

农业土地系统的耦合特征及其研究进展

谢安坤, 周清波^{*}, 吴文斌, 余强毅

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业部农业遥感重点实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】农业土地系统是以土地为核心承载的农业系统, 反映了人类与环境的多重作用、相互制约、动态交互过程, 其呈现出显著的耦合特征。科学研究农业土地系统的耦合特征有助于科学理解和解释“人类—自然”复杂耦合关系, 实现土地科学合理利用。【方法】文章系统总结了农业土地系统耦合性的科学内涵、基本特征, 梳理了其研究的理论基础, 尤其重点从研究对象、研究尺度和研究方法等方面系统分析了国内外研究进展, 并对未来研究趋势进行了展望。【结果/结论】总体来看, 目前农业土地系统耦合特征研究处于起步阶段, 该方法还未引起科学家的足够关注。该研究将有助于深入理解和解释“人—地”关系, 发掘、探索实现农业土地系统可持续发展的潜在途径。

关键词: 农业土地系统; 系统耦合; 耦合特征; 土地利用

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180104

0 引言

随着人类对农业土地利用问题愈发关注, 农业土地系统学科体系逐步形成。农业土地系统是农业系统与土地系统的综合集成, 是以土地为核心对象的农业系统^[1]。农业土地系统是人类社会—自然环境的纽带和桥梁, 实质上反映了人类活动与地球环境的多重作用、相互制约、动态交互过程, 以实现人类生计、粮食安全、生态保护等多功能目标。因此, 农业土地系统成为了地理学、生态学、全球变化学等学科的核心研究领域^[2]。

农业土地系统的研究对象丰富多样、研究内容高度复杂, 不同系统组成在不同时间和空间上发生联系、相互影响, 使得农业土地系统呈现出显著的耦合特征, 而且处于时空动态变化之中, 具有明显的地理差异。农业土地系统耦合特征的综合性、复杂性和动态性, 给其科学研究带来巨大挑战和困难, 需要综合自然科学、工程科学和社会科学等多个学科知识, 开展交叉集成研究^[3]。文章在介绍农业土地系统耦合特征的特点基础上, 系统梳理和总结目前有关耦合特征的研究进展, 并对该领域的未来研究动向进行讨论, 以为农业土地系统耦合特征研究提供部分参考。

收稿日期: 2018-02-14

第一作者简介: 谢安坤(1983—), 女, 回族, 河北保定人, 博士研究生。研究方向: 农业土地系统。Email: xieankun@caas.cn。

※ 通信作者简介: 周清波(1965—), 男, 汉族, 湖南人, 博士、研究员。研究方向: 农业遥感, Email: zhouqingbo@caas.cn。

* 基金项目: 国家重点研发计划项目“全球粮食供需变化下的中国耕地利用可持续化研究”(2017YFE0104600)

1 农业土地系统的耦合性

1.1 耦合性的科学内涵

耦合一词源于物理学，指两个或两个以上的体系或两种运动形式之间通过相互作用、彼此影响以至联合起来的现象，或者是通过各种内在机制互为作用，形成一体化的现象。20 世纪 90 年代，任继周院士^[4]将耦合概念引入到农业生态系统，对耦合的科学概念进行了明确界定，即两个或两个以上性质相近似的生态系统具有互相亲合的趋势，当条件成熟时，可以结合为一个新的、高一级的结构功能体。农业土地系统是以土地为核心的农业系统，其耦合特征科学内涵和上述描述基本相同，指在农业土地利用活动中，人类系统与自然环境系统持续相互作用而形成的复杂耦合关系。从概念看，相悖是耦合的对立面，指两个或两个以上的系统或要素之间相互干扰、相互破坏、负向发展演化，阻碍系统耦合，致使系统受损、直至崩溃^[5]。如我国农业土地系统中过度放牧造成农业生态系统效益下降、草原退化^[5-8]。

1.2 耦合性的基本特征

1.2.1 时空性

热量、光照、降水等农业生产条件存在明显的区域差别，且因季节变化而变化，使得农业土地系统具有明显的空间和时间特性^[9]。这就决定了农业土地系统耦合特征也具有空间特性、时间特性或同时具有时空特性。如在同一地区，为提高产量和经济效益、减轻病虫害、提升生态系统恢复力而进行间作套种的空间配置，如在高寒或寒冷地区禾本科和豆科牧草混播^[10]，玉米—大豆套作^[11]，玉米—花生间作^[12]，甘蔗—蔬菜间作^[13]等；或既进行植物生产，也进行动物生产，同时作为景观资源加以利用，如我国虾稻连作养殖既可提高稻田利用率，也可提高经济效益，稻田养虾可觅食杂草、水生生物、蚊蝇等，同时可以增加水溶氧量，其粪便还可以起到增肥效果^[14]。随着经济社会的发展，农业土地系统耦合时空特性越来越多元化。

