

## 农业土地系统研究及其关键科学问题

唐华俊<sup>1</sup>, 吴文斌<sup>1,2</sup>, 余强毅<sup>1</sup>, 夏天<sup>2</sup>, 杨鹏<sup>1</sup>, 李正国<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081; <sup>2</sup> 华中师范大学城市和环境科学学院, 武汉 430079)

**摘要:** 如何科学合理利用土地是实现人类可持续发展的关键。随着人类对土地利用问题愈发关注, 在“土地利用/土地覆盖变化”、“全球土地计划”等国际科学研究计划的推动下, “土地系统科学”的学科体系逐步形成, 农业土地系统研究成为土地系统科学的热点方向之一。本文以全球土地计划与土地系统科学为指引, 旨在明晰“农业土地系统”的概念, 系统梳理农业土地系统研究的技术方法、内容对象以及关键科学问题, 为进一步丰富和完善土地系统科学学科体系, 推动全球变化、粮食安全及农业可持续研究提供参考。研究认为: 第一, 多维度格局探测与分析是农业土地系统研究的重要基础: 农业土地系统不仅关注耕地与其他土地利用类型之间的相互转换特征、规律和过程, 而且更为关注耕地内部多熟种植制度、农作物空间格局、利用集约度、综合生产能力等结构和功能的多维变化, 因此, 需要依靠多学科/数据的交汇、融合等手段来揭示农业土地系统的复杂特征; 第二, 多模型耦合的过程与机制解析是农业土地系统研究的核心内容: 在明晰农业土地系统时空格局特征的基础上, 通过建立土地系统格局与其影响因素之间的关系, 并将这种关系在时间维度进行扩展, 进而实现农业土地系统变化过程和机制的动态表达, 目前, 土地变化模型的建模手段已从传统单一的地理模型或经济模型研究转向模型耦合研究, 以反映农业土地系统中“人类-环境”的复杂关系; 第三, 多内容的综合效应评估与调控是农业土地系统研究的关键任务: 农业土地系统与全球变化、粮食安全及农业可持续发展等问题密切相关, 农业土地系统时空格局探测、过程机制解析的最终目的在于通过协调农业土地系统与农业资源、环境和生态的相互关系, 考虑不同系统之间的权衡优化关系, 追求土地利用的最佳社会、经济和生态综合效益, 以建立人地和谐、可持续的农业土地利用模式。解决农业土地系统研究的这些关键科学问题, 将有力促进自然科学和社会科学的融合, 推动土地系统科学及相关研究领域的发展。

**关键词:** 土地系统科学; 农业土地系统; 时空格局; 变化过程; 综合效应; 权衡优化

## Key Research Priorities for Agricultural Land System Studies

TANG Hua-jun<sup>1</sup>, WU Wen-bin<sup>1,2</sup>, YU Qiang-yi<sup>1</sup>, XIA Tian<sup>2</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>, LI Zheng-guo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081; <sup>2</sup>College of Urban & Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079)

**Abstract:** Agricultural land use and its dynamics have attracted much attention from researchers due to their ecological and socio-economic implications for agricultural sustainability. Several international programs such as the Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) and the Global Land Project (GLP) have promoted the emergence of Land System Sciences. Based on the latest progress in Land System Science, this review paper provides a definition of the Agricultural Land System (ALS) and conceptualizes a framework for the ALS studies relating to global change, food security, and sustainability studies. It is proposed that: 1) Multi-faceted patterns of ALS are the basis for subsequent analysis. It should consider not only the characteristics ALS at the land use and land cover level, e.g. the transitions between cropland and other land cover types, but also the characteristics of cropping system,

收稿日期: 2014-11-24; 接受日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(41271112)、中央级公益性科研院所专项资金(IARRP-2015-10)

联系方式: 唐华俊, Tel: 010-82109395; E-mail: tanghujun@caas.cn

crop allocation, intensification and productivity within cropland. Interdisciplinary approaches and data integration are necessary for understanding the complex characteristics of ALS. 2) Multi-model coupling through the interpretation and intercorrelation of ALS patterns and underlying drivers is an essential way to represent ALS dynamic changes, processes and its mechanisms, by which it is able to better understand the coupled human-environment interactions across different time, space and scales. 3) It is important to link the ALS with other parallel systems to understand their synergies and trade-offs, in order to build up a sustainable pathway for future agricultural land use. Those solutions for ALS studies would substantially promote the interdisciplinary integration and will contribute to the development of Land System Science and its relevant sciences.

**Key words:** land system science; agricultural land systems; pattern; process; synergy; trade-offs

土地是人类社会赖以生存和发展的基础。20 世纪 90 年代以来, 人类对土地利用问题愈发关注, 尤其在土地利用/土地覆盖变化计划 (Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)<sup>[1]</sup>与全球土地计划(Global Land Project, GLP)<sup>[2]</sup>两大科学研究计划的推动下, 以土地为核心研究对象的一门新兴学科得以诞生, 旨在通过研究土地资源的结构功能和形成演化规律, 揭示人类的土地利用活动与其他系统之间(如自然、社会、经济和生态系统等)的相互作用关系, 并探索人类与土地协调共生的途径与方法<sup>[3]</sup>。国内学者将其称为“土地科学”<sup>[4]</sup>, 但国外更多称其为“土地利用科学(land use science)”<sup>[5]</sup>、“土地变化科学(land change science)”<sup>[6]</sup>或“土地系统科学(land system science)”<sup>[3,7-9]</sup>。

