

第二章 研究进展

第一节 生态系统服务研究进展

1935 年 Tasley A. G. 提出了生态系统的概念;1981 年,著名生态学家 Ehrilshi P. 在研究生态系统对土壤肥力与基因库维持的作用以及生物多样性的丧失对生态系统的影响时,首次使用了“生态系统服务”一词(谢高地 等,2006)。1992 年,Gordon Irene 的《自然服务》一书论述了不同生态系统对人类生产生活带来的影响。1995 年,Costanza R. 等将全球生态系统服务划分为 17 类,1997 年,由 Gretch Daily 等编著的《生态系统服务功能》一书,阐述了生态系统服务功能的内容与评价方法,分析了不同地区森林、湿地、海岸等生态系统服务功能评价的近 20 例实例(Costanza et al.,1989;Daily,2000)。此后,学者们从不同学科角度对生态系统与人类的关系开展了大量相关研究工作(辛琨 等,2000)。

一、生态系统服务功能概念

自然生态系统作为地球生命保障系统,持续以直接和间接福利的形式为人类提供生态系统服务功能,其中直接福利包括人类赖以生存的物质、能量等,间接福利包括土壤保持、气候调节、气体调节、废物调节、生物多样性维持等服务(Kremen et al.,2007;Palm et al.,2014;Powlson et al.,2011);然而自然生态系统对人类社会的效用往往会被低估(Costanza,1997),尤其是间接福利部分。

目前,被普遍认可的生态系统服务概念是 Daly 等(1997)提出的。他认为生态系统服务功能是生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用。生态系统服务是人类赖以生存的基础,与人类福利息息相关。自“环境服务功能”被提出,经众多学者的拓展和补充,将其确定为“生态系统服务”。之后,联合国实施了千年生态系统评估计划,随着人们对生态系统服务理解的不断加深,生态系统服务的研究成为热点(MEA,2005;冯伟林 等,2013;杨光梅 等,2006)。

二、生态系统服务功能分类

Daily(2000)主要从生态学基础的角度探讨生态系统服务及其价值,并将生态系统服务功能分为 13 类;Costanza 等(1989,1997)则更多从功能的角度用经济学的思想去研究生态系统服务的经济价值,并将生态系统服务功能细分为 17 类,探讨评价

的方法与技术。目前国际上较有影响力的是千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MEA)的界定, MEA 将 Costanza 提出的 17 类生态系统服务功能进一步归并为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 大类。欧阳志云等(1999)基于 Daily 的界定认为生态系统服务功能的内涵包括 8 个方面, 并将生态系统服务功能的价值分类为直接利用价值、间接利用价值、选择价值和存在价值。谢高地等(2001, 2008)在 MEA 界定的 4 大类生态系统服务功能的基础上, 结合专家知识将生态系统服务功能分为 9 小类; 并于 2015 年基于文献调研、专家知识、统计资料和遥感监测等数据源将生态系统服务功能进一步改进为 11 小类(谢高地等, 2015)。总体来说, 目前对于生态系统服务的分类众说纷纭, 应用最为广泛的是千年生态系统评估提出的, 将生态系统服务分为供给、调节、文化和支持服务 4 类(范玉龙等, 2016; Deng et al., 2013)。

三、生态系统服务功能评估

研究者们使用较多的量化方法有价值法、能值法、替代法和支付补偿意愿法等。1997 年 Costanza 等(1997)利用价值法估算了全球不同土地利用类型的各项生态服务功能的经济价值。Farber 等(2002)详细阐述了利用价值法和支付补偿意愿等方法量化生态系统服务经济价值和生态价值的原理和发展历史。吴玲玲等(2003)利用市场价值法、造林成本法、影子工程法、费用替代法以及专家评估法等方法, 对长江口湿地生态价值进行了评估。Barkmann 等(2008)利用的支付意愿的偏好方法(stated preference methods)评价了不同类型的生态服务功能。Zhang 等(2010)系统地介绍了中国学者们利用价值法、能值法和支付补偿意愿法等方法进行生态系统服务研究的进展。谢正宇等(2011)采用市场价值法、替代法、碳税法、费用支出法等方法量化了新疆艾比湖湿地自然保护区的生态系统服务功能。付意成等(2013)从可更新资源、不可更新资源、物质投入、服务成本的能值计算出发得出永定河流域农业生产的总能值, 并估算其生态服务价值。魏玲等(2014)采用问卷调查法, 获取了城市和农村居民对生态服务的支付补偿意愿, 并评估了耕地的生态系统服务价值。谢高地等(2015)基于文献调研、专家知识、统计资料和遥感监测等数据源, 对 2008 年提出的基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法进行了改进。

生态系统服务功能评估模型是以已有的理论和研究成果为基础构建, 用于评价多种生态系统服务功能。黄从红等(2013)详细介绍了 10 种生态服务评估模型, 即 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型、ARIES 模型、SolVES 模型、MIMES 模型、EPM 模型、InFOREST 模型、Envision 模型、EcoMetric 模型、EcoAIM 模型、ESValue 模型。在此基础上, 探讨了评估模型的适用范围、数据需求以及模型评估结果的不确定性问题, 为生态系统服务功能评估模型的引进以及在国内的应用提供了参考。

目前,InVEST 模型在国内外的运用比较广泛。该模型是美国斯坦福大学、大自然保护协会(The Nature Conservancy,TNC)和世界自然基金会合作联合开发的、免费开源的、用以量化多种生态系统服务功能的评估模型(Kareiva,2011)。该模型被运用于生物多样性、生态环境、水利水电、土地资源等不同的领域,旨在探索生态系统的变化如何引起人类利益的变化(Nelson,2009;Palacios-Agundez,2015;Kovacs,2013)。InVEST 模型包括生物多样性、碳储量和碳汇、作物授粉、木材收获管理、水库水力发电量、水土保持、水体净化等子模块(吴哲等,2013)。

InVEST 模型在国外的应用研究相对成熟,已广泛应用于美国加利福尼亚州、明尼苏达州、夏威夷群岛和西海岸,以及拉丁美洲的亚马孙流域、亚洲印度尼西亚和非洲坦桑尼亚等多个区域。例如,Haunreiter(2008)应用 InVEST 模型中的产水量、营养物截留量、碳储量和生物多样性等模块对内华达山脉进行了较详尽的生态系统服务功能的评价。Sanchez-Canales 等(2012)针对地中海区域的季节性降水分布、年降水量、年度蒸散 3 个主要模型参数,开展了敏感性分析,并探究了敏感因子在子流域内的空间分布特征等。