1.2.2 反馈性

人类利用土地资源进行农业生产服务，满足人类自身的需求。人类活动影响土地利用格局和过程，影响土地质量，同时又受土地的影响或制约，形成反馈环。农业土地系统耦合特征的反馈性既有正也有负的影响^[15-17]。如农业土地利用通过改变地表覆盖和强度状况，对区域温度、作物热量累积、地表能量分配、表面粗糙度、蒸散量、和降雨量等造成影响^[18-19]；城市化带来的新定居点快速增长，贸易路线不断扩大，资源、土地、物质、高素质劳动力人才“农转非”，导致了大规模农业自然景观和土地利用类型的改变，农业发展面临新的压力^[20-23]；农作物种植中氮肥的施用提高了作物产量，但也造成了温室气体的排放和过量氮的径流，对地下水、湖泊等水体造成污染^[24-25]；现代农业对地膜的大量应用，地膜覆盖的负面效应日趋严重，已严重影响土壤再生产能力^[26]；人类活动造成土壤重金属污染，使土壤中微生物的总量成倍降低，阻碍植物的生长和固氮作用，同时重金属在土壤—植物系统中迁移造成植物体重金属累集，威胁人类健康^[27]；人

2018年2月

工大坝改变河水径流,对库区土地利用和景观格局产生复杂影响,耕地面积下降,耕地利用压力增大^[28-30]。

1.2.3 阈值性

阈值又叫临界值,指一个效应能够产生的最低值或最高值,是交替状态或不同状态的转折点^[31]。农业土地系统耦合特征在达到系统变化的阈值前,对人类的影响并不明显,控制农业土地系统阈值在土地利用中十分重要^[32]。如确定化肥投入强度安全阈值,对于农业土地可持续利用和环境保护具有重要意义^[33-34];对土地利用进行定量分级(如高标准土壤定级),确定各指示因素的指标值(阈值),研究和建立土地可持续利用指标体系十分重要^[35];现代农业发展中,集中连片是当前农用地整治的推进手段之一,基于景观生态指标确定农用地连片阈值,具有直观、可靠的优点,可以为全国范围内的农用地整治工作提供参考^[36];在河岸缓冲带和走廊的保护区,确定缓冲区阈值,对于河岸廊道的保护及在整体流域管理中具有重要意义^[37]。“阈值”为农业土地利用规划提供了科学、综合的信息,促进了生物学、生态学等和土地利用规划之间的联系,以帮助指导更深入的土地系统耦合利用规划^[38]。

1.2.4 脆弱性

脆弱性是指由于内部和外部变量的变化,对系统可能造成损害的程度及从影响中恢复程度的度量。脆弱性总是针对特定的扰动而言,不同的扰动会表现出不同的脆弱性^[39-40]。土地系统耦合特征的脆弱性是土地流转、土地退化、土壤侵蚀、盐碱化、养分耗损、污染等土地脆弱性问题的集成和拓展,脆弱性评价是土地系统脆弱性研究的核心内容,有利于研究由定性描述阶段走向定量分析阶段,也可为后期的恢复重建提供可靠依据。如Metzger^[41]提出了一个土地利用情景的脆弱性评估系统,研究土地利用变化情况对整个欧洲环境和生态系统服务的影响;肖文婧^[42]创建鄱阳湖生态经济区土地生态脆弱性评价体系,对研究区土地生态脆弱性进行分析,并针对研究区域的土地生态脆弱调控,从自然、经济、生活3个角度提出对策;陈静等^[43]在分析农业生态系统脆弱性影响因素的基础上,综合自然和人文因子,筛选设计9个一级评价指标和16个二级评价指标,评价了全国农业生态系统脆弱度及其空间分布特征,为农业土地合理利用提供了依据。

1.2.5 恢复性

恢复性多用恢复力表示,即系统的适应能力,是系统对非预期或不可预测干扰脆弱性的量度,可看成与系统脆弱性相对的概念^[44]。农业土地系统耦合特征的恢复力是土地系统受外界干扰时,通过系统自我调节和外部能量输入,维持农业土地系统本身的结构、功能、特性并恢复到稳定状态的能力^[45]。农业土地系统受到外界干扰时,人类社会便会随之发生响应,如改变社会组织形态、土地利用强度等^[46]。农业土地系统恢复力是由生态系统和一系列政治、经济、社会条件及过程的相互作用决定,冲突或干扰(如过量施肥、消耗土地、气候变化)及持续的压力(如经济、土地利用和营养循环)将影响农业土地系统的环境,其产生的结果又会改变恢复力^[47]。同时,恢复力具有不可逆性,即恢复力强的系统在受到外界干扰后,也会发生改变,无法完全恢复到干扰前的状态。因此,研究恢复力,寻找增强系统恢复力手段,避免农业土地系统进入人们所不希望的状态是