早期的土地科学(如 LUCC 计划)侧重于关注土地利用与土地覆盖及其时空变化。土地覆盖侧重于土地的自然属性(如林地可被划分为针叶林、阔叶林、针阔混交林等, 以反映林地所处的生境、分布特征及其地带性分布规律和垂直差异), 而土地利用则侧重于土地的社会属性(如陆地表面可被划分为耕地、建设用地、未利用地等, 以体现人类利用土地的情况)<sup>[10]</sup>。从全球尺度到局地尺度, 土地利用与土地覆盖持续发生变化, 反映自然环境与人类活动相互作用的过程与结果。然而, 在很多情况下, 区域土地覆盖与土地利用未发生变化, 但其土地系统的功能与效应却发生了显著变化, 如森林范围内树种结构的变化会影响生物多样性, 耕地范围内农作物种植结构变化会影响粮食产量与农民收益等。因此, 随着 LUCC 计划 2005 年结束, 其后续 GLP 计划首次提出了“土地系统”的概念, 极大促进了“土地系统科学”的形成与发展。GLP 计划的核心概念由 LUCC 计划的土地利用与土地覆盖转向了土地系统: 土地系统不仅包括土地覆盖与土地利用的共同内涵<sup>[11]</sup>, 而且包括与土地有关的一切功能与效应的综合, 如经济效益、社会效益、生态系统服务等。GLP 计划旨在继续加强对区域和全球尺度土地

系统的理解, 力图促进全球变化研究中的科学融合。2014 年 3 月, 在德国柏林洪堡大学召开的第二届 GLP 开放科学会议, 从“系统性”、“复杂性”、“耦合性”等角度重新定义了土地系统科学的目标、任务、理论及方法体系。至此, 土地系统科学的概念得到国内外学术界的一致认可<sup>[9,12]</sup>, 基于此开展气候变化<sup>[13]</sup>、全球化<sup>[14]</sup>、城市化<sup>[15]</sup>、生态系统服务<sup>[16]</sup>、粮食安全<sup>[17]</sup>以及人类健康<sup>[18]</sup>等问题的研究。

农业土地利用是人类为了自身的生存和发展需求而有意识地对土地资源进行开发、经营和利用的活动, 是人类-环境关系的纽带和桥梁, 同时也是土地系统最为重要的组成部分。本研究试图在土地系统科学框架引导下, 提出“农业土地系统”的概念, 明确其在土地系统科学中的定位; 系统阐述农业土地系统研究的关键科学问题, 以及近年来取得的重要研究进展, 以期为进一步丰富和完善土地系统科学学科体系, 推动全球变化、粮食安全及农业可持续研究提供参考。

## 1 农业土地系统研究的兴起及其框架

作为土地系统的重要组成部分, 农业土地系统研究成为土地系统科学的热点方向<sup>[19]</sup>, 其不仅限于某个特定位置的作物栽培模式, 还应考虑地理空间内作物的组成与布局、作物的复种或休闲、作物的种植方式等内容<sup>[20]</sup>。农业土地系统的重要性不言而喻: 一方面, 作为全球面积最大的土地利用类型<sup>[21]</sup>, 农业用地(含牧草地)约占全球陆表面积的 38%, 产生的大量产品直接关乎人类粮食安全<sup>[22]</sup>, 全球作物产量的 62%直接供人类进行食物消费, 35%作为牲畜饲料间接为人类提供食物。另一方面, 农业用地作为一种空间连续的自然和社会经济综合体, 其状态与功能随时间发生变化, 如全球耕地面积不断扩张<sup>[23]</sup>、农业土地利用方式正经历着从粗放扩张向集约化利用的转变<sup>[24-25]</sup>。这些变化对气候变化、陆地生态系统地球物理和地球化学循环过程、全球陆地-海洋相互作用等有着重要

影响<sup>[26]</sup>，驱动区域乃至全球生态环境变化。如农业土地利用方式变化影响了全球水文及碳循环和能量平衡，破坏了全球很多区域的生态环境<sup>[27]</sup>；大量农药、化肥和生产设施的使用，导致了土壤污染、水质量的降低和生态多样性消失<sup>[28]</sup>。因此，如何科学合理利用农业土地是农业可持续发展中需要认真对待并加以解决的重大课题之一<sup>[22]</sup>，也是地理学、生态学等领域的前沿和热点研究方向之一。

农业土地系统可以认为是以土地为核心承载的农

业系统，是农业系统与土地系统的结合部分，即人类利用耕地从事的一切活动及其结果。具体的，农业土地系统依托于地球系统，存在于自然环境与人类社会的交叉部分，与地球系统各圈层之间存在多重作用过程，以保障人类生计与粮食安全为核心职能，以土地权属、作物格局、集约化等为具体表象，是全球环境变化与可持续发展的核心研究领域。可以看出，农业土地系统与诸多学科领域紧密联系，需要利用学科交叉的视角开展相关研究（图 1）。

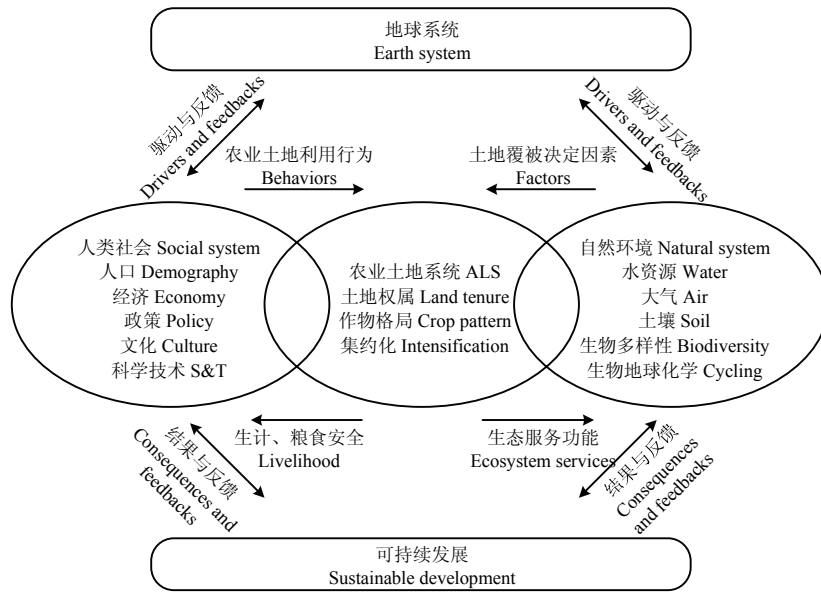


图 1 农业土地系统及其与其他学科领域的关系

Fig. 1 Agricultural land system and its relations with other fields

农业土地系统研究的核心目的在于理解和解释农业生产过程中的“人类-自然”综合复杂关系，进而为可持续农业发展提供科学服务<sup>[29]</sup>。经过多年的持续发展，形成了如图 2 所示的农业土地系统研究框架。与土地系统科学的核心研究内容类似，农业土地系统研究的关键科学问题包括农业土地系统的时空格局探测、变化过程模拟、以及综合效应分析等 3 个方面，其具体研究对象从耕地时空分布扩展至作物分布、作物物候、种植制度、农业集约化、农业灾害、农业综合生产能力、农业生态系统服务、经济效益、政策效果等诸多方面，研究方法手段也从单一方法向综合模型进行转变，研究数据涵盖遥感、地面观测、社会经济统计等多源数据集（图 2）。

