

DOI: 10.5846/stxb202104090921

吴锋, 曾麟岚, 刘桂君. 农业面源污染管理政策调控仿真模型研究进展. 生态学报, 2022, 42(8): 3045-3055.

Wu F, Zeng L L, Liu G J. Research progress of simulation models for policies regulating agricultural non-point source pollution. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3045-3055.

农业面源污染管理政策调控仿真模型研究进展

吴 锋^{1,2,*}, 曾麟岚^{1,2}, 刘桂君^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 农业面源污染因其分散性、滞后性和不确定性而成为环境治理的难点。面源污染物迁移转化过程的模拟模型发展迅速, 而农业面源污染管理政策仿真评估模型研究相对较为滞后。系统梳理与分析了自上而下宏观目标约束、自下而上微观行为传导及宏观与微观上下耦合三类政策仿真模型研究进展, 总结了当前模型的基础理论与方法的优势与不足。本文提出了融合流域水系统过程规律认知, 构建宏观政策目标自上而下约束与微观主体行为自下而上传导耦合的农业面源污染政策仿真模型, 实现政策仿真模拟在国家、区域、流域与栅格跨尺度上的嵌套传导、参数互验与系统预测, 以解决因农业面源污染防治主体的多元性与防治对象的广泛性特征所导致的复杂性系统难题, 使得政策效应模拟仿真结果空间显性化, 进而实现农业面源污染控制的政策管理由粗放型向精准化方向迈进。

关键词: 面源污染; 政策模拟; 耦合模型; 行为调控

Research progress of simulation models for policies regulating agricultural non-point source pollution

WU Feng^{1,2,*}, ZENG Linlan^{1,2}, LIU Guijun^{1,2}

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Agricultural non-point source pollution is a difficult and prior point in the field of environmental pollution control due to its dispersion, hysteresis, and uncertainty. In recent years, the process model of non-point source pollution migration and transformation is developing rapidly. In contrast, the research on the simulation evaluation model of agricultural non-point source pollution management policy is lagging behind. The existing evaluations and opinions on policy effects are often merely carried out on a regional scale, which is insufficient to simulate the policy effects heterogeneity caused by the spatial heterogeneity of resource endowments and natural processes. Therefore, realizing the progress of agricultural resources and the environment from macro-management stride forward to precise management, and continuously improving the efficiency of resource utilization is an important development trend in the future. Especially for agricultural non-point source pollution that is closely related to and affected by the spatial heterogeneity of resources and the environment, taking account into the characteristics of geographical environment elements, considering the heterogeneity of environmentally-constrained agricultural production behaviors, and realizing the spatially explicit effects of related management policies are hardly inevitable development trends that should be paid more attention in the upcoming future. This paper systematically sorts out

基金项目: 美丽中国专项; 扶贫富民路径提升关键技术与示范 (XDA23070402); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项资助; NSFC-云南联合基金重点支持项目 (U2102208)

收稿日期: 2021-04-09; 网络出版日期: 2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufeng@igsrr.ac.cn

and analyzes the relevant progress of the research on the simulation model of agricultural non-point source pollution management policies in three dimensions: top-down macroscopic target constraints, bottom-up microscopic behavior conduction, and microscopic up and down coupling. Meanwhile, the strengths and weaknesses of the basic theories and methods of each above model are researched and summarized. Furthermore, this paper proposes a simulation model of agricultural non-point source pollution policy that integrates the cognition of the process law of the water system in the basin and combines the top-down constraints of the macro policy objectives as well as the bottom-up conduction of the micro-subject's behavior. This model can realize the nested conduction, parameter inter-examination, and systematic prediction of policy simulation across the country, region, river basin, and grid across scales, to solve the complex systemic problems caused by the diversity of prevention and control of agricultural non-point source pollution and the extensive characteristics of the control object. Through policy simulation on the cross-scale parameter nesting, result inter-examination and quantitative evaluation in the country, region, river basin, and grid scales, the policy evaluation and assessment are quantified. As a result, these simulation results of policy effects present spatial explicit expression, and then realizing the policy management of agricultural non-point source pollution control from extensive to precise direction.