恢复力研究的目标所在^[39, 44]。

2 耦合特征研究的理论

2.1 系统论

系统论是研究系统的模式、性能、行为和规律的一门科学，为农业土地系统耦合特征研究提供基础理论。开放性、自组织性、复杂性、整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性、时序性是所有系统共同的基本特征^[48-49]。系统论从全局出发来考虑局部，通过协调农业土地系统耦合要素之间的关系，处理整体与局部之间的关系，使各耦合要素实现整体功能最优的目标^[50-52]。系统论认为，系统具有边界，系统边界是区分系统内外的标志；系统由两个以上具有密切联系的组分组成，具有层次性；系统不但能反映各组分的独立功能，还能产生其组分没有的功能，即系统整合特性，往往表现为“一加一大于二”。系统论不仅在于认识农业土地系统耦合特征的基本规律，更重要在于利用这些规律去控制、管理、改造农业土地系统结构，协调耦合各要素关系，使农业土地利用达到系统整合优化的目标。

2.2 控制论和信息论

控制论和信息论为农业土地系统耦合研究提供基本支撑。控制论是研究系统的调节和控制规律的科学，强调系统的行为能力和系统的目的性。反馈控制是控制论中的重要组成部分，一切有目的行为都需要用反馈信息来调节和控制系统行为达到预期目的^[53, 54]。信息论是用数理统计方法来研究信息的度量、传递和变换规律的科学，包括研究通讯和控制系统中普遍存在的信息传递规律，以及信息获取、度量、变换、储存和传递的最佳解决方案^[55]。信息论为控制论的进一步发展奠定了理论基础，从系统的角度来看，为了增加系统的有序性，系统必须有信息交换来减少无序性而达到稳定或其他的特定目的，系统正是靠反馈机制来控制这一点。农业土地系统的资源调查、环境调查、生态调查数据等输入计算机系统，并进行信息处理、加工、建模和预测，在此基础上提出管理的对策和意见供政府部门宏观决策^[56]。伴随我国农业信息化的发展，大数据时代的到来，农业信息与技术传播体系在发生着深刻变化，信息论和控制论在农业土地系统耦合中尤为重要。

2.3 生态学理论

生态学理论是研究有机体与其周围环境之间相互关系的科学，目前生态学已经发展成为包括从微观的分子生态学到宏观的生态系统生态学、景观生态学，从自然生态学到生态经济学、社会生态学、人类生态学等多学科的综合现代学科体系^[57]，其理论对正确处理农业土地系统内各子系统内、外的耦合关系，尤其是农业土地生产与环境的关系有着重要的指导意义。农业土地生态系统是一个包含自然、社会、经济等诸多因素，并具有较强目的性的复杂系统^[1]。农业土地系统耦合将促进人们对农业土地生态系统整体行为进行探索，理解和解释农业生产过程中“人类—自然”综合复杂的关系，在满足生产、经济的条件下，同时保护农业土地生态系统的功能和可循环利用，为开展土地生态系统研究工作提供一个新途径。

2018年2月

2.4 经济学理论

农业土地系统耦合特征不仅包括农业土地内部的自然要素耦合,还涉及产业间的耦合,因此其研究也需要经济学理论,如产业经济理论、资源优化配置理论和循环经济理论。产业经济学认为,一定时期的某个区域的产业结构中,存在着对区域产业群发展起带头作用的产业,称为主导产业。通过投入产出分析可以得出主导产业对其他产业的波及效果^[58]。资源优化配置是指各种资源在不同的使用方向之间的分配,资源的稀缺性、时空分布差异性、多宜性等,决定了资源配置的重要性和必要性^[59]。循环经济是人类社会发展形成的一种新型的资源利用模式和理念,其强调在发展经济的同时,注重资源的高效利用和循环,减少环境危害,以尽可能小的资源消耗和环境成本,获得尽可能大的经济效益、社会效益和生态效益^[60-61]。

3 耦合特征的研究进展

3.1 研究对象

农业土地系统研究对象包括耕地格局、多熟种植制度、农作物空间格局、利用集约度等多对象,反映了“人类—自然”的复杂关系。早期的农业土地系统耦合研究对象以土地资源、生态环境、经济发展、社会发展、农业政策、农户决策等为主^[62-64],而且多聚焦于两两之间的耦合和作用关系,如农业土地利用与生态环境^[65]、全球经济化与农业土地利用^[66]、土地集约化与土地产出^[67]、大型水利建设与农业土地利用^[29]、农业政策与土地利用^[68]、农户与农户之间的土地利用行为^[69]等。这些研究多侧重于“人类—自然”关系中的某一方面,从“人”或“环境”角度分析其和农业土地系统的作用关系。这些局部耦合因子研究在实际中发挥了重要作用,但其没有从系统观、整体观的角度来综合考虑“人类—自然”复合关系,不能很好地解释和预测农业土地系统变化。因此,近年来很多学者逐步开展了农业土地系统多对象耦合特征研究,如气候—水文—贸易耦合^[70],城市化—经济—劳动力—生态耦合^[71]等;也有很多学者利用农业土地利用模型如Agent模拟^[3, 72]进行多因素耦合模拟分析。农业土地系统研究对象的多样性、复杂性和综合性,不同对象相互作用、互为因果关系,使得其边界模糊和重叠,难以进行界定和结构化处理。因此,多对象、多因素耦合特征研究将是未来农业土地系统科学中的难点和焦点之一。