## 2 多维度格局探测与分析是农业土地系统研究的重要基础

如前所述，农业土地系统研究对象具有高度的多样性、复杂性和综合性，涉及到自然科学、工程科学和社会科学等多个门类，开展多对象、多方法和多尺度等多维度的时空格局探测与分析是农业土地系统研究的首要任务。

农业土地系统早期的研究对象以耕地时空格局及其动态变化为主，即研究耕地数量和空间变化态势，及与其他土地利用方式的相互转换特征、规律和过程。随着土地系统概念的不断深入，农业土地系统研究不仅关注耕地格局变化，也十分关注耕地多熟种植制度、

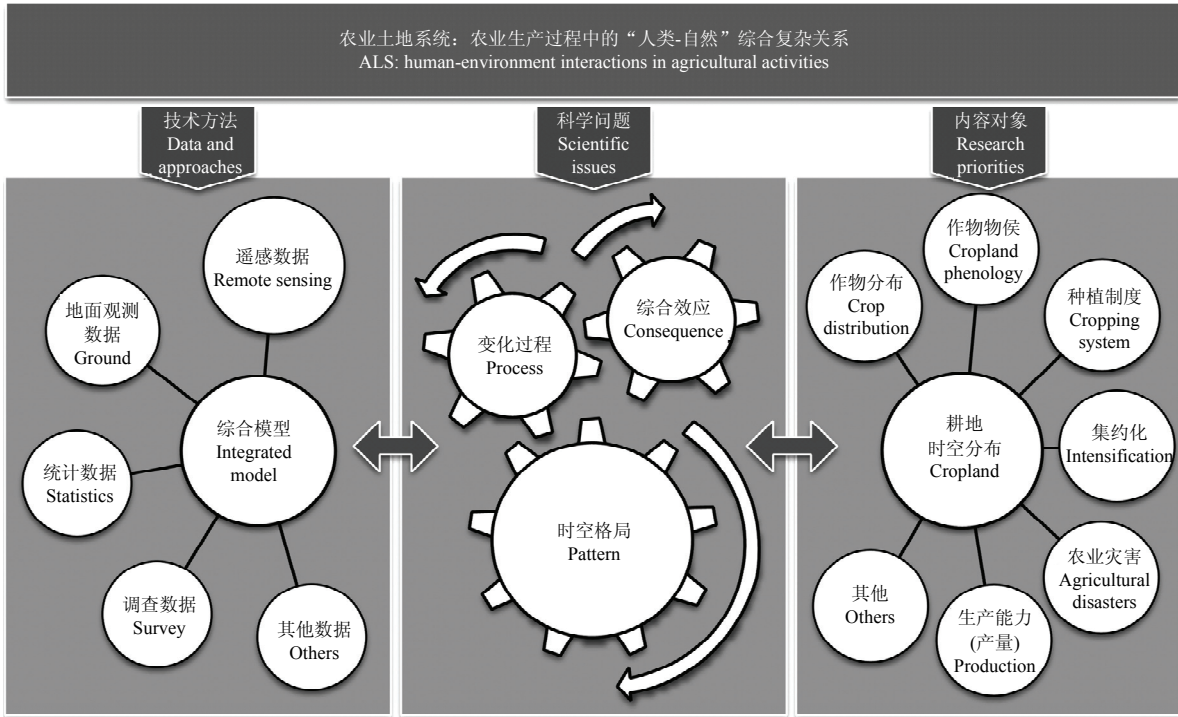


图 2 农业土地系统研究框架

Fig. 2 Methods, data, tools and the research questions for agricultural land system studies

农作物空间格局、利用集约度、综合生产能力等结构和功能的多维变化。多熟制度指农业土地的复种或休闲，即一年几熟或几年几熟的问题，反映了不同区域农业土地利用的自然环境与社会经济因素的差异性和多样性。农作物空间格局是一个地区或生产单位的农作物组成与布局、熟制与种植方式的空间表达，描述了农业生产在空间范围内利用农业土地资源状况<sup>[20]</sup>。农业土地利用集约度刻画了单位土地面积下农业生产资料（资金、劳动和技术等）投入的高低。此外，很多学者也关注农业土地利用在时间维的变化特征，如研究分析气候因子变化介导的作物生育期的提前或推迟，以及耕地的撂荒或休闲等种植方式。

从技术方法看，多维度时空格局探测方法主要包括基于统计数据的方法、基于遥感信息的方法、基于空间模型的方法以及基于社会调查的方法等。基于统计数据的方法是最常用的传统方法，已广泛应用于大区域尺度和长时间序列的农作物空间格局或作物产量的时空格局及其变化特征分析。该方法不仅可以获取统计单元内数量和速率等特征的详细信息，还可以分析作物物候期、灌溉量、施肥量、投入成本和动力费用等和农作物生长、农业生产紧密相关的其他信息。

