关系,这就说明不同传感器数据之间可以建立长时间的 NDVI 序列。Chen 等(2006)对比分析了由 MODIS NDVI 与 SPOT/VEGETATION NDVI 对墨西哥地区玉米生长研究的适用性,研究结果表明,运用

双向反射法合成的 SPOT NDVI 和玉米的实际生长状况相比于 MODIS NDVI 更吻合, 在玉米种植以后 30d MODIS NDVI 就开始出现饱和现象, MODIS NDVI 值与 4 月的玉米凋亡期的实际状况相吻合, 运用最大值合成法合成的 SPOT NDVI 值却有一个接近 80d 的稳定期, 这就会丧失很多玉米从营养期到繁殖期这一过渡阶段的信息, 而 MODIS NDVI 250m 分辨率的数据相比于 500m 和 1000m 的数据对玉米生长的描述并不能提供更精确的信息。

国内也有关于这方面的研究。杜加强等 (2014) 对比分析了青藏高原整体、亚区域、植被类型和像元尺度 AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 数据的数值差异和动态变化的一致性, 并使用 Landsat 数据计算的 NDVI 对两种数据的性能进行了评估。研究表明, 两种数据捕获青藏高原月尺度物候变化的能力基本相同, 但不同植被类型间两种数据的差异性显著, 植被高覆盖的林地一致性较差, 而均质化较强的草地和农田的一致性较强, 在像元尺度上具有显著的一致性; 在反映植被的空间分布方面, MODIS NDVI 的数值更接近于 Landsat NDVI, 而在植被动态变化上, AVHRR NDVI 与 Landsat NDVI 更接近, 不同植被类型之间的差异显著, 林地 MODIS 与 Landsat 的一致性更好, 而草地和农田则是 AVHRR NDVI 更好。融合两种数据, 并建立一致的 NDVI 数据序列数据是可行的。韩鹏等 (2014) 对比分析了 AVHRR、SPOT VGT 和 MODIS NDVI 三种数据在延河流域植被变化的一致性和差异性, 研究表明, SPOT VGT NDVI 和 MODIS NDVI 的相似性、一致性较强, AVHRR NDVI 与 SPOT NDVI 和 MODIS NDVI 之间存在较大的差异。为了能够建立长时间的 NDVI 序列, 他提出运用一定的修正方法, 利用 SPOT NDVI 对 AVHRR NDVI 进行修正, 修正结果显示, 修正后的 AVHRR NDVI 与 SPOT NDVI 和 MODIS NDVI 的相关性显著, 因此, 可通过修正法进行 AVHRR NDVI 时间序列的扩展。

4. 现有研究存在的不足

(1) 国内外学者对于遥感数据重建开展了大量研究, 空间插值重建算法是以空间的相关性为假设前提, 时序重建则以遥感数据的时间变化规律为基本前提, 最终的插值结果在空间或时间上是平滑的结果, 却对数据的时空变异特征的考虑不足。当前 NDVI 数据重建使用较多的是时序重建, 但序列中数据缺失期数所占比例不同, 会影响重建后的保真效果, 尤其是在时序中特征时点 (极大值、极小值等拐点) 数据缺失时的影响较大。这也意味着时序重建的方法的优势在于降噪, 对于数据缺失期的插值保真度较差 (卫伟等, 2014; 耿立英和马明国, 2014)。为此可利用空间插值的方法先减少数据缺失期占比, 再根据应用目的选择合适时序滤波方法对空间插值数据进行进一步修正。

LST 数据的时序重建大多直接借用 NDVI 重建方法, 但 LST 的时空变异特征要远强于 NDVI, 这类算法会丢失 LST 的突变信息, 适用性受到限制。此外, LST 受到所处地理位置、地表覆盖、太阳辐照等诸多因素的影响, 仅考虑高程或 NDVI 与 LST 的回归关系, 则使 LST 的回归模型限制在与某一固定因素的关系, 在长时间序列重建中难以保证模型的稳健性。此外, 现有的 LST 重建模型大多未考虑云覆盖时日照受限对 LST 的影响, 限制了 LST 重建数据的精度。