InVEST 模型在国内的运用相当广泛。研究者们主要从人类活动和自然条件变化两个角度探讨土地利用变化、水土条件变化、人口增长、城镇化、气候变化等因素对生态系统服务功能的影响。例如,Metzger 等(2006)分析了土地利用变化对耕地、林地等生态系统的服务功能的影响;冉圣宏等(2006)根据实际情况对不同土地利用类型单位面积生态服务价值进行校正,并发现 1996—2004 年土地利用规划实施以来全国土地利用变化导致生态服务功能整体增加了 0.91%;Polasky 等(2011)利用 InVEST 模型评价了土地利用变化对生态系统的生物多样性的影响;Deng 等(2014)分析了未来气候变化、城镇化等因素引起的潜在大尺度土地利用变化对水土保持、碳储存、生物多样性保持等生态服务功能的影响;王原等(2014)基于生态服务价值当量表分析了 1976—2007 年纳木错流域生态系统服务价值的变化规律,探讨了高原湖泊流域生态服务价值对 LUCC 的响应;曹生奎等(2014)认为,人类活动行为和气候变化共同驱动了青海湖湿地生态系统服务价值的动态变化;Jiang 等(2015)模拟了不同气候变化情景下生态服务功能的变化;Song 等(2015)评价了由于快速城镇化引起的耕地流失对耕地生态服务功能的影响。

此外,吴哲(2013)、唐尧等(2015)对 InVEST 模型的基本原理和研究进展进行了详细的阐述;张灿强等(2012)采用产水量模块预测了西苕溪流域产水量,并基于多年实测数据对模型参数进行了精确校正;潘韬等(2013)基于 InVEST 模型定量估算了三江源区生态系统的水源供给量,探讨了三江源区降水和径流系数的变化规律,并分析了不同时期水源供给量的时空变化特征及其成因;包玉斌等(2015)运用 InVEST 模型分析了土地利用变化对生境质量的影响。总体上,InVEST 模型的功能比较全面,可以有效评估土地利用、气候变化等对多种生态系统服务功能的影响。

四、生态系统服务功能权衡研究

生态系统具有多种功能性,它不仅为人类社会提供了丰厚的社会经济效益,而且具有极高的生态效益,对维持生态平衡、保护生物多样性和珍稀物种资源以及涵养水源、蓄洪防旱、降解污染等都起到了重要作用(谢高地等,2001;张志强,2001)。生态系统服务功能权衡(tradeoffs)是指某些类型生态系统服务的供给,由于其他类型生态系统服务使用的增加而导致其他功能减少的状况(傅伯杰等,2016;戴尔阜等,2016)。生态系统服务功能种类繁多,彼此之间相互影响、相互制约(曹祺文等,2016)。生态系统服务的多样性与人类使用的选择性,导致了生态系统服务功能之间此消彼长的权衡关系或协同增益关系(Adams et al.,2004;Barrett,2011)。

生态系统服务是一个复杂的生态过程,不同生态系统服务之间存在着明显的权衡,且生态系统服务之间的权衡关系不是固定不变的,具有空间异质性和时间动态性。正确认识生态系统各项生态系统服务之间的相互关系、影响机制、驱动因素、变化特征,对生态系统服务功能的权衡研究有重要意义(Barbier et al.,2008;Rodríguez et al.,2005)。要想同时兼顾各种生态系统服务,就要深入了解不同服务相互关联和作用机制,并准确地比较它们之间的关系。深刻地理解和准确地解释生态系统服务之间的权衡关系,是实现人类福祉提升与生态系统可持续发展的“双赢”目标的科学基础(Faith等,2010;Smith等,2013)。目前,生态系统服务之间的冲突权衡研究尚处于起步阶段,未来的研究将具有重大的意义和潜力。近年来,权衡分析已成为国际上生态系统服务研究领域的热点之一。

目前,对生态服务功能权衡的研究主要分为以下四个方面。

1. 生态系统服务功能之间的相互作用

生态系统服务表现出复杂的、动态的、非线性的变化关系(Farber et al.,2002;Jaarsveld et al.,2005)。例如,Maskell等(2013)通过制图以及相关分析研究土壤碳储量和净初级生产力(Net Primary Production,NPP)的关系,研究表明两者之间存在协同关系;Chisholm等(2010)研究发现水量供给和固碳之间存在权衡关系,并建立了动态的生态-经济模型研究碳储量的增加对产水量带来的损失;Onaindia等(2013)利用GIS技术对西班牙北部生物圈保护区的生物多样性、碳贮存以及径流调节3种生态系统服务进行空间制图,通过分析其空间分布的一致性,确定了3种服务的权衡与协同关系。Swallow等(2009)利用线性回归分析和基本的描述性统计方法定量分析了生态系统服务之间的权衡关系。

2. 生态系统服务功能权衡机制的研究

Wang等(2015)定量分析了三江源生态系统服务功能,发现湿地向耕地的转移虽然增加了粮食的产量,但导致了该区域的碳储量和生物多样性的巨大损失。Bry-

an 等(2013)发现市场激励政策和措施如商品市场、碳税、水总量管制与交易、生物多样性拍卖、生物质能源市场化等可通过土地利用的传导作用最终影响生态系统服务的权衡与协同。Nelson 等(2008)通过研究明确了全球土地利用变化会对生态系统服务和生物多样性带来影响。李晶等(2016)以关天经济区为主要研究对象,计算了关天经济区生态系统 NPP、固碳释氧、水文调节、水土保持、粮食生产等生态系统服务价值,利用 ESCI(生态服务变化指数)和 ESSI(生态服务指数)两个指数研究了生态系统服务价值时空变化,并运用相关系数和空间制图的方法研究了它们之间的相互权衡协同关系。

3. 生态系统服务功能尺度效应

生态系统服务功能存在明显的尺度效应,不同的时空尺度,自然与社会经济条件存在差异,导致生态系统服务功能的类型、供需能力、空间特征和相互作用均有一定的差异(Rodríguez et al., 2012; Peng, 2012)。Nan Lu 等(2014)发现,黄土高原各项生态系统服务之间关系复杂,并伴随着显著的地区和梯度差异,生物多样性与土壤水含量之间存在很高的权衡,土壤有机碳含量与总营养物质含量存在很低的权衡。Turner 等(2014)运用空间自相关方法研究丹麦地区 11 种生态系统服务的尺度特征,发现畜牧生产、粮食生产和淡水供给服务在 150km 的空间范围内为聚集分布,其他 8 种生态系统服务在 50km 的空间范围内为聚集分布。Tallis 等(2009)指出,确定不同尺度下生态服务功能之间的权衡,可以以一个清楚的方式传达信息,并通过地理、生态和社会经济规模对生态系统服务提供决策框架,此外,还可以促进科学家和政策制定者更好地了解在土地利用管理过程中生态系统服务权衡的潜在后果。