3.2 研究尺度

农业土地系统的耦合行为在不同尺度上发生、作用和演变,耦合研究尺度包括空间尺度和时间尺度。目前多数农业土地系统耦合研究多以单点、区域或国家尺度为主;随着遥感和地理信息技术的发展,部分全球尺度的耦合特征研究也逐步开展^[73]。尤其是,这些不同尺度的研究多侧重于关注要素之间的局地耦合关系,如在网格空间单元上分析不同网格内或相连网格间的土地—环境、土地—社会经济、环境—社会经济耦合作用关系^[74-75]。这种局地耦合作用对早期相对封闭的环境具有很好的适用性,因为在封闭的环境下农业土地系统变化主要受周围或局地的自然、社会、经济所影响。然而,近几十年来,随着全球开放度和一体化进程的加快,国际交流、贸易活动日益频繁,信息流、技

术流和物质流成为常态，农业土地系统的远程耦合作用凸显，远距离耦合研究引起了学界的高度关注^[76-77]。如依赖于国际贸易国家内部和国家之间的土地使用移位，大豆国际贸易影响贸易国土地利用发生改变^[78-79]；老挝琅南塔省小村庄土地利用改变，主要受中国投资和单一出口导向型生产的推动^[80]。远程耦合也会改变作用国家的生态环境，如国际大豆贸易可能造成巴西农业土地过度利用，生物多样性减少、生态系统服务功能降低^[81]；跨国贸易货物运输中无意传播红火蚁，造成当地无脊椎动物群落生物多样性降低，农作物及相关经济损失^[82]等。同样，农业土地系统耦合具有时间尺度效应，部分耦合作用会随时间发生耦合强度、功能的变化。选择何种时间尺度主要取决于研究目的和研究对象。如要分析短时期内土地系统的耦合特征，则时间间隔较短；反之，若要分析耦合特征的远期变化趋势，则时间分辨率较低。

3.3 研究方法

农业土地系统耦合特征研究方法总体上包括统计方法、空间计量方法和模拟模型方法。传统的统计方法多利用统计数据来分析行政单元的土地系统耦合特征，如在县域尺度上分析政策、人口变化对农业土地利用格局的影响^[83]；在国家尺度上分析气候变化对全球作物产量的时空格局变化影响^[84]。近年来，随着对地观测技术的快速发展，多尺度的空间数据集成为可能，为空间计量方法应用提供了基础。如中低空间分辨率的 MODIS 数据在区域作物空间格局演变和驱动因子分析发挥了重要作用^[85-86]；世界首套 30m 空间分辨率的全球地表覆盖数据集——GlobeLand30 应用于全球耕地利用格局时空变化特征及多因子耦合分析^[87-92]。模型作为一种认知和学习工具，有助于了解、认识和解释土地系统耦合特有的动态变化规律和特征，模型方法可分为地理模型和经济模型。地理模型重点关注耦合关系中“环境”因子的影响；社会经济模型则更多从“人”的角度出发，研究不同耦合主体的农业土地利用选择或决策行为的差异性、动态性和相关性，解释农业土地系统变化的过程和机制^[1, 85]。统计方法简单易用，数据容易获取，但易受人为因素的干扰；空间计量方法对空间数据要求高，不同数据之间的尺度转换和一致性会影响分析结果；模型方法需要考虑自然、社会、经济等因子，不同的模型具有尺度差异性，模型的普适性有待解决。因此，未来需要进行多学科研究方法的交汇、融合，更好揭示农业土地系统耦合特征的本质^[1, 85-86]。如利用遥感数据和统计数据融合的方法，很多学者研制了全球或区域耕地或农作物分布格局变化特征^[93]；模型建模手段已从传统单一的地理模型或经济模型研究转向多元模型耦合研究^[94-95]。

4 研究展望

农业土地系统耦合特征在多尺度、多维度、多界面层次发生、发展和变化，驱动农业土地系统结构、功能发生变化。虽然国内外学者开展了农业土地系统耦合特征的研究，取得了一定进展，但总体看，目前农业土地系统耦合特征研究仍处于起步阶段，需要未来进一步加强系统研究，进行农业土地系统耦合优化，形成全新的系统结构及与之相适应的功能，对确保国家粮食安全、促进农业资源优化配置和农业土地可持续利用发挥重

2018年2月

要作用。

4.1 加强耦合尺度和速度研究

过去农业土地利用或农业贸易大多发生在局地区域,长距离发生较少。现在或未来时间内,农业土地系统远距离耦合作用日益广泛,而且相互作用速度不断加快。如国际大豆贸易改变了中国和巴西的土地利用格局,自2000以来,巴西已经扩大大豆种植约19万 hm^2 ,是世界增长的47.5%,而中国大豆种植面积减少,2014年大豆在粮食总播种面积中的比重较2000年减少27%^[96-97];Davis^[98]运用1个作物耗水量模型和14种主要粮食作物的产量地图,通过重新调整这些作物在全球耕地上的空间分布,发现改造农业选择,优化作物分布,可以在全球范围内额外供养8.25亿人口,并能节约水资源。农业土地系统耦合不再局限于区域内或相邻区域间,已经延伸至远程区域和全球尺度,改变速度之快,是对农业土地系统耦合研究前所未有的挑战。