Key Words: surface source pollution; policy simulation; coupled model; behavioral regulation

农田氮磷营养物流失是流域水环境污染的重要风险源,其污染物具有广域分散性、相对微量且运移途径多样无序性特征,是环境污染治理的难点,严重影响了河湖水环境安全,同时制约着农业绿色可持续发展。中国农业自然资源“水土光热”匹配的耕地面积只占国土面积的 9%,粮食安全需求导致投入要素的增加,特别是农药与化肥等化学品投入的增加加剧了面源污染风险。2015 年国家发布《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,通过测土配方施肥、畜禽养殖废弃物综合利用、水肥一体、秸秆还田等一系列面源污染防治措施,化肥施用量及施用强度逐渐降低,至 2019 年年均下降率超过了 10%。其中 2019 年化肥施用强度已下降至 $326\text{kg}/\text{hm}^2$,但仍高于发达国家设置的安全上限 ($225\text{kg}/\text{hm}^2$),种植业污染负荷量仍具有较大的调控空间。2021 年 3 月,生态环境部颁布《农业面源污染治理与监督指导实施方案(试行)》,提出 2025 年重点区域农业面源污染得到初步控制,2035 年重点区域土壤和水环境农业面源污染负荷显著降低的目标,并制定了一系列农业面源管理政策。如何科学评估农业面源管理政策的实施效果? 农业面源管理政策调控阈值应该处于什么范围才能实现环境与经济双重效益相协同? 这些问题的科学解答迫切需要在流域水系统过程规律的认知基础上耦合农业面源管理政策仿真模型工具的支撑。

相对于农业面源污染物迁移模拟的自然过程模型而言,刻画农业主体生产行为调控的政策仿真模型发展较慢。早期农业面源污染的研究主要依赖于调研与记录资料的统计分析。随着作物生长模型及水文模型等自然过程模型的发展,对农业面源污染物迁移转化过程模拟及刻画研究逐渐增多,并发展形成一系列较为成熟的农业面源污染过程模拟模型^[1-2]。其中重要代表性的有 Agricultural Non-point Source Pollution (AGNPS)^[3-5]、Areal Non-point Environment Response Simulation (ANSWERS)^[6-9]、Soil and Water Assessment Tool (SWAT)^[10-13]与 Water Erosion Prediction Project (WEPP)^[14-16]等。然而,对于农业面源污染管理政策定量化评估模型的研究相对较少,并且对于政策效果的评估及预测受数据制约往往聚焦在区域尺度,对资源禀赋与自然过程时空异质性科学规律衔接不足,难以刻画政策效果的空间差异。要实现农业资源环境从宏观粗放式管理向精准化管理迈进,不断提升资源的利用效率,尤其是农业面源污染这类与资源环境空间异质性联系紧密的问题,加入地理环境要素空间特征与自然过程演变规律,考虑受资源环境约束的农业主体生产行为异质性,实现相关管理政策效果的空间显化,是未来模型发展的重要趋势。

农业面源污染控制是一个受经济、社会和自然等众多复合因素综合影响的系统性问题。农业面源污染的产生追本溯源是农业生产行为不合理导致的,而农业生产行为受到宏观政策、技术水平与经济社会发展条件的影响,其产生的负面效应反作用于自然过程表现为面源污染等环境问题。国际上流域水环境治理理念逐步

由以水污染综合防治和水生态环境恢复为目的的治理向流域资源—生态环境—社会经济系统性治理迈进。2002 年欧盟水框架指令计划提出,流域水土资源综合管理是农业面源污染控制的有效措施^[17]。然而,当前我国对农业面源污染治理技术仍多以末端控制为主^[18],同时,农业生产技术的进步也使农业生产及组织行为发生改变,农业经营面临经济效益与环境效益的矛盾。农业面源管理政策实施效益缺乏科学系统性评估,相关的农业面源污染政策调控仿真量化评估工具也较为缺乏,有必要对现有研究工具进行系统梳理,为定量仿真模型的发展提供参考。因此,本文从自上而下、自下而上及上下耦合三个视角对现有的农业面源管理政策模型与评估研究进展进行综述,梳理当前已有研究工具的优势与不足,并提出融合流域水系统过程规律认知,构建宏观政策目标自上而下约束与微观主体自下而上传导耦合的农业面源污染政策仿真系统模型,实现政策模拟仿真结果空间显性化,促使农业面源污染控制的管理向精准化方向迈进。