(2) 目前, NDVI 时序分析主要集中在植被物候期和植被类型识别领域, 主要以阈值判别的方法进行分析 (Estel et al., 2015)。但是不同年度 NDVI 时序曲线经常存在时序扭曲的现象, 即不同年度之间 NDVI 开始增长、达到极值、开始衰减、结束衰减的时间和强

度通常不相同,从而严重影响了现有 NDVI 时序数据植被特征提取的效果。常出现本年度建立的植被生长曲线,用于其他年度植被特征提取时效果不佳,而对历史数据又难以进行实地采样,为此有学者(管续栋等,2014)引入了动态时间规整(dynamic time warping, DTW)距离的方法来提高植被生长曲线的通用性,但此方法的计算效率和使用精度仍需提高。

当前,LST 时序分析主要以不同区域 LST 时序变化特征研究为主,对 LST 与 NDVI 之间关系的研究仍停留在同期相关性分析的阶段,尚未有两者之间时滞关系的研究,尚未开展某期 LST (NDVI) 对此后几期 NDVI (LST) 是否存在影响及影响规律的研究,时滞关系的研究可为二者的预测分析提供理论基础。

1.1.3 陆表数据重建与时间序列分析研究内容

研究区域按行政区划包括山东、河南、陕西和宁夏四省(自治区)及四川、重庆、湖北、甘肃、山西和河北六省(市)大部分区域,以及辽宁、江苏、安徽、青海和西藏部分区域,有效值覆盖的空间范围约为 246 万 km^2 ;选择 MODIS 陆表产品中 NDVI 和 LST 两种代表性数据作为数据重建和时间序列分析的研究对象。NDVI 作为时序规律性变化的数据代表,在植被的一个生长周期中的不同阶段呈现不同的变化规律,设计合适的重建算法来提高 NDVI 的时间分辨率。此外,NDVI 还是 LST 重建的基础数据;LST 则代表了时空变异性强,易受所处环境影响的数据,使用中其更关注的是其均值变化,设计此类数据的重建模型对水分指数、蒸腾作用等与 LST 密切相关的陆表数据重建具有借鉴意义。

数据重建的目的是提高遥感数据的应用水平,探求它们时间维度隐藏的信息。因此,针对不同年度 NDVI 时序曲线经常存在的时序扭曲的现象,引入 DTW 距离的方法对 NDVI 重建时序数据进行植被信息提取,并判断该方法适用于无采样数据年度 NDVI 时序数据植被信息提取效果;对不同高程、不同地类的 LST 特征进行特征分析,并对不同地类间地温差异和季节因子进行分析,探求在气候变暖的背景下研究区内地表温度的时空特征;地表温度直接影响植被的生长发育,利用自向量回归的方法对不同地类的 LST 和 NDVI 时间序列进行时滞关系分析,研究 LST (NDVI) 对此后几期的 NDVI (LST) 是否存在影响及影响规律,探求它们时间维度的隐含信息。

1.1.4 秦岭地区植被覆盖变化研究现状

秦岭作为黄河和长江两大水系的分水岭,是中国亚热带向暖温带过渡的地带,在 1959 年被正式提出,从此秦岭被认为是我国南北的自然地理分界线。由于秦岭地区的地理位置独特,植被类型多样,物种丰富,因此,秦岭地区的植被覆盖变化研究很早就引起了一些学者的关注。秦岭地区的植被研究最早开始于 19 世纪末到 20 世纪初期,1947 年钟补求学者完成并发表了《秦岭之植被地理概观》(钟补求,1947);1949 年崔友文学者开始了首次对华山的植被区系的全面研究,并且发表了关于华山植被的种类、形态特征与分布的相关论文。关于秦岭地区植被有组织的研究正式开始于 20 世纪 50 年代,1950 年后各个植被