4. 生态系统服务功能情景模拟

生态系统服务功能权衡的目标是使所有生态系统服务的总体效益最佳(Hua et al., 2013)。情景模拟分析是目前权衡与协同研究最为常见的一种方法,即通过制定若干的规则,分析生态系统服务的动态变化,寻求最优的发展方式。研究者致力于寻求生态系统服务之间协同增益发展的最佳社会经济发展与土地利用变化情景。Bai 等(2011)应用 InVEST 模型分析了河北白洋淀地区在无农用地转换、无城市扩张、农业发展、林业发展以及河岸造林五种情景下农业生产、水电生产和水质维持三种生态系统服务的权衡关系,并寻找最优的生态与经济协调的土地利用方案。杨晓楠等(2015)引入玫瑰图以及生产可能性边界方法研究了生态系统服务之间的权衡和协同关系,并开展了土地利用情景模拟研究,寻求生态服务功能最优的土地利用结构方案。葛菁等(2012)评估了不同土地覆被格局情景下的多种生态服务的响应和权衡,研究生态系统减轻水库泥沙淤积、减轻水库面源污染、产水发电服务及价值对未来覆被格局的响应程度,并兼顾相关产业收益的变化,权衡各种情景格局的服务效益,优选利益相关方福祉提升幅度最大的情景格局。

第二节 气候变化对社会经济系统影响的研究进展

一、气候变化对自然环境影响的研究进展

(一)气候变化对植被分布的影响

20 世纪 70 年代以来,人类活动对气候及陆地生态环境的改变日趋增强,严重影响了人类生存和自然生态环境的发展(易浪 等,2014)。植被的生长离不开大气、水和土壤等自然生态环境,因此,植被覆盖也是反映局部气候变化的重要“指示器”(孙红雨,1998)。植被覆盖变化与气候变化之间相互作用的机制已成为国内外研究热点。“全球变化与陆地生态系统(GCTE)”作为国际地圈-生物圈计划(IGBP)中的核心项目之一,已极大推动了气候变化、人类活动等对陆地生态系统影响的相关研究。目前,相关研究主要集中于气候变化对植被生物量和物候变化的影响两个方面。

1. 气候变化对植被生物量的影响

气候变化带来的水热分布的变化直接影响了植被的生长,研究中通常选择植被分布范围、净初级生产力(NPP)、叶面积指数(LAI)和盖度等指标表征植被生长状况(曾彪,2008;Cao et al.,1998;TIAN,1999;Melillo et al.,1993;Keeling et al.,1996)。近年来的研究表明,在 1982—2011 年的 30 年间,北半球的高纬度地区出现了地表温度趋暖、无冰水面增多以及植被活动增加等现象(Bhatt et al.,2013;Tucker et al.,2001)。一方面是由于 CO_2 浓度增加的同时氮和磷浓度下降,另一方面则是地表温度升高也会带来植被物候期的提前或延后(Bhatt et al.,2013;Tucker et al.,2001)。Bhatt 等(2013)基于 GIMMS、SSM/I 和 AVHRR 等数据,研究了 1982—2011 年间气候变化对北极冻土地带植被的影响;在 1982—2011 年间夏季(5—8 月)高纬度较低纬度地区其海冰减少的趋势更强。Rossi 等(2011,2014)认为,持续的气候升温延长了生长季,将会有利于黑云杉净初级生产力的累积,而 Girardin 等(2016)研究发现,气候升温虽然增加植被 NPP,但植被 NPP 的累积也将同时受到土壤水分的有效性、植被呼吸(以及对增温的适应)、二氧化碳施肥等因素的抑制。

在区域尺度上,相同的气候背景下不同的植被类型对气候变化的响应则不同。Pouliot 等(2009)基于 AVHRR 和 Landsat 数据对 1985—2006 年间加拿大地区黑云杉的归一化指数(NDVI)的变化趋势进行分析,结果表明加拿大地区的北部是 NDVI 增加主要区域,且主要受到气候变化的影响,而南部地区的增加趋势则主要受到土地利用变化的影响。Silva 等(2010)分析了位于加拿大东南部安大略省森林(包含黑云杉、红松木、红橡木、红枫等类型)在 1950—2007 年间对气候变化响应,虽大气中 CO_2 含量呈增加趋势,提高了树木对水分利用效率(WUE),但其断面积生长量(BAI)

仍呈缓慢下降的趋势。同时气候变化带来的极端天气状况同样对植被生物量有影响,如干旱、洪涝、高温热浪和低温冷害等(Gobron et al., 2010; Pan et al., 2015)。

在中国,Piao等(2005)的研究发现,气温和太阳辐射的增加使得在东南和西南季风区域植被的NPP有较大增加;从不同季节上看,春季是NPP增加幅度最大的季节;国家尺度上,在1982—1999年近20年内受到气候变化的影响,约有86%面积的植被NPP以年均1.03%的幅度增加。从不同区域尺度上,Li等(2014)对1982—2006年间内蒙古锡林郭勒地区的沙漠草原进行时研究发现,气候增温有利于草原植被的生长,而受到人类活动的影响,在5—6月间水资源紧缺对植被生长具有明显的抑制作用。Lin等(2016)分析了气候变化对湖北省生态环境因子(GPP、NPP和LAI)的影响机制,研究得出在2000—2010年间气温对生态环境影响作用高于降水的影响。

2. 气候变化对植被物候期的影响

气候变化除了对植被生物量有重要影响外,植被生长的物候期亦是对气候变化的另一种响应形式。植物物候是指植物受气候和其他环境因子的影响而出现的以年为周期的自然现象,包括植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等(Menzel et al., 2016),是植物长期适应季节性变化的环境而形成的生长发育节律(Abu-Asab et al., 2016)。气候因子中气温、日照和水分均对植物的物候期有影响(李荣平等,2006)。

气温是影响植物物候期变化的重要因子,大量研究表明,植被有在春季物候提前且生长季延长的趋势(Myneni et al., 1997; Julien et al., 2009)。Julien和Sobrino(2009)的研究表明,全球范围内春季物候平均提前3.8d/10a,而植物的生长季平均延长8d/10a。Sparks(2000)对不列颠群岛11个物种在1891—1948年间在气候增温的背景下,气温升高2.5℃,植物开花期将提前5~25d。同样的物候变化趋势也出现在中国(张学霞等,2004;王炳赟等,2011;顾润源等,2012;宋春桥等,2012;谢宝妮等,2015;肖登攀等,2012)。宋春桥等(2012)研究认为,藏北高原在气温升高的背景下典型植被均表现出返青期提前7.2~15.5d/10a,生长季延长8.4~19.2d/10a的趋势。谢宝妮等(2015)研究认为,黄土高原1982—2011年间春季物候提前5.4d/10a且秋季物候推迟7.4d/10a;肖登攀和陶福祿(2012)的研究认为,华北平原出现开花期和成熟期提前的物候变化趋势,且气候变化是物候变化的主要驱动因子。植被具有光敏色素,部分植物物候对光照的敏感程度高于温度,一般而言,光照时间缩短使得短日照植物开花期提前,而延长光照时间则延迟花期(陆佩玲等,2006)。