1 农业面源管理政策仿真评估模型介绍

1.1 自上而下的政策评估模型分析

宏观管理政策通常按照自上而下的过程进行实施,因此现有对政策效果的定量模型多以自上而下的思路进行建模,且多关注于上层目标的落实情况。管理政策多由政府或企业等相关管理部门制定,通过推进或促进相关社会主体行为变革而实现其环境或经济等管理目标^[2]。自上而下的经济管理政策模拟仿真主要从宏观管理目标出发进行调控,一是从经济学视角出发,以部门为单位考虑多个经济部门之间的关联关系,进行政策调控模拟评估其宏观经济效应;二是从系统分析的角度出发,构建人口-资源环境-经济的复杂系统,基于政策工具参数变动观察系统要素的互馈关系与作用强度的响应,以实现宏观管理政策的仿真模拟。其代表性模型有投入产出模型、一般均衡模型、系统动力学模型等。

1.1.1 投入产出模型

投入产出模型是较早用于经济生产投入要素和经济系统结构变量耦合研究的方法。早在 20 世纪 70 年代,Bargur 等人将水污染作为一个生产要素,分析经济部门之间的水污染关系^[19]。投入产出模型由美国经济学家 Leontief 提出,其基本假设为一个经济体有多个部门,且每个部门都生产单一的、同质的商品或服务^[20]。投入产出模型通过投入产出矩阵刻画国家或地区的经济部门之间商品和服务的流动关系,进而表征行业间的相互依赖性^[21]。为进一步刻画经济生产活动的环境影响,里昂惕夫把产生与消除污染物的过程嵌入到投入产出表中,以刻画各部门间污染物流量核算,实现了投入产出模型在经济政策的环境效应分析量化中的应用^[22]。此后,许多学者对经济系统各部门中的水资源利用导致的污染问题采用扩展资源环境账户的投入产出模型进行刻画。陈锡康等在投入产出表中将水资源部门作为独立部门,对各部门用水情况、水的分配状况、供水过程耗费和排出污水情况分别进行了刻画^[23];Sánchez-Chóliz 和 Duarte 将水污染类型划分为水循环、生物需氧量、悬浮固体、硝酸盐和磷酸盐等五大类,并采用 Pasinetti 垂直一体化方法实现投入产出表内各部门与各种水污染类型的对应^[24,25]。

投入产出模型能够同时跟踪社会经济部门之间的水资源消耗及其污染负排放的具体影响,进而较为全面地刻画分析经济系统内各部门间水污染联系。然而,由于其对产业部门的用水、耗水和排放数据具有较强的依赖性,模型的准确性受到原始数据收集和标准化方面差异的限制,并且只能根据历史数据阶段性地提供基本经济结构的最新情况,因此存在一定的时间滞后性^[26]。此外,由于该模型的刻画单元为经济系统行业部门,基于模型的同部门的同质化假设,部门内部不同规模企业差异性往往被忽略,因而只能从区域内以经济部门为单位对水污染的排放进行宏观调控,无法有效反映部门内部的差异性、空间异质性等微观特征。

1.1.2 可计算一般均衡模型

可计算的一般均衡模型(Computable General Equilibrium,CGE)是基于经济学的一般均衡分析理论,即在统一的价格体系中,所有商品及要素达到供需均衡,消费者在预算约束下的消费实现效用最大化,生产者基于成本约束的生产实现利润最大化^[27]。可计算一般均衡模型从供给、需求及供求关系三个部分刻画^[28],主要

用于分析补贴、税收等政策的经济结构、规模和效率的影响,现有研究引入环境税及污染物排放费等对 CGE 模型进一步扩展^[29]。利用 CGE 模型研究水资源利用时将水资源看作生产要素,在社会核算矩阵或部门产出中设置相应的约束条件纳入其中^[30-31]。具体而言,有三种实现途径^[32]:一是通过设定水土固定比例的线性关系,改进生产函数^[33];二是将涉及到水资源的企业作为独立部门^[34];三是通过投入占用产出方法“外挂”于 CGE 模型,间接考虑水资源问题^[35]。

目前,基于 CGE 模型对水资源利用及环境问题的研究仍存在一定的挑战。具体而言,模型需要较为完备的数据基础,而实际的水资源统计数据较难满足模型的构建。同时,尚未形成刻画水资源利用过程与经济系统投入产出关系耦合的成熟方法,模型结果仍较大依赖估计。此外,模型设定的均衡时市场条件与现实中的市场之间存在一定的差距,较难根据实际市场条件进行修正。