近年来，随着空间技术的不断发展，多传感器、多时间分辨率和多空间分辨率遥感数据在农业土地系统时空格局探测和变化检测中得到广泛应用。基于遥感数据时空格局探测方法从最初的目视解译法发展到基于统计学的分类法（如监督分类方法、多时相分类方法、多源数据结合分类法等），以及其他遥感分类法（如神经网络方法、模糊数学分类法、专家系统分类法、混合像元分解法等）<sup>[20]</sup>。如自 1997 年起，美国农业部国家农业统计中心利用多源中高分辨率遥感影像，制作美国每年度作物分布图<sup>[30]</sup>。利用时间序列植被指数构建作物生长曲线，可以获取区域复种指数<sup>[31-33]</sup>、轮作方式<sup>[34]</sup>、物候特征<sup>[35-36]</sup>、耕地废弃<sup>[37]</sup>等空间分布格局。此外，空间模型也广泛应用于进行农业土地系统格局分析，如利用作物潜在热量值、最适生长温度、最低临界生长温度和生育期日数等作物生理参数，在全球尺度模拟了单一作物、冬小麦-玉米、水稻-水稻等 7 种作物种植制度的潜在空间分布区域<sup>[38]</sup>。基于空间模型的方法不仅可以应用于不同地域尺度的农作物空间分布模拟，也可用于未来气候变化情景下的农作物空间分布模拟预测<sup>[39-40]</sup>。基于社会调查的方法是对前几种方法的有效补充，能够直观地从土地利用决策



者的角度获取土地系统的格局特征<sup>[41]</sup>。

以上几种方法各具特色,但也存在不同的缺陷。如统计方法易受人为因素的干扰较大,遥感方法存在混合像元、大气校正、尺度转换等诸多亟待解决的问题,模型方法多考虑生态环境因子,而对社会经济因子考虑不够<sup>[42]</sup>,社会调查方法的成本巨大,且只适用于小区域尺度应用。因此,需要依靠多学科研究方法的交汇、融合才能揭示复杂现象的本质,基于多尺度、多信息源数据融合的复合方法成为目前时空格局探测与分析重要手段之一<sup>[43-44]</sup>。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图集<sup>[21,45-46]</sup>,以及不同的灌溉和雨养条件的耕地或作物空间分布<sup>[47]</sup>。然而,不同数据源之间的尺度、精度、采集方法等差异会影响多源数据应用,如不同遥感数据集采取的分类规则和分类系统可能不相同,遥感数据获取的作物面积与统计数据作物面积数量可能不一致<sup>[48]</sup>,进一步减少数据差异带来的不确定性需要深入分析。此外,这些已有的数据产品空间分辨率较粗、长时间序列数据缺乏,限制了应用潜力。因此,如何提高此类方法的空间分配精度和数据产品的时间序列长度是需要重点解决的科学难点问题。针对调查方法应用范围有限的问题,可开展 Meta 分析,在综合研究多个局地尺度研究结果的基础上,梳理总结农业土地系统的特征与规律,并升尺度至区域应用<sup>[49-51]</sup>。

### 3 多模型耦合的过程与机制解析是农业土地系统研究的核心内容

多维度的探测方法可以揭示农业土地系统的时空格局,但难以很好解释土地系统变化过程与机理机制。变化过程是时空格局特征的动态展现,目前比较可行的方案是借助一定的数学方法,建立土地系统格局与其影响因素之间的关系,并将这种关系在时间维度进行扩展,从而实现农业土地系统变化过程和机制的动态表达。因此,农业土地系统模拟已逐步发展成为土地系统科学研究的一个核心研究内容<sup>[2,6,52-54]</sup>。

农业土地系统模拟模型根据空间表达能力可分为空间模型与非空间模型<sup>[53]</sup>。非空间模型仅侧重于研究分析农业土地变化的数量和速率特征,对变化的空间分布并不给予太多考虑<sup>[55]</sup>。随着空间信息技术的发展,模型逐渐开始重视土地利用格局及其变化的空间显性化表达<sup>[52]</sup>。空间模型一般由经验统计模块与空间

分配模块结合而成,经验统计模块的作用类似于非空间模型,空间分配模块综合考虑诸多限制因素和转换规则,实现非空间模块的变化数量的空间分配。经典的空间模型包括 CLUE 系列、GEOMOD、SLEUTH 与 CA-Markov 等<sup>[56]</sup>。尤其近年来,遥感技术在支撑和服务农业土地系统空间模型构建中发挥了重要作用,模型空间尺度与所使用的遥感数据空间分辨率总体一致,如分辨率较高的遥感数据往往多应用于研究区域小的模拟模型构建,反之亦然。

从建模理论与方法出发,农业土地系统模型可分为地理模型和经济模型。地理模型重点关注“环境”因子的影响,其分析对象往往是具有一定面积的土地单元,或栅格系统中网格表述的一定面积区域,利用地理网格数据或行政区域社会经济统计数据可以较为容易地建立农业土地变化与环境因子之间的关系。地理模型又可以细分为空间统计模型和地理过程模型<sup>[6]</sup>。空间统计模型一般假定土地变化与驱动因子之间的统计关系不变,一旦确定这种关系,就能将驱动因子的时空变化结果反映至农业土地系统格局(如 CLUE-S 模型);过程模型则相对更为复杂,需要综合考虑农业土地变化与其所处“人类-环境”耦合系统的协同关系<sup>[6]</sup>。地理空间模型可以有效分析农业土地系统变化的主要驱动因子和具体过程,但明显不足是农业土地系统变化过程中发挥重要作用的人类选择或决策行为得不到显性描述<sup>[53]</sup>。社会经济模型则更多从“人”的角度出发,研究不同层次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,进而解释农业土地系统变化的过程和机制。近年来,基于主体的模型(agent based model)逐渐应用于农业土地系统模拟研究,极大地丰富了该领域的理论与方法<sup>[56-57]</sup>。如根据农户土地利用态度构建的 CroPaDy 模型(an agent-based model for simulating Crop Pattern Dynamics),在局地尺度实现了“自然与社会经济综合因素-农户态度-农户决策-农作物时空格局”动态变化过程的科学表达<sup>[58-59]</sup>。

农业土地系统的形成和变化是不同尺度下自然和人文因素综合作用的结果,实质上反映的是“人类-环境”复杂关系问题。因此,耦合地理模型和社会经济模型的综合模型是农业土地系统模型研究的热点方向,这对于自然科学和社会科学融合和综合研究也是一个巨大挑战<sup>[60]</sup>。如 MAgPIE 模型将经济模型与全球植被动力学模型(dynamic global vegetation model)进行结合,模拟未来全球生物质能源作物生长与分布的