4.2 系统分析耦合直接和间接影响

农业土地系统的耦合特征具有显著的直接影响,如粮食产出、农民收入、贫困人口比重、技术进步、环境效应等^[99-100]。但同时,也有其重要的间接影响,如现代农业生产严重依赖于能源,能源投入和新能源兴起(如用玉米制作生物乙醇)与农业生产、经济回报、土地需求和土地利用变化越来越紧密,能源在全球农业土地利用格局、农产品贸易中扮演越来越重要的角色^[101-103];在跨越中国、缅甸、老挝、泰国和柬埔寨等国的湄公河的上游修建水坝会造成全流域河流水利、农业土地利用、渔业、漫滩生态系统的改变^[104];在我国海水稻研发技术日益突破,未来将利用滩涂资源拓展农业土地资源利用空间,实现沿海城市耕地资源有效储备^[105];离婚、家庭规模动态变化在世界范围内变得越来越普遍,这些变化影响土地面积、自然资源消耗,同时消费方式改变影响粮食需求^[106-107]。因此,未来农业土地系统耦合研究将不再局限于直接影响的分析,将更多的与社会、经济相交叉融合,需要同时加强耦合直接和间接影响分析。

4.3 建立大耦合框架

传统的农业土地系统耦合特征受到全球化、信息化的影响,呈现出多尺度、多因素、跨层级等特征,因此建立一个大耦合的研究框架迫在眉睫。Godfray等^[108]提出解决全球90亿人口的吃饭问题靠简单办法是难以解决的,未来的目标不再是最大限度的提高生产力,需要一个多层面、相互关联的全球战略,进行复杂耦合系统优化。Liu Jianguo等^[109]提出了最新的复合耦合(Metacoupled)框架,集成了相邻系统和远程系统之间的相互作用,使用多级解析方法,为人与自然耦合作用研究提供了全面的分析框架。Thomas^[110]提出从全球变化的视角研究农业生态,提出在全球变化背景下进行农业耦合研究。傅伯杰^[111]提出新时代自然地理学发展需要面对更加深入的学科交叉趋势和可持续发展的战略需求,自然地理学及其分支学科的发展需要面向全球环境变化和人类需求,探索应用新技术新方法。农业土地系统大耦合框架将评估多个系统内和多个系统之间的协调作用,考虑相邻区域和远距离乃至全球尺度相互间的可能影响,同时权衡农业生产、社会经济、生态环境、人类本身特性等。大耦合框架有利于发现对生态和经济潜在而又有巨大影响的信息,处理和解决尤其是影响世界性的重大问题,如气候变化、粮食安全、贫困、水