1.1.3 系统动力学模型

系统动力学模型是基于系统动力学理论,通过因果关系流向图及相应的方程构建用以刻画复杂系统动态的仿真模型。其可通过该模型进行仿真实验,并不断调整控制参数,进而从实验结果分析系统的发展方向及改进的政策效果^[27]。有学者从系统科学的角度,通过构建系统动力学模型对水环境质量改善开展系统建模研究,例如 90 年代初,王勇等学者利用系统动力学模型预测了 1992—2000 年上海市长兴岛的水环境质量演变和水资源供需趋势^[36]。由于人-水耦合系统是极具专业性的复杂系统,传统的基于经验方程刻画的动力学模型难以充分利用已有的专业研究成果。为弥补这一不足,左其亭等提出嵌入式系统动力学(Embedded System Dynamics, ESD),把反映系统的专业模型(比如水文模型模块、水库调度模块、河道演进模块、水资源管理模块、优化调度模块)等子模块嵌入系统动力学模型^[37]。刘金华等人在系统动力学模型的基础上,进一步加入多学科的量化模型,形成社会经济水系统耦合模型^[27]。

系统动力学模型的优势在于可以刻画众多定性因子相互关系的复杂性,如区域、全国以及全球系统分析时,可以通过构建认知复杂系统的关键性联系而开展系统模拟^[38]。但是,该模型也存在一定局限性,如在厘清系统内部要素之间的竞争与协同影响关系上略存不足^[39],无法对部门技术进行详细的分析和预测,并且在系统的长时间预测模拟时参数校准与验证仍存缺陷,有可能导致推断结论的误差偏大^[27]。

1.2 自下而上的政策评估模拟

自下而上的政策定量评估主要从实施主体的行为和管理主体的目标两个分析角度建模。政策最终的实施主体均是人,因此可以通过调控人在实现其自身利益最大化的条件下的生产行为,如种植结构调整、农药化肥投入等,由个体利益博弈行为决策整合形成群体行为,进而实现个体-群体-系统间自下而上的模拟。此外,可以对管理主体不同视角的目标进行系统整合,从经济、社会、环境等多维视角考虑政策的组合目标,以形成综合性的多个层面目标最优化决策。其中,政策评估计量经济学模型、基于主体的建模(Agent-Based Model, ABM)方法与多目标优化模型等是上述思路具有代表性的模型。

1.2.1 政策评估的计量经济学模型

目前,政策效应评估计量经济学模型主要有结构方程、双重差分、倾向得分匹配和断点回归等方法。结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)是基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系,该模型的一个假设前提是政策对所有样本都产生了相同的影响,且这种影响是线性的、恒定的,其无法解决样本的非随机选择问题^[40,41]。双重差分法(Differences-in-Differences, DID)是由 Heckman 等提出用于评估公共政策净效应的方法,该模型以面板数据为基础,需要制备政策实施前后的对比分析数据,对研究数据要求较为严苛^[42]。倾向得分匹配方法(Propensity Score Matching, PSM)适用于截面数据,可用于事后评估,通过控制协变量以构建实验组与对照组,从而显著降低评估偏差^[43]。断点回归方法(Regression Discontinuity Design, RDD),是由 Thistlethwaite 和 Campbell 提出用于研究变量间因果关系的拟随机实验方法^[44],其使用前提是临界值处存在断点,经检验存在断点后对临界值附近的样本进行回归分析。该方法要求断点临界有较多观测值,且临界值附近的局部平均效应难以外推至整体^[45,46]。由于政策前的回访存在一定难度,大部分研究只能针对政策实