情景<sup>[61]</sup>；Dyna-CLUE 模型将 CLUE-S 与植被动态变化算法（Bottom-up algorithms of vegetation dynamics determined by local conditions）相结合，模拟未来欧洲耕地废弃或扩张的动态变化过程<sup>[62]</sup>；作物生长模型 EPIC（environmental policy integrated climate model）与农业经济模型 IFPSIM（international food policy and agricultural simulation model）相结合，实现了未来全球主要农作物空间格局的模拟分析<sup>[39]</sup>。

农业土地系统在不同时空尺度上发生、作用和演变，多尺度和多层次的综合是农业土地系统模拟模型的新要求<sup>[63]</sup>。分析目前已有的农业土地系统模型发现，模型空间分辨率的设置经历了一个从早期的单一空间尺度到现今的多空间尺度的转变，自顶而下和自底而上的多尺度模型有助于更好的理解农业土地变化的过程及结果<sup>[53]</sup>。农业土地系统模型的时间尺度设定主要取决于研究对象与目的，如以耕地变化为主的模型时间分辨率一般较低（如 5 年或 10 年为周期），因为这类变化比较缓慢。但是，目前越来越多的研究开始注重耕地内部的农作物空间格局变化和更替过程<sup>[64]</sup>，如 CROPS 模型（crop pattern simulator）<sup>[65]</sup>，这类变化时间幅度和间隔短，时间分辨率往往较高。

#### 4 多内容的综合效应评估与调控是农业土地系统研究的关键任务

人类发展的历史是不断对土地加以开发利用和对土地覆盖进行改造的历史，对土地的利用过程实际上也是人类对资源、环境和生态的干预过程<sup>[24]</sup>。农业土地系统也是如此，处于持续动态变化之中，对自然生态系统和社会-经济系统具有重要影响。因此，全面掌握和分析农业土地系统变化的影响和效应，并进行科学调控和优化成为农业土地系统研究的关键任务。

农业土地系统变化的影响和效应是多方面的。一方面，农业土地系统变化通过改变地表覆盖和利用强度状况，改变地球表面的物理特征和生物地球化学循环过程，影响地表与大气之间的能量、水分和元素的交换过程，以及土壤-植被之间的营养物质输送过程，进而对农业气候、水和土壤等资源环境产生影响<sup>[27,66]</sup>。如农业土地利用变化会带来 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 等温室气体浓度变化，引起地表反射率、粗糙度、植被叶面积和植被覆盖比等下垫面物理性质的改变，引起局地与区域的气候变化<sup>[67-70]</sup>；农业集约化程度的提高，大量使用地下水进行农业生产灌溉，地下水超量开采造

成水位变化，影响水资源的持续利用<sup>[71-72]</sup>。同时，农业土地系统变化会在不同尺度上影响生态系统的结构与功能，其生态效应主要体现在对生态系统服务价值、水质、生物多样性以及碳排放强度和景观破碎化程度等方面<sup>[16,73-75]</sup>。另一方面，农业土地系统对农业社会-经济发展具有深刻的影响。如自人类社会出现以来就持续不断从耕地中获取食物供给，耕地面积的扩展、土地利用集约度的提高、农作物单产的提升和空间布局 and 种植结构的调整等，对保障区域或国家粮食安全、促进农业增长、农村稳定和农民增收等发挥了重要作用<sup>[76-79]</sup>。

常用的效应评估方法以定性和定量分析为主，尤其是综合的定量评估方法成为农业土地系统效应分析的主要方向<sup>[74,80-83]</sup>。通常的做法是，在农业土地系统变化的基础上，构建影响和效应评价的指标体系，选择最优的评价因子，建立响应的权重，应用专家打分法、德尔菲法、层次分析法、因子分析法以及灰色关联评价法等实现单因子评价和综合评价。如可以建立农业土地时空格局与自然-社会效应之间的特定经验关系，如耕地数量（质量）与粮食产量<sup>[84]</sup>、耕作方式与碳氮循环<sup>[85]</sup>等，利用这些特定经验关系，结合农业土地变化监测/模拟结果，可以实现不同地区的不同时空尺度下农业土地系统变化效应评价。此外，也可利用模型嵌套的方法，评估不同系统之间生态系统服务价值的转移关系，如 Ye 等<sup>[86]</sup>利用作物模拟模型评估了中国未来气候变化背景下的粮食安全情况，Liu 等<sup>[87]</sup>利用多学科融合的理论与方法，评估了土地利用政策（退耕还林）对农户生计的影响。

有学者提出了“人类占用的净初级生产量（human appropriation of net primary production）”这一概念<sup>[88]</sup>，人类对其所处的自然-社会综合系统的干预将会愈发剧烈。农业土地利用则是人类利用自然最为基础的一种方式：通过与土地结合获取物质产品和服务的经济活动过程。在人口持续增长和经济快速发展的背景下，土地利用活动的需求和目标会显著调整，人类对农业土地的利用广度、频度和强度等会持续变化，加大对生态环境的干预程度；生态环境的演变又会反过来影响或制约农业土地利用活动。如通过提高单产、缩小产量差、实现农业土地系统单位面积产出最大化时，往往会增加农药、化肥等投入、选育高产品种和改善耕作栽培技术，这些会带来土地退化、土壤污染、土地生产力下降，以及遗传多样性降低等问题。可见，迫切需要开展农业土地利用方式的调控和

优化研究、农业土地集约利用和科学保护协同研究、资源节约型和环境友好型的土地利用模式研究,协调农业土地系统与农业资源、环境和生态的相互关系,考虑不同系统之间的权衡优化关系( trade-offs),追求土地利用的最佳社会、经济和生态综合效益结合,建立一个人地和谐、可持续的农业土地利用模式<sup>[89-92]</sup>。