资源缺乏、社会稳定等。

参考文献

- [1] 唐华俊, 吴文斌, 余强毅, 等. 农业土地系统研究及其关键科学问题. 中国农业科学, 2015 (05): 900~910.
- [2] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展. 地理学报, 2009, 64 (4): 456~468.
- [3] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 等. 复杂系统理论与 Agent 模型在土地变化科学中的研究进展. 地理学报, 2011 (11): 1518~1530.
- [4] 万长贵, 任继周. 系统耦合与荒漠—绿洲草地农业系统——以祁连山—临泽剖面为例. 草业学报, 1994, 3 (3): 1~8.
- [5] 林慧龙, 侯扶江. 草地农业生态系统中的系统耦合与系统相悖研究动态. 生态学报, 2004 (06): 1252~1258.
- [6] 任继周. 草地农业生态学. 中国农业出版社, 1995.
- [7] 何绍福. 农业耦合系统的理论与实践研究——以马坪镇为实验区. 福建师范大学自然地理学, 2005.
- [8] 李西良, 侯向阳, 丁勇, 等. 牧户尺度草畜系统的相悖特征及其耦合机制. 中国草地学报, 2013 (05): 139~145.
- [9] 竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系. 地理学报, 1964 (01): 1~13.
- [10] 王旭, 曾昭海, 胡跃高, 等. 豆科与禾本科牧草混播效应研究进展. 中国草地学报, 2007 (04): 92~98.
- [11] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 等. 玉米—大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响. 作物学报, 2015 (04): 642~650.
- [12] Li Q, Chen J, Wu L, et al. Belowground Interactions Impact the Soil Bacterial Community, Soil Fertility, and Crop Yield in Maize/Peanut Intercropping Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19 (2): 622.
- [13] Saini L K, Singh M, Kapur M L. Relative profitability of intercropping vegetable crops in autumn planted sugarcane. *Sugar Tech*, 2003, 5 (1-2): 95~97.
- [14] 陶忠虎, 周滢, 周多勇, 等. 虾稻共生生态高效模式及技术. 中国水产, 2013 (07): 68~70.
- [15] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, 1999, 2 (6): 220~221.
- [16] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J. M. Biocomplexity in Coupled Natural-Human Systems A Multidimensional Framework. *Ecosystems*, 2005, 8 (3): 225~232.
- [17] Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317 (5844): 1513~1516.
- [18] Feddema J, Oleson K, Bonan G, et al. A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land cover representations. *Climate Dynamics*, 2005, 25 (6): 581~609.
- [19] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global Consequences of Land Use. *Science*, 2005, 309 (5734): 570~574.
- [20] Long H, Ge D, Zhang Y, et al. Changing man-land interrelations in China's farming area under urbanization and its implications for food security. *Journal of Environmental Management*, 2018, 209: 440~451.
- [21] Yu Q, Hu Q, Vliet J V, et al. GlobeLand30 shows little cropland area loss but greater fragmentation in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 66: 37~45.
- [22] 赵伟伟. 城镇化建设视域下农村空心化现状及原因探析. 改革与开放, 2017 (02): 63~64.
- [23] 陈坤秋, 王良健, 李宁慧. 中国县域农村人口空心化——内涵、格局与机理. 人口与经济, 2018 (01): 28~37.
- [24] Yang L, Wang L, Li H, et al. Impacts of Fertilization Alternatives and Crop Straw Incorporation on N₂O Emissions from a Spring Maize Field in Northeastern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (4): 881~892.
- [25] 余进祥, 赵小敏, 吕珩, 等. 鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征. 江西农业大学学报, 2010 (02): 394~402.
- [26] 张雨蒙, 申丽霞. 农田土壤残膜的污染现状及应对措施. 天津农业科学, 2018 (02): 86~90.
- [27] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤—植物系统中重金属污染及作物富集研究进展. 河南农业大学学报, 2000 (01): 30~34.
- [28] 廖和平, 邓旭升, 卢艳霞. 三峡库区坡地资源优化利用模式与途径. 山地学报, 2005 (02): 197~202.
- [29] Sun D, Li H, Lin P. Monitoring land use and landscape changes caused by migrant resettlement with remote sensing in Region of Three Gorges of Yangtze River. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 9 (5): 218~224.

2018年2月

- [30] 王东胜, 谭红武. 人类活动对河流生态系统的影响. 科学技术与工程, 2004 (04): 299~302.
- [31] Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Coupled Human and Natural Systems. *Ambio*, 2007, 36 (8): 639~649.
- [32] Assessment Millennium Ecosystem. Ecosystems and Human Well-Being. *Island Press*, 2005.
- [33] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化. 农业工程学报, 2017 (06): 214~221.
- [34] 张洁瑕. 高寒半干旱区蔬菜水肥耦合效应及硝酸盐限量指标的研究. 2003.
- [35] 陈百明, 张凤荣. 中国土地可持续利用指标体系的理论与方法. 自然资源学报, 2001 (03): 197~203.
- [36] 杨柳, 余平祥, 胡月明, 等. 基于景观生态指标的农用地连片阈值调整方法. 华南农业大学学报, 2017 (02): 112~117.
- [37] Mah D Y S, Kuok K K K, Fang Y T. Case study of exploited riparian corridors: rapid assessment of ecological health for riparian buffer width. *International Journal of River Basin Management*, 2016, 14 (1): 57~64.
- [38] Kennedy C M, Wilkinson J, Balch J. Conservation Thresholds for Land Use Planners. *Environmental Law Institute*, 2003.
- [39] 刘建国, Dietz T, Carpenter S R, 等. 人类与自然耦合系统. *AMBIO- 人类环境杂志*, 2007, 1 (B12): 602~611.
- [40] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008 (02): 18~25.
- [41] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114 (1): 69~85.
- [42] 肖文婧. 鄱阳湖生态经济区土地生态脆弱性评价. 江西农业大学, 2015.
- [43] 陈静, 周静平, 李存军, 等. 全国农业生态系统脆弱性评价. 江苏农业科学, 2018, 46 (2): 217~223.
- [44] 孙晶, 王俊, 杨新军. 社会-生态系统恢复力研究综述. 生态学报, 2007 (12): 5371~5381.
- [45] 李晓, 周丁扬. 农业系统恢复力研究进展综述. 资源科学, 2015 (09): 1747~1754.
- [46] Peeples M A, Barton C M, Schmich S. Resilience lost: Intersecting land use and landscape dynamics in the prehistoric Southwestern United States. *Ecology and Society*, 2006, 11 (2): 3213~3217.
- [47] 黄河清, 甄霖, 闫惠敏. 土地系统的脆弱性及其恢复力建设. 中国科学院院刊, 2009 (06): 649~654.
- [48] 钱学森. 论系统工程. 1982.
- [49] 魏宏森, 曾国屏. 系统论的基本规律. 自然辩证法研究, 1995 (04): 22~27.
- [50] 贝塔朗菲 L V. 一般系统论. 社会科学文献出版社, 1987.
- [51] 魏宏森. 系统论. 世界图书出版公司, 2009.
- [52] 马建华. 系统科学及其在地理学中的应用. 科学出版社, 2003.
- [53] 王翼, 王秀峰. 现代控制论基础. 高等教育出版社, 1996.
- [54] 刘甲玉. 维纳控制论思想方法述评. 大庆高等专科学校学报, 2004 (02): 17~19.
- [55] 朱雪龙. 应用信息论基础. 清华大学出版社, 2001.
- [56] 宋继娜. 农业产业化进程中信息资源开发的研究. 河北农业大学, 2002.
- [57] 张金屯. 应用生态学. 科学出版社, 2003.
- [58] 杨公朴, 夏大慰. 现代产业经济学 (第2版). 上海财经大学出版社, 2005.
- [59] 鲁奇, 任国柱. 农业资源态势分析与优化配置. 科学出版社, 2002.
- [60] 冯之浚. 循环经济导论. 人民出版社, 2004.
- [61] 中国科学技术协会. 2011~2012 生态学学科发展报告. 中国科学技术出版社, 2012.
- [62] Liu Z, Yang X, Chen F, et al. The effects of past climate change on the northern limits of maize planting in Northeast China. *Climatic Change*, 2013, 117 (4): 891~902.
- [63] Olesen J E, Bindi M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 2002, 4 (16): 239~262.
- [64] Lawrence P J, Feddema J J, Bonan G B, et al. Simulating the Biogeochemical and Biogeophysical Impacts of Transient Land Cover Change and Wood Harvest in the Community Climate System Model (CCSM4) from 1850 to 2100. *Journal of Climate*, 2012, 25 (9): 3071~3095.
- [65] Foster D, Swanson F, Aber J, et al. The importance of land-use legacies to ecology and conservation. *Bioscience*, 2003, 53 (1): 77~88.
- [66] Rueda X, Lambin E F. Linking Globalization to Local Land Uses: How Eco-Consumers and Gourmands are Changing the Colombian Coffee Landscapes. *World Development*, 2013, 41: 286~301.
- [67] Rudel T K, Schneider L, Uriarte M, et al. Agricultural intensification and changes in cultivated areas, 1970~2005. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106 (49): 20675~20680.
- [68] Reidsma P, Janssen S, Jansen J, et al. On the development and use of farm models for policy impact assessment in the