水分是影响植物物候期的另一重要因子。许多研究结果表明,干旱会限制植物生长发育,延迟发育的物候期。McLaren等(2005)对牙买加热带季雨林的开花、结果期进行研究发现,季节性降雨以及随之变化的土壤可用水含量是植物开花期物候变化的直接原因。Walker等(1995)研究认为,高山植物生长的物候的变化受降水量和融雪量的影响,因为融雪的日期的变化将引起养分有效性、土壤湿度、温度等因素变化,从而影响植物物候。

(二)气候变化对水资源分布的影响

水是大气环流和水文循环中的重要因子,气候变化引起全球水文循环的变化,使得水资源在时空上重新分配(李峰平 等,2013)。自 20 世纪 70 年代以来,世界气象组织(WMO)、国际科学理事会(ICSU)、联合国环境规划署(UNEP)等诸多国际组织相继开展了关于气候变化对水资源影响的项目和计划(表 2-1)。

表 2-1 国外关于气候变化水文水资源影响研究的重要会议

发展阶段	时间	相关组织或会议	具体内容
20 世纪 70 年代后期 (起步阶段)	1977 年	WMO、ICSU、UNEP、 IAHS 等	开展实施世界气候变化(WCP)、全球能量 与水循环实验(GEWEX)等科研计划
		USNA	组织气候变化与供给水之间相互关系及其 影响讨论会
20 世纪 80 年代以来 (社会高度重视)	1985 年	WMO	气候变化对水文水资源影响的综述报告
	1987 年		水文水资源对气候变化的敏感性分析
	1987 年	第十九届 IUGG 大会	举办“气候变化和气候波动对水文水资源 影响”专题讨论会
	1988 年	WMO 和 UNEP	共同组建成立政府间气候变化专门委员会 (IPCC)
	1990— 2007 年	IPCC	完成四次评估报告,深入分析气候变化对 水文水资源的影响
	1991 年	第二十届 IUGG 大会	以土壤-大气之间相互作用的水文过程作 为主题
	1992 年	里约热内卢环境发展大会	发表《21 世纪议程》,指出气候变化对水文 水资源的影响问题应给予全球性关注
	2001 年	荷兰 IGBP 大会	均设立专题讨论气候变化对水文水资源的 影响
	2004 年	巴西 IAHS 大会	讨论了关于气候变化对水文水资源影响研 究的问题
	2006 年	第三届水资源管理论坛 第四届世界水论坛	
	2007 年	IUGG 国际大会	
	2009 年	第五届世界水论坛	集中讨论了全球气候变化的影响及对策
	2012 年	第六届世界水论坛	举办“水和适应气候变化”高层圆桌会议

注:引自李峰平等(2013)。

为分析在时空尺度上气候变化对水资源要素演变规律,研究人员多基于长时序数据对水资源要素的变化趋势、周期特征以及空间分异等进行研究。早在 1979 年,

Stockton 等(1979)利用经验验证法评价了气温、降水变化对水文因子(径流量、径流系数等)的影响。Arnell 等(2015)总结了气候变化对水环境的主要影响,包含水量、物理、化学和生物性质等四大方面;在气候变化的背景下,辐射和蒸发热通量等发生变化,使得水温变化进而对水体的化学、生物以及物理等性质产生影响。Orr 等(2015)利用英格兰和威尔士地区 2773 个水文站点观测 1990—2006 年间水体温度的变化情况,发现约 86% 的站点数据其水温在升高。Jones 等(2010)认为冬季和夜间气温对湖水温度的改变影响最大。此外,由于气候变化改变了水环境的各项物理性质,因而河道、湖泊及河口中的沉积物及对泥土侵蚀作用也会发生变化,河流形态也随之发生变化(Arnell et al., 2015)。

气候变化除了对水体温度产生影响外,气温升高带来的冰川融雪使得全球海平面上升。Ferguson 和 Gleeson(2012)认为海平面上升对低水力梯度的海岸而言更易受到海水入侵,使得海岸含水层含盐量增高,同时人类对于地下水的开采以及水力梯度对此也有影响(图 2-1)。

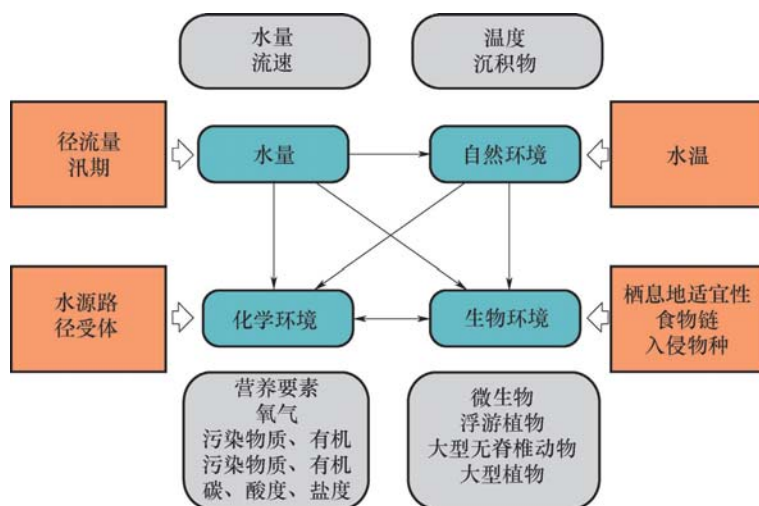


图 2-1 气候变化对水环境的影响(Arnell, 2015)

(三) 气候变化对生态环境的影响

气候变化影响生态环境,会引起气象灾害频繁发生、草场退化、土地沙化、湖泊水位下降和河流流量减少等生态环境退化现象,尤其是生态脆弱区对气候变化敏感(戴虎德 等, 2012),关于气候变化对生态环境的影响主要集中于两个方面。一是气候变化对生态脆弱区的影响,戴建明等(2010)研究发现,博州地区山区、平原和荒漠区普遍存在升温的趋势,并且平原地区的升温比较明显,同时降雨量也呈上升趋势,目前的生态环境正日益恶化;徐贵青等(2004)研究新疆地区气候变化对生态环境的影响,发现该地区沙尘暴发生日数和大风发生日数在波动中减少,温度的升高和局