## 5 结论与展望

随着土地系统科学研究的不断深入,国内外学者围绕农业土地系统研究开展了大量深入研究,在理论研究和方法应用方面都取得了显著进展,为掌握农业土地系统时空格局、变化过程和原因,评估变化的综合影响,服务政策部门决策支持等发挥了重要作用。本研究在土地系统科学框架下,对“农业土地系统”的概念进行科学阐述,明确其总体研究框架,重点系统阐述了农业土地系统研究的3个关键科学问题。利用多技术手段进行多维度格局探测与分析重点在于揭示农业土地系统的时空格局及其变化规律,是农业土地系统变化过程和机制解析、综合效益评估和调控的首要前提。多模型耦合的过程与机制解析是农业土地系统研究的核心内容,可以动态展现农业土地系统时空格局的变化过程、科学解析格局形成的过程途径和机理机制。农业土地利用是人类进行土地开发利用、获取物质产品和服务的活动,必然对生态环境和社会经济产生影响。因此,分析和掌握农业土地系统变化的结果和效应是农业土地系统研究的重要出口,也是对农业土地系统进行科学调控和优化管理的关键任务。但是,农业土地利用实质上反映了“人类-环境”的复杂性问题,农业土地系统研究仍然面临诸多难点和挑战,需要从系统观和整体观的角度来综合考虑人-地复合关系。因此,多尺度、多数据、多因素、多模型和多方法的综合研究将是未来农业土地系统研究的重要方向和重要内容,这也必将有力促进自然科学和社会科学的融合和综合研究。

## References

- [1] Turner II B L, Skole D L, Sanderson S, Fischer G, Fresco L, Leemans R. Land-use and land-cover change: Science/Research plan, 31393[R]. Stockholm: IGBP Secretariat, 1995.
- [2] Global Land Project. Science plan and implementation strategy[R]. Stockholm: IGBP Secretariat, 2005.
- [3] Verburg P H, Erb K, Mertz O, Espindola G. Land system science: between global challenges and local realities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 433-437.
- [4] 吴次芳. 土地科学学科建设若干基本问题的反思与探讨. *中国土地科学*, 2014, 28(2): 22-28.
- Wu C F. Reflections and discussions on several basic issues of the disciplinary construction of land science. *China Land Science*, 2014, 28(2): 22-28. (in Chinese)
- [5] Aspinall R. Editorial: Land use science. *Journal of Land Use Science*, 2006, 1(1): 1-4.
- [6] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [7] Reenberg A. Land system science: handling complex series of natural and socio-economic processes. *Journal of Land Use Science*, 2009, 4(1): 1-4.
- [8] Rounsevell M D A, Pedrolí B, Erb K, Gramberger M, Busck A G, Haberl H, Kristensen S, Kuemmerle T, Lavorel S, Lindner M, Lotze-Campen H, Metzger M J, Murray-Rust D, Popp A, Pérez-Soba M, Reenberg A, Vadineanu A, Verburg P H, Wolfslehner B. Challenges for land system science. *Land Use Policy*, 2012, 29(4): 899-910.
- [9] Turner II B L. Land system science: land systems, sustainability and land system architecture. 2nd GLP Open Science Meeting, Berlin, 2014.
- [10] 唐华俊, 陈佑启, 邱建军, 陈仲新. 中国土地利用/土地覆盖变化研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- Tang H J, Chen Y Q, Qiu J J, Chen Z X. *Land-Use and Land-Cover Change in China*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [11] Turner B L, Janetos A C, Verburg P H, Murray A T. Land system architecture: using land systems to adapt and mitigate global environmental change. *Global Environmental Change*, 2013, 23(2): 395-397.
- [12] Reenberg A. Global land science: from land use analysis to land system analysis. 2nd GLP Open Science Meeting, Berlin, 2014.
- [13] Wu W B, Verburg P, Tang H J. Climate change and the food production system: impacts and adaptation in China. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 1-5.
- [14] Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K, Hertel T W. 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.
- [15] Güneralp B, Seto K C, Ramachandran M. Evidence of urban land

- teleconnections and impacts on hinterlands. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 445-451.
- [16] Crossman N D, Bryan B A, de Groot R S, Lin Y, Minang P A. Land science contributions to ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 509-514.
- [17] Verburg P H, Mertz O, Erb K, Haberl H, Wu W. Land system change and food security: towards multi-scale land system solutions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 494-502.
- [18] Messina J P, Pan W K. Different ontologies: land change science and health research. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 515-521.
- [19] Volk M, Ewert F. Scaling methods in integrated assessment of agricultural systems-state-of-the-art and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 142(1/2): 1-5.
- [20] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 周清波, 陈仲新. 农作物空间格局遥感监测研究进展. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2879-2888.
- Tang H J, Wu W B, Yang P, Zhou Q B, Chen Z X. Recent progresses in monitoring crop spatial patterns by using remote sensing technologies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(14): 2879-2888. (in Chinese)
- [21] Ramankutty N, Evan A T, Monfreda C, Foley J A. Farming the planet 1. geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: B1003.
- [22] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, Cassidy E S, Gerber J S, Johnston M, Mueller N D, O Connell C, Ray D K, West P C, Balzer C, Bennett E M, Carpenter S R, Hill J, Monfreda C, Polasky S, Rockstrom J, Sheehan J, Siebert S, Tilman D, Zaks D P M. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [23] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [24] Ellis E C, Kaplan J O, Fuller D Q, Vavrus S, Klein Goldewijk K, Verburg P H. Used planet: a global history. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2013, 110(20): 7978-7985.
- [25] Barretto A G O P, Berndes G, Sparovek G, Wirseni S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975-2006 period. *Global Change Biology*, 2013, 19(6): 1804-1815.
- [26] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, Ongaro L, Shibasaki R. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1697-1702.
- Wu W B, Yang P, Tang H J, Ongaro L, Shibasaki R. Regional variability of effects of land use system on soil properties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1697-1702. (in Chinese)
- [27] Pielke Sr. R A. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310(5754): 1625-1626.
- [28] Pimm S L, Raven P. Biodiversity: Extinction by numbers. *Nature*, 2000, 403(6772): 843-845.
- [29] Bezlepkina I, Reidsma P, Sieber S, Helming K. Integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use: methods, tools and applications. *Agricultural Systems*, 2011, 104(2): 105-109.
- [30] Boryan C, Yang Z, Mueller R, Craig M. Monitoring US agriculture: the US Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Cropland Data Layer Program. *Geocarto International*, 2011, 26(5): 341-358.
- [31] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 近 20 年中国耕地复种指数的时空变化. *地理学报*, 2005, 60(4): 559-566.
- Yan H M, Liu J Y, Cao M K. Remotely sensed multiple cropping index variations in China during 1981-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 559-566. (in Chinese)
- [32] Sakamoto T, Van Nguyen N, Ohno H, Ishitsuka N, Yokozawa M. Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(1): 1-16.
- [33] 唐鹏钦, 吴文斌, 姚艳敏, 杨鹏. 基于小波变换的华北平原耕地复种指数提取. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 220-225.
- Tang P Q, Wu W B, Yao Y M, Yang P. New method for extracting multiple cropping index of North China Plain based on wavelet transform. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7): 220-225. (in Chinese)
- [34] Lunetta R S, Shao Y, Ediriwickrema J, Lyon J G. Monitoring agricultural cropping patterns across the Laurentian Great Lakes Basin using MODIS-NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(2): 81-88.
- [35] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 周清波, Shibasaki R, 张莉, 唐鹏钦. 过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化. *生态学报*, 2009, 29(4): 1777-1786.
- Wu W B, Yang P, Tang H J, Zhou Q B, Shibasaki R, Zhang L, Tang P Q. Spatio-temporal variations in the starting dates of growing season in China's cropland over the past 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1777-1786. (in Chinese)
- [36] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 周清波, 吴文斌, 邹金秋, 张莉, 张小飞. 东北三省耕地物候期对热量资源变化的响应. *地理学报*, 2011, 66(7): 928-939.