施后的情况进行调研,因此,倾向得分匹配和双重差分耦合方法对于农业面源管理政策评估的适用性更强。

1.2.2 基于多主体建模方法

基于多主体建模方法用于水资源复杂系统的研究较多关注于社会经济方面,与自然过程模型的耦合应用相对缺乏。基于多主体的建模作为一种自下而上的多主体行为仿真模拟方法,通过考察异质性主体的特征定义微观层面的主体行为、主体间及与环境的交互作用以表征系统全局信息,成为复杂系统模拟及政策评价的主要定量化工具^[43,47]。基于多主体的建模方法在流域水资源优化配置、城镇居民用水管理、灌区水资源管理中的应用较为广泛^[48],而在水环境治理问题的应用主要通过对主体参数修改,模拟不同水污染管控情景下的政策实施效果,同时以水污染物迁移转化过程为主线,模拟水污染物的吸附、自净、沉降、扩散等行为,进而实现河道的仿真模拟等^[49-51]。近些年,部分学者从生态-水文过程与 ABM 模型耦合的角度开展研究^[52-54]。Bitterman 等将 ABM 与土地利用变化和磷负荷累积过程模型相连接或耦合,模拟不同的协同治理政策对水质项目组合开发的影响^[55]。闫猛等在耦合生态-水文过程基础上,结合农民种植的经验规则与寻优的耕种策略,以密云水库为例探索农户适应变化环境下的用水最优的种植行为^[39]。

ABM 模型的优势在于,在尚未清楚全局不同主体相互依赖关系的情况下,仍可通过对各个参与者行为的定义构建 ABM 模型以获取系统整体的行为演化涌现。然而,建模过程中对主体行为模拟的程度较难把握,过于简单化的刻画会导致对主体和水系统演化规律的过程互馈描述不足,全面的刻画对经验数据需求量较大,容易受到数据的限制使得模拟范围有限^[56-58]。

1.2.3 多目标优化方法模型

多目标优化模型通过定义最优的一组方案,在特定的约束下以最小化的成本实现特定的目标,多用于探索最优的政策组合方案。多目标优化模型已成为研究水污染治理综合管理的重要分析工具^[59,60],众多学者从环境-经济双重视角开展研究^[61-63]。王有乐从污染负荷分配的角度,把治理投资、运行费用、经济收益和污染物削减量作为规划目标,建立多目标组合规划模型^[64]。龚琦等从农业产业结构调整的角度,以农业污染削减和农业经济增长为主要目标,通过多目标优化模型对云南洱海流域农业产业结构进行优化设计^[65]。Semaan 等将“气候-土壤-作物-管理”系统的综合动力学模型(Environmental Policy-Integrated Climate, EPIC)与多目标规划模型相结合,将生物物理模型输出的作物产量等正产出与硝酸盐浸出等环境负产出作为经济模型的投入,并结合产品价格和生产要素成本等经济数据,建立多目标优化模型,对最大化农民收入和最小化风险的双重目标下的水成本效益进行分析^[66]。

多目标优化模型的优点在于能够从经济、社会与环境等多维视角考虑政策组合的效应,以实现多个层面目标间的协调。然而,该方法在求解时大多采用折中的办法获取模型的最优解,进而可能对模型结果的精度产生影响。同时,模型对市场缺陷刻画考虑不足,可能导致对需求预测和政策设计理想化^[67]。

1.3 自上而下-自下而上耦合模型

现有政策定量评估模型通常从特定角度或者局部环节解决农业面源污染的特定问题,并不能很好地系统解决污染来源与防控主体的多元性问题。对此,需要进一步集成不同尺度模型优点,解决其相关缺陷。目前,研究提出发展自上而下宏观政策目标约束与自下而上微观行为传导耦合模型构架(图 1),以期更好地刻画农业面源污染的多尺度约束与跨尺度传导,保障农业生产系统的可持续性与农业面源污染政策的可行性。目前,能够将微观到宏观层面的反馈充分结合起来的建模方法相对较少,较为广泛应用的是在粮食安全研究中将可计算一般均衡模型或局部均衡模型(Partial Equilibrium Analysis Model, PE)与 ABM 进行耦合^[68]。通常利用 ABM 模型对微观个体行为差异和空间异质性特征进行刻画,其模型输出结果作为参数输入至 CGE 模型中研究微观个体变动对宏观农业经济与生产的影响^[69-70]。

为弥补现有研究不足,本研究对农业系统集成评估模型(The Integrated Assessment Models, IAM)进行梳理与比较,讨论自上而下宏观政策目标约束与自下而上微观行为传导耦合模型发展的潜力与应用前景。IAM 通过将经济系统与自然过程整合在一个统一模型框架中,基于各种不同的模型方法,试图整合不同尺度的土