部地区的降雨增加,对新疆地区生态环境的影响加大;李林等(2004)通过研究得到在气候干旱化和人为活动的共同影响下,三江源地区出现了草场退化、湖泊萎缩、河流流量减少、土壤沙化和水土流失等生态环境荒漠化问题。二是气候变化对生态系统的影响评估及应对措施,樊启顺等(2005)对气候变化对青藏高原植被、冰雪融水、土地沙漠化的影响进行了评价,并分析了青藏高原未来气候变化以及其对生态环境带来的影响;欧英娟等(2012)分析了气候变化对森林、草原和湿地等典型陆地生态系统的影响,提出了适宜的减缓对策。

二、气候变化对社会经济系统影响的研究进展

国内外关于气候变化对社会经济系统影响方面的研究还处于起步阶段(Gulyas et al., 2011; Gasper et al., 2011; Esperon-Rodriguez et al., 2016; Kuosmanen et al., 2009; Scrieciu et al., 2013)。气候变化对区域社会经济系统的影响大小取决于该区的地理位置、气候变化适应能力、经济发展状况、文化、政治和人口等诸多因素。对发展中国家的生态脆弱地区而言,通常也是经济贫困地区,其农业活动极大地依赖于自然条件,对气候变化的适应能力较弱,社会经济更易受到影响。气候变化对社会经济系统的影响涉及诸多方面。

(一)气候变化对粮食生产的影响

农业作为国民经济中最基本的物质生产部门,是人类社会的衣食之源。在气候变化的背景下,粮食分布和物候、CO₂浓度、水资源和极端天气均会对粮食生产产生影响。

1. 气温和太阳辐射对粮食生产的影响

国内外相关研究表明,气温升高延长农作物的生长季,增加农作物种植面积,气候变化会有利于中、高纬度地区的粮食生产;相对而言,气候变化对低纬度地区的粮食生产产生负面影响。Dong 等(2015)利用遥感数据对三江平原样区水稻在 1986—2010 年间的种植范围进行监测发现,在气候变暖影响下,农田的分布正在向北部高纬度地区移动。Tao 等(2013)基于长江中下游的实验站点数据,对 1981—2009 年间水稻生产进行分析后发现,水稻生长季存在普遍气候变暖和太阳辐射减少的趋势,且 80% 的站点其水稻生长季在缩短;受此影响,长江中下游单季稻减产 7.14%~9.68%,早稻产量的变化在-0.59%~2.4%。

2. 水分对粮食生产的影响

大气降水是农业生产的重要组成部分,特别是在干旱和半干旱地区。因此,降水量的变化是决定气候变化对农业生产影响的重要因子。郑斯中(1993)认为,水分在我国农业生产中起到至关重要的作用,其中灌溉农业的比重已达到 66.67%,且在水资源减少 1%,灌溉面积减少 1%,即 47.3 万 hm²,粮食减少 75 亿 kg。Pan 等(2013)分析了江苏省 1896—2010 年粮食单产变化情况,发现降水对粮食生产十分重

要,且粮食产量对降水变化之间存在负响应关系。Wei 等(2010)认为,未来在水资源短缺的情景下,水稻产量将出现不同程度的减少($-2\% \sim -30\%$),而小麦和玉米则会增产,其中小麦增加幅度相对更加明显些。

3. 极端天气对粮食生产的影响

相对前者较为缓和的气候变化趋势,在短时期内发生的极端气候事件,如干旱、洪涝、高温热浪和低温冷害等对粮食生产的影响更大。多数研究表明,极端天气气候事件的发生对粮食生产构成负面影响。Baky 等(2012)评估了沙里亚德布尔县内粮食生产受到洪水影响,研究表明,洪水使当地粮食产量减少 200t/a。在中国粮食主产区内,在全球气候变化的背景下,极端气候事件显著增加。马九杰等(2005)指出,自 20 世纪 80 年代后期以来,农作物播种面积中受灾面积呈增加趋势,危及粮食的生产和供给。彭克强(2008)对 1978—2006 年中国粮食生产的实证数据分析和研究结果表明,中国农作物生产的抗灾能力并未得到实质性的提升,粮食增产率与承载率之间呈显著负相关。

(二)气候变化对畜牧业的影响

诸多学者针对畜牧业对气候变化的响应机制进行了分析。气候变化对于畜牧业生产影响包括直接影响和间接影响(Kabubo-Mariara, 2009),气候变化带来的气温、湿度、风速以及其他气候因子变化,从而影响牛奶、羊毛以及动物的繁殖等为气候变化对畜牧业的直接影响(Houghton, 2001);而间接影响包括气候变化影响饲料的质量和数量,如饲料、谷物及牲畜疾病等(Seo et al., 2007)。Sombroek 等(1982)认为干旱-半干旱地区畜牧业生产对气候变化十分敏感。Kabubo-Mariara 等(2009)研究认为,年均降水增加可能不利于草地的生长,但气温增加则增加森林向草地的转移,从而增加畜产品产量。Harle 等(2007)评估了气候变化对澳大利亚羊毛产业的影响,研究表明,降水量减少使得牧草和饲料的生长质量受到影响,而气温升高不利于控制动物的发病率;因此,该气候变化模式(气温上升、降水减少)对羊毛产业构成了负面影响。多数研究表明,未来气候变化对畜牧业生产总体的影响是负面的。

关于畜牧业生产对气候变化采取的适应性措施的研究,特别是对于生态脆弱区而言,采取积极的适应性措施,有利于减缓气候变化对畜牧业生产的不利影响,同时增加农户粮食安全、收入以及受到气候变化影响后的系统恢复力(Thornton et al., 2009)。Kurukulasuriya 和 Rosenthal(2014)总结了不同类型的适应措施:①调整农业生产的措施,包括农作物和畜牧业生产多样化以及集约化等;②保险和信贷计划,如购买作物、牲畜及洪水保险计划等可以增加收入多样化的适应措施;③政策、制度等方面,包括定价措施调整、支持保险计划以及发展畜牧业市场等农业政策措施;④发展畜牧业生产技术,如推广农作物饲料和畜牧品种、改善水和土壤管理、改善动物卫生技术等措施。