- Li Z G, Tang H J, Yang P, Zhou Q B, Wu W B, Zou J Q, Zhang L, Zhang X F. Responses of cropland phenophases to agricultural thermal resources change in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 928-939. (in Chinese)
- [37] Alcantara C, Kuemmerle T, Prishchepov A V, Radeloff V C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 334-347.
- [38] Tan G X, Shibasaki R. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, 2003, 168(3): 357-370.
- [39] Wu W B, Shibasaki R, Yang P, Tan G X, Matsumura K I, Sugimoto, K. Global-scale modelling of future changes in sown areas of major crops. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2/4): 378-390.
- [40] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 329-336.
- Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329-336. (in Chinese)
- [41] Yu Q Y, Wu W B, Verburg P H, van Vliet J, Yang P, Zhou Q B, Tang H J. A survey-based exploration of land-system dynamics in an agricultural region of Northeast China. *Agricultural Systems*, 2013, 121: 106-116.
- [42] You L Z, Wood S, Wood-Sichra U. Generating plausible crop distribution maps for Sub-Saharan Africa using a spatially disaggregated data fusion and optimization approach. *Agricultural Systems*, 2009, 99(2/3): 126-140.
- [43] Frolking S, Qiu J J, Boles S, Xiao X M, Liu J Y, Zhuang Y H, Li C S, Qin X G. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1091.
- [44] Leff B, Ramankutty N, Foley J A. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(1): B1009.
- [45] Monfreda C, Ramankutty N, Foley J A. Farming the planet: 2. geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: B1022.
- [46] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 李志鹏, 吴文斌, 杨鹏, 游良志, 唐华俊. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析. *地理学报*, 2013, 68(5): 680-693.
- Liu Z H, Li Z G, Tang P Q, Li Z P, Wu W B, Yang P, You L Z, Tang H J. Spatial-temporal changes of rice area and production in China during 1980-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 680-693. (in Chinese)
- [47] Portmann F T, Siebert S, Döll P. MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(1): B1011.
- [48] Verburg P H, Neumann K, Nol L. Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 974-989.
- [49] van Vliet J, de Groot H L F, Rietveld P, Verburg P H. Manifestations and underlying drivers of agricultural land use change in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 133: 24-36.
- [50] van Vliet N, Mertz O, Heinemann A, Langanke T, Pascual U, Schmook B, Adams C, Schmidt-Vogt D, Messerli P, Leisz S, Castella J, Jørgensen L, Birch-Thomsen T, Hett C, Bech-Bruun T, Ickowitz A, Vu K C, Yasuyuki K, Fox J, Padoch C, Dressler W, Ziegler A D. Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: a global assessment. *Global Environmental Change*, 2012, 22(2): 418-429.
- [51] Munteanu C, Kuemmerle T, Boltiziar M, Butsic V, Gimmi U, Lúboš H, Kaim D, Király G, Konkoly-Gyuró É, Kozak J, Lieskovský J, Mojses M, Müller D, Ostafin K, Ostapowicz K, Shandra O, Štych P, Walker S, Radeloff V C. Forest and agricultural land change in the Carpathian region-a meta-analysis of long-term patterns and drivers of change. *Land Use Policy*, 2014, 38: 685-697.
- [52] Heistermann M, Muler C, Ronneberger K. Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 114(2/4): 141-158.
- [53] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 陈佑启, Verburg Peter H. 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.
- Tang H J, Wu W B, Yang P, Chen Y Q, Verburg P H. Recent Progresses of Land Use and Land Cover Change (LUCC) Models. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 456-468. (in Chinese)
- [54] Brown D G, Verburg P H, Pontius Jr R G, Lange M D. Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 452-457.
- [55] Irwin E G, Geoghegan J. Theory, data, methods: Developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1/3): 7-24.
- [56] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 杨鹏, 陈仲新, 陈佑启. 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, 66(11): 1518-1530.
- Yu Q Y, Wu W B, Tang H J, Yang P, Chen Z X, Chen Y Q. Complex system theory and agent-based modeling: progresses in land change science. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1518-1530. (in Chinese)
- [57] 余强毅, 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 周清波, 陈仲新. Agent 农业土地变化模型研究进展. 生态学报, 2013, 33(6): 1690-1700.
- Yu Q Y, Wu W B, Yang P, Tang H J, Zhou Q B, Chen Z X. Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1690-1700. (in Chinese)
- [58] 余强毅, 吴文斌, 陈羊阳, 杨鹏, 孟超英, 周清波, 唐华俊. 农作物空间格局变化模拟模型的 MATLAB 实现及应用. 农业工程学报, 2014, 30(12): 105-114.
- Yu Q Y, Wu W B, Chen Y Y, Yang P, Meng C Y, Zhou Q B, Tang H J. Model application of an agent-based model for simulating crop pattern dynamics at regional scale based on MATLAB. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12): 105-114. (in Chinese)
- [59] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 杨鹏, 李正国, 夏天, 刘珍环, 周清波. 基于农户行为的农作物空间格局变化模拟模型架构. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3266-3276.
- Yu Q Y, Wu W B, Tang H J, Yang P, Li Z G, Xia T, Liu Z H, Zhou Q B. An agent-based model for simulating crop pattern dynamics at a regional scale: model framework. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3266-3276. (in Chinese)
- [60] Yu Q Y, Wu W B, Yang P, Li Z G, Xiong W, Tang H J. Proposing an interdisciplinary and cross-scale framework for global change and food security researches. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156: 57-71.
- [61] Lotze-Campen H, Popp A, Beringer T, Müller C, Bondeau A, Rost S, Lucht W. Scenarios of global bioenergy production: The trade-offs between agricultural expansion, intensification and trade. *Ecological Modelling*, 2010, 221(18): 2188-2196.
- [62] Verburg P H, Overmars K. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9): 1167-1181.
- [63] Verburg P H. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 2006, 21(8): 1171-1183.
- [64] Xiao Y, Mignolet C, Mari J, Benoît M. Modeling the spatial distribution of crop sequences at a large regional scale using land-cover survey data: A case from France. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 102(0): 51-63.
- [65] 夏天, 吴文斌, 余强毅, 杨鹏, 周清波, 唐华俊. 农作物空间格局动态变化模拟模型(CROPS)构建. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 44-51.
- Xia T, Wu W B, Yu Q Y, Yang P, Zhou Q B, Tang H J. Simulating the spatial dynamics of cropping pattern: the CROPS model. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(1): 44-51. (in Chinese)
- [66] Stone B. Land use as climate change mitigation. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24): 9052-9056.
- [67] Hertel T W, Ramankutty N, Baldos U L C. Global market integration increases likelihood that a future African Green Revolution could increase crop land use and CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2014, 111(38): 13799-13804.
- [68] Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond-Lamberty B, Sands R, Smith S J, Janetos A, Edmonds J. Implications of limiting CO<sub>2</sub> concentrations for land use and energy. *Science*, 2009, 324(5931): 1183-1186.
- [69] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, de Noblet-Ducoudré N, Labat D, Zaehele S. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO<sub>2</sub> on global river runoff trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2007, 104(39): 15242-15247.
- [70] Rounsevell M D A, Reay D S. Land use and climate change in the UK. *Land Use Policy*, 2009, 26S: S160-S169.
- [71] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2012, 109(9): 3232-3237.
- [72] Sauer T, Havlik P, Schneider U A, Schmid E, Kindermann G, Obersteiner M. Agriculture and resource availability in a changing world: the role of irrigation. *Water Resources Research*, 2010, 46(6): W6503.
- [73] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schröter D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 69-85.
- [74] Häyhä T, Franzese P P. Ecosystem services assessment: a review under an ecological-economic and systems perspective. *Ecological Modelling*, 2014, 289: 124-132.
- [75] de Chazal J, Rounsevell M D A. Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: a review. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 306-315.
- [76] Bommarco R, Kleijn D, Potts S G. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(4): 230-238.