- European Union—A review. *Agricultural Systems*, 2018, 159: 111~125.
- [69] 彭文英, 马思瀛, 戴劲. 农户土地利用行为及其调控研究. 首都经济贸易大学学报, 2017 (04): 71~77.
- [70] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108 (9): 3465~3472.
- [71] Zimmerer K S, Lambin E F, Vanek S J. Smallholder telecoupling and potential sustainability. *Ecology and Society*, 2018, 23 (1).
- [72] 余强毅, 吴文斌, 杨鹏, 等. Agent 农业土地变化模型研究进展. 生态学报, 2013 (06): 1690~1700.
- [73] 吴文斌, 杨鹏, 李正国, 等. 农作物空间格局变化研究进展评述. 中国农业资源与区划, 2014 (01): 12~20.
- [74] Verburg P H, Mertz O, Erb K H, et al. Land system change and food security: towards multi-scale land system solutions. *Curr Opin Environ Sustain*, 2013, 5 (5): 494~502.
- [75] Lobell D B, Field C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2007, 2 (0140021).
- [76] Liu J, Hull V, Batistella M, et al. Framing Sustainability in a Telecoupled World. *Ecology & Society*, 2013, 18 (262).
- [77] Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K H, et al. Globalization of land use: distant drivers of land change and geographic displacement of land use. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5 (5): 438~444.
- [78] Silva R, Batistella M, Dou Y, et al. The Sino-Brazilian Telecoupled Soybean System and Cascading Effects for the Exporting Country. *Land*, 2017, 6 (4): 53.
- [79] Sun J, Tong Y, Liu J. Telecoupled land-use changes in distant countries. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 (2): 368~376.
- [80] Friis C, Nielsen J. On the System. Boundary Choices, Implications, and Solutions in Telecoupling Land Use Change Research. *Sustainability*, 2017, 9 (12): 974.
- [81] Lenschow A, Newig J, Challies E. Globalization's limits to the environmental state? Integrating telecoupling into global environmental governance. *Environmental Politics*, 2016, 25 (1): 136~159.
- [82] Liu J, Yang W, Li S. Framing ecosystem services in the telecoupled Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14 (1): 27~36.
- [83] 邓楚雄, 谢炳庚, 李晓青, 等. 基于投影寻踪法的长株潭城市群地区耕地集约利用评价. 地理研究, 2013 (11): 2000~2008.
- [84] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, 333 (6042): 616~620.
- [85] 吴文斌, 杨鹏, 李正国, 等. 农作物空间格局变化研究进展评述. 中国农业资源与区划, 2014 (01): 12~20.
- [86] 龙禹桥, 吴文斌, 余强毅, 等. 耕地集约化利用研究进展评述. 自然资源学报, 2018 (02): 337~350.
- [87] 陈迪, 吴文斌, 周清波, 等. 亚洲耕地利用格局十年变化特征研究. 中国农业科学, 2018 (06): 1106~1120.
- [88] 胡琼, 吴文斌, 项铭涛, 等. 全球耕地利用格局时空变化分析. 中国农业科学, 2018 (06): 1091~1105.
- [89] 龙禹桥, 吴文斌, 胡琼, 等. 美洲耕地利用格局及其时空变化特征. 中国农业科学, 2018 (06): 1134~1143.
- [90] 项铭涛, 吴文斌, 胡琼, 等. 2000~2010 年欧洲耕地时空格局变化分析. 中国农业科学, 2018 (06): 1121~1133.
- [91] 曹隽隽, 吴文斌, 刘逸竹, 等. 基于 GlobeLand30 的大洋洲耕地利用格局变化分析. 中国农业科学, 2018 (06): 1156~1166.
- [92] 张莉, 吴文斌, 宋茜, 等. 2000—2010 年非洲耕地利用格局变化及其生态环境背景分析. 中国农业科学, 2018 (06): 1144~1155.
- [93] Liu Z, Li Z, Tang P, et al. Change analysis of rice area and production in China during the past three decades. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23 (6): 1005~1018.
- [94] Brown D G, Verburg P H, Jr R G P, et al. Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5 (5): 452~457.
- [95] 彭书时, 朴世龙, 于家焯, 等. 地理系统模型研究进展. 地理科学进展, 2018 (01): 109~120.
- [96] Torres S, Moran E, Silva R. Property Rights and the Soybean Revolution: Shaping How China and Brazil Are Telecoupled. *Sustainability*, 2017, 9 (12): 954.
- [97] 董非非, 刘爱民, 封志明, 等. 大豆传统产区粮食作物种植结构变化特征及原因分析——以黑龙江省嫩江县为例. 中国农业资源与区划, 2017 (03): 79~85.
- [98] Davis K F, Rulli M C, Seveso A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. *Nature Geoscience*, 2017 (10): s919~s924.
- [99] 史纪安, 陈利顶, 史俊通, 等. 榆林地区土地利用/覆被变化区域特征及其驱动机制分析. 地理科学, 2003