第三节 农作物种植结构提取的研究进展

一、农作物遥感监测的发展历程

农作物种植结构是指区域内种植的不同农作物的面积数量结构及空间布局特征,包括各农作物的熟制、种植面积和比例构成以及空间分布等重要信息,反映了区域内人类对农业生产资源的利用状况(唐华俊 等,2010;李祎君 等,2010;胡琼 等,2015)。农作物种植结构信息不仅是研究农作物产量预报和生长状况监测的重要基础数据,也是农业管理者和生产者进行区域农业生产优化管理、农业灌溉用水合理利用、农作物种植结构调整等决策的支持依据,对增强区域农业竞争力、维持农业可持续发展以及保障国家粮食安全都具有重要意义(梁书民,2006;刘德祥,2007)。

自1978年我国实行“改革开放”政策以来,传统的计划经济向市场经济转型,农业生产也开始实行“家庭联产承包责任制”(Chen et al., 2001; Lin, 2003; Song et al., 2014),统供统销的传统农业生产方式逐渐被市场化,传统的自给半自给农业生产开始向大规模商品生产转化,农产品供应由长期短缺变为总量基本平衡、丰年有余,更是创造了令世人瞩目的“用世界上7%的土地养活世界上22%人口”的奇迹(胡岳岷, 1998)。随着经济高速发展,人们生活水平不断提高,食品消费结构也相应改变,人们对农产品的多样性和优质性提出了新要求,需要更多的蔬菜、瓜果等经济作物食品来替代传统的粮食食品(梁书民,2006)。近几十年来,在经济发展、人口增加和城镇化的背景下,受经济效益、消费需求、政策、气候变化等多方面因素的影响,我国的农作物种植结构发生了显著变化(邓振镛 等,2006;黄季焜 等,2007;梁书民 等,2008;张琳 等,2008)。一方面,数量上,各类农作物的种植比例变化显著,蔬菜、瓜果等经济作物的种植比例快速增长,在粮食农作物中除玉米种植比例有所增长外,小麦、稻谷和其他谷类农作物种植比例均呈下降趋势(Tong et al., 2003; Verburg et al., 2000; Wu et al., 2012);另一方面,空间上,农作物种植的空间分布发生明显变化,传统粮食农作物种植重心北移和东移,其中水稻的种植范围向北扩张(Xu et al., 2013; You et al., 2011)。因此,在及时、准确获取农作物种植结构信息的基础上揭示其时空变化特征,并分析农作物种植结构变化对人类经济社会及自然生态系统的影响,对于促进农民增收、维持农业可持续发展和保障国家粮食安全都具有重要意义。

我国国家统计局每年都会发布主要农作物种植结构的统计数据,可在宏观上提供农作物种植结构的主要信息,并比较全面地监测中国农作物种植结构的变化。然而这种传统的统计汇总方法存在一些缺点:一方面,利用汇总统计获取数据需要耗费大量人力、物力和时间,而且获取的统计数据的准确性和客观性存在一些不足。另一方面,我国统计数据一般以县为统计单元,统计的农作物种植结构数据无法实现地块尺度的空间显示,不利于耦合其他空间数据进行进一步的深入研究,可利用

的深度和广度有限。

遥感具有全局、客观、快速、及时获取地面覆盖数据的能力,已被广泛应用于农业领域,是及时准确获取大范围农作物种植结构信息的有效手段。目前,在农作物种植结构遥感提取方面的研究日益增多,其方法也不断地发展和完善,但仍存在许多不足。获取农作物种植结构信息的关键在于识别不同农作物的空间分布,主要是根据不同农作物的空间纹理结构特征、光谱特征或者生长物候时相特征的不同进行遥感识别(张楠楠,2008;竞霞,2005)。自 20 世纪 70 年代遥感技术迅速发展以来,遥感技术已被广泛应用于农业生产中,尤其是在农作物长势监测、产量预测以及种植结构提取(面积估算)等方面取得了长足进展。

世界各国和地区的相关部门和机构开展了一些重大的农业遥感监测计划,其中几大标志性计划为:(1)美国国家航空航天局、农业部和国家海洋大气管理局等部门于 1974 年联合开展了 LACIE(the large area crop inventory experiment)计划,LACIE 是最早的农情遥感监测计划,主要进行美国及世界其他地区的小麦种植面积、单产和总产量遥感估算研究(Macdonald et al.,1980;Pinter et al.,2003)。(2)美国于 1980 年开始的 AGRISTARS(the Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing)计划,此计划主要包括农作物灾害早期预警、面积估算、长势评价及产量预报等内容(Pinter et al.,2003;Houston et al.,1984)。(3)欧盟于 1988 年开始的 MARS(the Monitoring Agriculture with Remote Sensing)计划,其主要任务是进行农作物种植面积调查、农作物总产量调查及其预报(Perdigao et al.,1997)。(4)美国的 CDL(the Cropland Data Layer)计划,主要用于各类农作物种植面积估算(Boryan et al.,2011)。(5)2011 年由 20 国集团(G20)联合发起的 GEOGLAM(the Group on Earth Observations Global Agricultural Monitoring)计划,目的是对世界各地农作物进行全面的遥感监测(Whitcraft et al.,2015)。

我国农业遥感从 20 世纪 80 年代起步以来,各相关部门也相继建立了一些重要的农情监测系统。(1)中国气象局的农作物监测系统(唐华俊等,2010)。1984 年国家气象局以应用气象卫星为主对我国北方 11 省(市)开展了关于冬小麦大面积遥感综合估产的研究计划,但该计划未涉及面积监测研究。(2)农业部的遥感估产运行系统(魏玉栋,2002)。农业部从 1999 年开始实施了一项以业务化农作物遥感监测为目标的“全国农作物业务遥感估产”项目,主要是利用我国资源一号、美国 Landsat 等资源遥感卫星影像估算农作物面积,通过综合分析气象卫星影像、地面气象台站数据以及实地调查数据进行农作物长势监测,其主要监测农作物是冬小麦、玉米、水稻、大豆和棉花等,经过三年的试运行,遥感估产运行系统于 2002 年正式投入业务应用。(3)中国科学院遥感与数字地球研究所从 1998 年开始建立中国农情遥感速报系统,并进一步发展为全球农情遥感速报系统(Cropwatch)(吴炳方,2010)。Cropwatch 已成为全球领先的农情遥感监测系统,也是 GEOGLAM(全球农业监测)的核