- [77] Smith H F, Sullivan C A. Ecosystem services within agricultural landscapes-farmers' perceptions. *Ecological Economics*, 2014, 98: 72-80.
- [78] Brouwer F, Tagliafierro C, Hutchinson G. Special issue: Ecosystem services and rural land management. *Environmental Science & Policy*, 2013, 32: 1-4.
- [79] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 陈佑启, 杨鹏. 基于粮食生产能力的 APEC 地区粮食安全评价. *中国农业科学*, 2011, 44(13): 2838-2848. Yu Q Y, Wu W B, Tang H J, Chen Y Q, Yang P. A food security assessment in APEC based on grain productivity. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(13): 2838-2848. (in Chinese)
- [80] Fleskens L, Hubacek K. Modelling land management for ecosystem services. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(3): 563-566.
- [81] Logsdon R A, Chaubey I. A quantitative approach to evaluating ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2013, 257: 57-65.
- [82] Reyers B, Biggs R, Cumming G S, Elmqvist T, Hejnowicz A P, Polasky S. Getting the measure of ecosystem services: a social-ecological approach. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(5): 268-273.
- [83] Akıncı H, Özalp A Y, Turgut B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 97: 71-82.
- [84] 石淑芹, 陈佑启, 姚艳敏, 李志斌, 何英彬. 中国区域性耕地变化与粮食生产的关系研究——以东北地区为例. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 361-368. Shi S Q, Chen Y Q, Yao Y M, Li Z B, He Y B. Correlation analysis between regional cultivated land change and grain production capacity-a case study in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 361-368. (in Chinese)
- [85] Smith P, Davies C A, Ogle S, Zanchi G, Bellarby J, Bird N, Boddey R M, McNamara N P, Powlson D, Cowie A, van Noordwijk M, Davis S C, Richter D D, Kryzanowski L, van Wijk M T, Stuart J, Kirton A, Eggar D, Newton-Cross G, Adhya T K, Braimoh A K. Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: current capability and future vision. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2089-2101.
- [86] Ye L, Xiong W, Li Z, Yang P, Wu W, Yang G, Fu Y, Zou J, Chen Z, Van Ranst E, Tang H. Climate change impact on China food security in 2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 363-374.
- [87] Liu J, Li S, Ouyang Z, Tam C, Chen X. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [88] Haberl H, Erb K, Krausmann F. Human appropriation of net primary production: patterns, trends, and planetary boundaries. *Annual Review of Environment and Resources*, 2014, 39(1): 363-391.
- [89] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [90] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [91] Seppelt R, Lautenbach S, Volk M. Identifying trade-offs between ecosystem services, land use, and biodiversity: a plea for combining scenario analysis and optimization on different spatial scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 458-463.
- [92] Wu W B, Yu Q Y, Peter V H, You L Z, Yang P, Tang H J. How could agricultural land systems contribute to raise food production under global change?. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7): 1432-1442.

(责任编辑 张晶)