2018年2月

- (04): 493~498.
- [100] 刘旭华, 王劲峰, 刘明亮, 等. 中国耕地变化驱动力分区研究. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005(11): 1087~1095.
- [101] 张蕙杰, 樊胜根, 顾晓君. 生物能源发展对全球粮食及农业生产和贸易的影响. 中国食物与营养, 2007(09): 34~36.
- [102] 郭玲霞, 黄朝禧, 彭开丽. 从中国玉米生物乙醇发展分析生物能源对粮食安全的影响. 中国科技论坛, 2011(09): 139~145.
- [103] Woods J, Williams A, Hughes J K, et al. Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2991~3006.
- [104] Pokhrel Y, Burbano M, Roush J, et al. A Review of the Integrated Effects of Changing Climate, Land Use, and Dams on Mekong River Hydrology. *Water*, 2018, 10(3): 266.
- [105] 杨博野. 海水稻破解用地制约. 浙江经济, 2017(20): 45.
- [106] Eunice Y, Liu J. Environmental Impacts of Divorce. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(51): 20629~20634.
- [107] Liu J, Daily G C, Ehrlich P R, et al. Effects of household dynamics on resource consumption and biodiversity. *Nature*, 2003, 421(6922): 530~533.
- [108] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812~818.
- [109] Liu J. Integration across a metacoupled world. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): 29.
- [110] Tomich T P, Brodt S, Ferris H, et al. Agroecology: A Review from a Global-Change Perspective. *Annual Review of Environment & Resources*. 2011, 36(1): 193~222.
- [111] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 2018(01): 1~7.

Coupling characteristics of agricultural land system and its development trend

Xie Ankun, Zhou Qingbo^{*}, Wu Wenbin, Yu Qiangyi

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/
Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

Abstract: [**Objective**] Agricultural land systems are the agricultural systems based on land use. They reflect the multiple interactions between human and environmental systems that are strongly coupled. Understanding the coupling characteristics of agricultural land systems would help explain the complexity of coupled human-environment interactions. [**Method**] This paper summarizes the concepts, characteristics and theories of the agricultural land system coupling, reviews the current progress of relevant researches, and points out the future research priorities of agricultural land system coupling. [**Result/Conclusion**] In overall, the researches on agricultural land system coupling are at an infant stage with insufficient attention has been paid. The paper would help better understand and explain the human-environment relations, and explore the pathways for sustainable development of agricultural land systems.

Keywords: agricultural land system; system coupling; coupling characteristics; land use