心系统之一,其建立的基于遥感和地面观测数据的农情监测系统可以独立评估国家及全球尺度的农作物长势和产量等相关信息。

在利用空间纹理结构特征进行分类的研究中,研究者一般采用高空间分辨率影像作为遥感数据源,利用面向对象的方法分割影像,获取不同农作物的分类规则(Duro et al., 2012; Luisa et al., 2009; Torres-Sanchez et al., 2015; 姜淑芳等, 2012; 徐新刚等, 2008; 何勇等, 2012)。采用高光谱分辨率影像作为遥感数据源的研究,往往是根据不同农作物在某些特定时相的光谱特性差异对农作物进行识别(Camps-Valls et al., 2003; Mahesh et al., 2015; Nidamanuri et al., 2011; 姚云军等, 2008; 唐延林, 2001; 张丰, 2002)。利用高空间分辨率影像或高光谱分辨率影像进行农作物遥感识别的关键是获取不同农作物的“关键物候期”,即寻找待分类农作物与其周围环境的空间特征或光谱特征具有最大差异的特定时期,然而这个时期的影像并不一定能够有效获取;而且单景高空间分辨率影像和高光谱分辨率影像的覆盖范围较窄,难以得到覆盖大空间尺度的镶嵌影像,一般只进行小区域的农作物种植结构提取研究,也较难进行长时间跨度的变化研究;此外,高空间分辨率影像和高光谱分辨率影像均不能免费获取。

在大空间尺度、长时间跨度的农作物种植结构遥感提取中,更多的研究者选择高时间分辨率影像作为遥感数据源,根据农作物生长物候时相特征的不同识别不同农作物(张明伟等, 2006; Atzberger et al., 2013; Verbeiren et al., 2008; 杨小唤等, 2004; 林文鹏等, 2006; 李杨等, 2010)。虽然高时间分辨率影像容易获取且覆盖范围广,适合大空间尺度的研究,但是其空间分辨率过低,容易由于混合像元过多降低分类结果的精度,尤其对于一些耕地地块碎小、农作物种植结构复杂地区的研究,分类精度会很不理想(Gu et al., 2015; Jain et al., 2013; Wu et al., 2012)。

二、农作物种植结构遥感提取方法

随着遥感技术的快速发展,尤其是传感器的进一步发展与升级,改善了遥感影像的空间、时间和光谱分辨率,为农业遥感领域的研究提供了更多有效的遥感数据源选择。近年来在农作物遥感监测应用中,农作物种植结构遥感提取研究日益增多,研究者一般是根据不同农作物光谱特性、空间特征或生长物候特征的不同进行农作物精细分类。针对不同研究的特点,尤其是空间尺度和时间跨度不同,研究者往往需要选择不同的适宜遥感数据源进行农作物种植结构提取研究,相应地存在不同的提取方法。

(一)单一时相影像法

单一时相影像法一般以高空间分辨率影像或高光谱分辨率影像作为遥感数据源,选取最容易区分不同农作物与背景的“关键物候期”的影像进行农作物精细分类。高空间分辨率影像具有丰富的结构、纹理、几何信息,研究者往往是利用面向对

象的方法分割影像,将具有相似结构、纹理和几何特征的多个像元聚合为对象,根据不同农作物空间特征的不同对影像的对象进行分类,这在很大程度上减少了基于像元分类方法普遍存在的“椒盐效应”,有利于提高分类精度和实际应用价值。以高光谱分辨率影像作为遥感数据源的研究,研究者一般是利用不同农作物在精细光谱范围的光谱特征差异进行农作物种植结构提取,精细的光谱分辨率有助于减少“同物异谱”和“同谱异物”现象对分类精度的不利影响。

张丰等(2002)基于 80 通道成像光谱仪(Pushbroom Hyperspectral Imager, PHI)于 1999 年 9 月 10 日获取的高光谱影像,选用了特征值较大的 12 个波段进行混合决策树分类,获取了不同品种水稻的空间分布信息。郑长春等(2008)选取水稻、大豆、玉米的光谱特征差异明显的关键时期 SPOT 影像为数据源,基于不同作物之间波谱值和 NDVI 的差异,提取了三种农作物的种植结构信息。刘磊等(2011)根据野外实测光谱数据确定 8 月上旬为区分内蒙古自治区谢尔塔拉草原站附近 2 块大面积连片地块的主要作物大麦、小麦、油菜的最佳时间,并以 2009 年 8 月 5 日的 TM 影像为数据源,根据不同作物波谱特征,采用决策树方法,结合光谱角度制图(SAM)等光谱匹配方法,开展作物分类研究。姜淑芳等(2012)采用人机交互处理技术从 RapidEye 遥感影像获取冬小麦信息。Duro 等(2012)以 SPOT-5 影像为数据源,从基于像元和基于对象的 2 个角度比较了决策树、随机森林和支持向量机 3 种机器学习算法在农作物分类中的应用。张永庭等(2012)以 ALOS 高分辨影像为底图提取了引黄灌区的农作物种植结构,为进一步实施灌区农业种植结构优化调整、节水灌溉及水量调度管理等工作提供科学依据和基础资料。王志慧等(2013)以 CASI 航空遥感影像为数据源,分别采用基于像素和基于对象的方法对黑河中游绿洲灌溉区土地覆盖和农作物种植结构空间格局进行遥感监测。

由于单一时相影像法的重点是获取“关键物候期”的影像,然而高空间分辨率影像或高光谱分辨率影像一般都具有很低的时间分辨率,难以获取指定时相的影像;而且高空间分辨率影像或高光谱分辨率影像的覆盖范围较小,难以获取同一时相较大大空间尺度的镶嵌影像,一般用于较小空间尺度的农作物种植结构提取研究,不适合大区域较长时间跨度的研究;另外,利用单一时相影像法进行农作物种植结构提取很可能遗漏不在“关键物候期”种植的其他农作物,而且难以识别一年多熟制作物或两种农作物轮作等情况;此外,目前高空间分辨率影像或高光谱分辨率影像均难以免费获取。

(二)时间序列影像法

在大空间尺度长时间跨度的农作物种植结构遥感提取中,研究者往往选用时间序列影像法,一般以高时间分辨率影像(如 MODIS、NOAA/AVHRR、SPOT VEGETATION、HJ-1/CCD 等影像)作为遥感数据源,选取表征农作物生长状况的适宜特征参量(如植被指数、叶面积指数、植被覆盖度等),根据不同农作物生长物候特征的