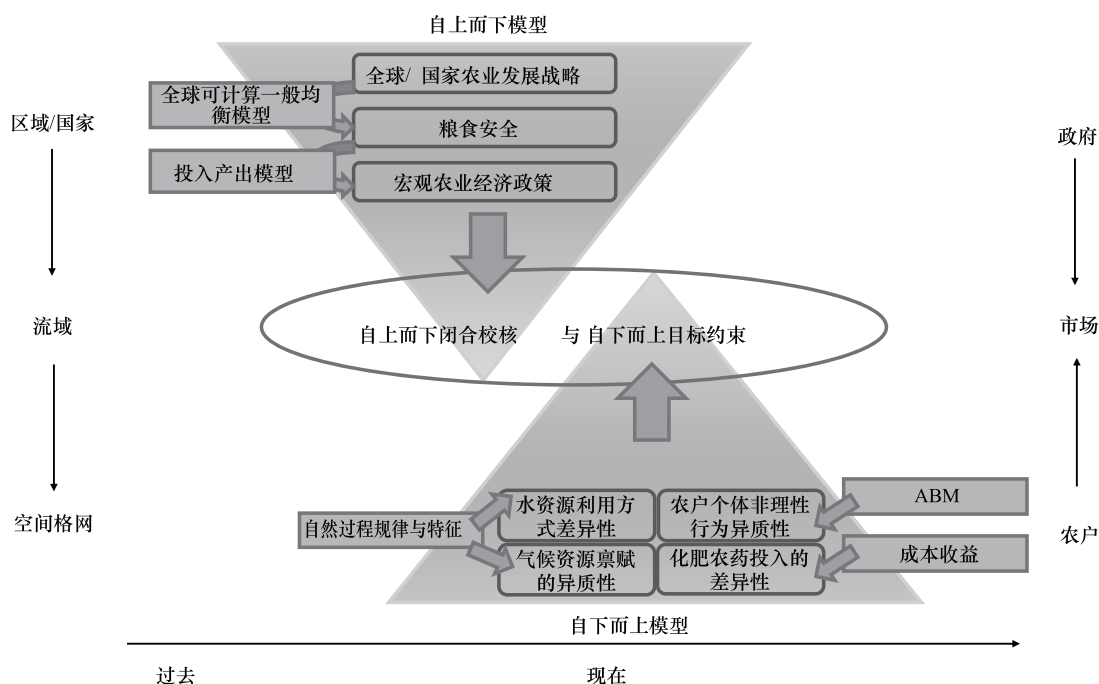


图1 农业面源污染政策仿真与模拟模型框架

Fig.1 Agricultural non-point source pollution policy simulation and simulation model framework

地利用、环境演变和社会经济条件变化的直接和间接驱动因素,进行跨学科跨尺度的复杂系统模拟^[71](表1)。基于一般均衡或局部均衡经济理论,农业系统集成评估模型框架主要包括农产品市场的供给模块与需求模块,刻画了政策调控与市场行为相关的内在联系和变化,不同模型对供需尺度刻画不同。供给模块以作物生长和生物能源模块为主,纳入网格化的作物生物物理过程参数,包括特定作物的产量、灌溉用水需求量和土地资源分布等,以捕捉农产品供给中资源可用性和限制因素的空间异质特征。而需求模块主要刻画不同尺度上的农产品需求对农产品供给与贸易产生的影响。IAM 通过外部环境变化冲击模拟区域农业经济与空间栅格资源禀赋的变化情况,为精准和集约化农业系统管理研究提供量化工具。

2 农业面源管理政策仿真模型的重要发展方向

农业复杂系统集成评估模型通过实现自上而下宏观目标约束与自下而上微观行为传导耦合应用,将为农业面源污染治理政策制定提供科学依据。农业生产发展过程中技术水平不断提高,集约化种植所使用的化肥、农药和塑料薄膜,以及农村禽畜养殖所产生的粪便及废弃物不断增长,成为了流域水体污染的重要外源。从源头控制与过程削减入手,需要结合当地资源环境与经济发展条件,合理安排农业生产方式与种植结构,提高资源利用效率和生产力,并依据所处流域水体污染程度建立不同类型的源头控制措施,进而有效控制农业面源污染。农业系统集成评估模型有效模拟了政策影响下对农产品的生产结构和效率,其包含的驱动因素不仅考虑了宏观社会经济变动影响,且考虑了自然资源禀赋空间异质性的约束。同时,将农业面源污染产生的源头刻画降至空间栅格尺度,实现其与水系统过程过程模型耦合将成为科学决策工具发展的重要方向。全球化影响下的资源流、信息流与自然过程的物质循环使得资源环境问题解决需从人-自然耦合系统视角开展仿真模拟,农业面源污染管理的系统集成评估模型研究亟需从以下两个方面加强。