不同进行分类。

Lloyd(1990)基于时间序列 NOAA/AVHRR NDVI 数据,利用决策树进行遥感图像植被分类研究。杨小唤等(2004)根据北京市不同农作物的物候历,基于 MODIS NDVI 数据提取了北京市主要农作物面积。张明伟(2006)基于 MODIS NDVI 和 EVI 时序数据,提取了中国华北地区主要农作物的物候信息及空间分布。张霞等(2008)利用 2003 年华北平原全年每 16d 合成的 MODIS EVI 时间序列图像,根据冬小麦及其后茬夏玉米与其他同季生长作物物候差异性特征,建立提取模型自动识别了冬小麦和夏玉米的空间分布。Verbeiren 等(2008)基于 SPOT VEGETATION 时间序列数据,利用线性混合模型和神经网络方法提取了比利时农作物及其他地类的空间分布。陈健等(2011)利用 Savitzky-Golay 滤波重构了时序 MODIS EVI 数据,并结合农作物的物候历构建了分类模型,遥感提取 2004 年河北省主要农作物的种植空间分布及面积信息。Atzberger 等(2013)基于 AVHRR NDVI 时间序列,利用神经网络方法识别了意大利托斯卡纳区 1988—2001 年冬季作物的空间分布,并提出将 AVHRR 与 MODIS 数据融合将获取更长时间序列的农作物分布信息。李鑫川等(2013)通过 SPLINE 算法对 HJ-1/CCD 影像的云影响区域插值去噪,基于重构后的时序 HJ-1/CCD 影像利用决策树分类提取了黑龙江友谊农场大豆、玉米和水稻的种植信息。

时间序列影像法是目前农作物种植结构提取研究中应用最为广泛的方法。利用高时间分辨率影像可以方便获取连续、有效的时序特征参量数据,有助于灵敏地捕捉不同农作物生长物候特征的不同,并且能够获取一年多熟、不同作物轮作等种植方式信息。但是高时间分辨率影像往往空间分辨率较低,由此引起的“混合像元”问题将严重影响农作物精细分类的精度,因此一般比较适合同一种农作物大面积连片种植的区域(如我国华北平原、东北平原等)的研究,在耕地地块碎小、种植结构复杂的区域(如黑河流域)的研究中难以取得理想分类精度。HJ-1/CCD 影像虽然兼备高时间(2d)和高空间(30m)分辨率,但由于接收时间较短,不适宜长时间跨度的变化研究。

(三)多时相影像法

多时相影像法的遥感数据源一般是具有较高空间分辨率但时间分辨率较低的多光谱影像(如 HJ-1/CCD 影像,Landsat 系列的 TM、ETM+ 和 OLI 影像,中巴卫星 CBERS 影像等),也有的研究者以 MODIS 等高时间分辨率影像为数据源,根据不同农作物的生长物候特征,选取区分不同农作物的“关键时间窗口”的多时相影像,利用表征农作物生长状况的多时相特征参量对不同农作物进行识别。

竞霞等(2005)选用 4 景不同时相的 TM 影像,结合冬小麦的生长物候期与其 NDVI 特征,获取了北京地区的冬小麦空间分布。李存军等(2005)利用 3 个时期 Landsat TM/ETM+ 影像的近红外波段成功区分小麦和苜蓿的种植范围。林文鹏

等(2006)利用 7 个时相的 Terra /MODIS 数据,采用波谱分析的方法,建立一种基于遥感影像全覆盖的秋季作物类型自动提取方法,实现 2002 年北京地区秋季主要作物遥感自动识别。马丽等(2008)根据不同农作物在多时相 TM 影像 NDVI 的差异特征,利用决策树分类成功提取黑龙江军川农场的大豆、玉米和水稻的种植信息。齐腊等(2008)基于 5 景不同时相的 CBERS-02 影像提取了北京 2006—2007 年冬小麦的空间分布,多时相影像法较之单时相影像的提取结果精度大大提高。玉苏普江·艾麦提等(2014)基于多时相的 HJ-1/CCD 数据,在 ENVI 平台下基于 CART 算法的决策树规则自动提取了渭干河-库车河绿洲主要农作物覆盖信息。刘吉凯等(2015)基于多时相的 Landsat 8 OLI 影像成功提取了多种农作物的种植结构,与单时相影像监督分类相比使用 3 个时相影像的决策树法使提取结果的总体精度提高了 7.90%。肖向明带领的研究团队利用多时相的 MODIS 数据成功提取了中国、亚洲的水稻空间分布,之后又分别以多时相 Landsat 系列影像、Landsat 与 MODIS 影像相结合为数据源在区域和全球尺度的水稻遥感提取研究方面取得了进展(Xiao 等, 2005,2006;Zhou 等,2016;Qin 等,2015)。

相比于时间序列影像法,多时相影像法提高了遥感数据源的空间分辨率,降低了时间分辨率,然而在利用时间序列影像法的许多研究中并没有完全使用到每一个时相,在区分不同农作物的“关键时间窗口”足够多的情况下,多时相影像法将明显提高分类精度,尤其是在耕地地块碎小、种植结构复杂的区域。但是,具有较高空间分辨率但时间分辨率较低的多光谱影像由于天气、云等因素的影响,往往难以获取连续的有效时序影像,有限的时相难以灵敏地捕捉一年几熟或轮作等复杂的种植方式,比较适合一年一熟地区的研究。

(四)多源影像融合法

单一遥感数据源包含的信息有限,综合利用多源遥感数据的信息进行农作物种植结构提取,有助于提高分类结果的精度。多源影像融合法一般是结合较高空间分辨率影像和较高时间分辨率影像各自的优点,设计相应的算法对二者进行融合,得到一种既具有高空间分辨率又具有高时间分辨率的新影像,从而提高农作物种植结构提取的精度。

蔡学良等(2009)对 ETM+与 MODIS 数据进行融合,融合后的时间序列数据既具有较高空间分辨率又具有高时间分辨率,结合 ISODATA 非监督分类及光谱耦合技术,成功提取作物种植结构。邬明权等(2010)结合 MODIS 时间序列数据中地物的时间变化信息以及 ETM+影像的纹理信息,融合得到高时空分辨率时间序列影像,选择水稻与背景特征差异大的关键时相影像,利用光谱角制图法获取水稻空间分布。郝鹏宇等(2012)基于历史时期的时间序列 MODIS 数据,建立关于不同农作物随物候期变化的植被指数曲线库,以 TM 和 HJ-1/CCD 数据构建的当年时序影像为数据源,对比历史植被指数曲线库,选定关键时相成功获取了不同农作物的空间

分布。谢登峰等(2015)以 Landsat 8 和 MODIS 为数据源,基于 Wu 等(2012)提出的遥感数据时空融合方法(Spatial Temporal Data Fusion Approach,STDFA)构建高时间分辨率的遥感影像数据,应用支持向量机(Support Vector Machine,SVM)识别了秋粮作物的空间位置。

采用多源影像融合的方法可以很好地结合高时间分辨率的影像和高空间分辨率的影像这两种数据源各自的优势,大大提高农作物种植结构提取的精度。但是此方法对融合算法的要求很高,影像融合的精度直接影响种植结构提取的精度,不成功的影像融合很可能会大大降低提取精度,甚至低于只用一种影像的提取精度,而且目前并没有应用较广泛、效果较好的融合算法。