一是,推进生态-水文过程、作物生长模型与农业种植行为仿真模型的过程耦合,实现要素相互作用与过程互馈的刻画。目前,已有部分研究尝试将生态-水文模型与农业种植行为、作物生长模型的系统耦合。如全球农业部门均衡分析的格网模型 SIMPLE-G 与全球水资源平衡模型(Water Balance Model, WBM)进行耦合,模拟减少水资源消耗和流域间的调水对全球粮食安全和土地使用变化的具体影响^[88]。通过链接 GLOBIOM

表 1 农业复杂系统集成评估模型与方法

Table 1 Integrated evaluation model and method of agricultural complex systems							
模型名称 Model name	CAPRI ^[72-74] 共同农业政策区域影响分析模型	MAGPIE-LPJmL ^[75-78] 农业生产模式及其对环境的影响模型和基于网格的全球植被和水文模型	GLOBIOM ^[79-82] 全球生物圈管理模型	MAGNET ^[83-86] 模块化的应用地球物理均衡工具	SIMPLE-G ^[87-89] 农业价格、土地利用和环境的简化国际模型	IMAGE ^[90-93] 全球环境综合评估模型	IMPACT ^[94-96] 农产品贸易政策分析国际模型
研发机构 Research institution	European research institutions	PIK	IIASA	LEI/WUR	GTAP	IMAGE Team	IFPRI
模型类型 Model type	PE 与农业生产模型	PE	PE	CGE	PE		PE
研究内容 Research content	1.生物能源政策、贸易政策对农业生产、土地利用和环境(如碳排放)的影响; 2.农业生产中的水资源利用变化和气候变化的影响。	1.畜牧业和粮食生产间的水资源消耗和土地利用竞争,以及对环境的影响(碳排放); 2.减少生物能源作物生产灌溉以减少水资源消耗,或导致自然土地生态系统尤其是热带森林的损失	1.推动解决因生物燃料种植面积扩大而造成的森林砍伐、灌溉用水、作物价格上涨、碳排放的问题; 2.优化未来农田和取水量分配,并找到未来作物产量与可持续取水量之间的权衡	用于模拟农业、贸易、土地和生物能源政策对全球经济的影响,特别关注对土地使用、农产品价格和家庭粮食安全的影响	1.全球农场和粮食系统如何影响本地农业用地、农产品生产、价格和消费、温室气体排放。 2.研究减少硝酸盐(氮浸出)的替代措施结果	粮食和能源生产(土地竞争)、土地利用变化、生物多样性。	水资源约束下的农业生产情况
需求 Demand	欧盟	区域	区域	区域	区域	区域	国家
供给 Supply	空间栅格尺度农业生产	空间栅格尺度农业生产	空间栅格尺度农业生产	空间栅格尺度农业生产	空间栅格农业生产	区域	区域
优势 Advantages	1.在生物能源政策分析上具有优势; 2.改变土地限制相对简单; 3.模型中考虑氮、磷和钾的质量流量	1.在模拟单位级别(unit level)的作物、牲畜生产间的土地利用竞争方面具有优势。 2.详细刻画畜牧业产品与饲料投入模块; 3.模型可以内生地决定以增加成本的方式获得增产的技术进步	模型中包括森林模块	1.将粮食需求降低至栅格尺度,将农业生产决策与农产品需求在栅格尺度联系起来。 2.明确建模食物和营养的可获得性和可承受性,模拟代表性消费者家庭的食物和营养安全成果 3.通过在模型中纳入详细的生物燃料、生物能源、生化产品部门和相关政策内容,推动生物能源对宏观经济影响的研究	模型简单易处理;能够量化人口、技术和收入等关键驱动因素对全球作物土地利用和价格变化以及其他内生变量的影响	模型中包含相对详细的生物物理过程和广泛的环境指标	该模型是一个链接式模型系统,中心是农业的多市场核心模型,能够链接到许多模块,包括气候、水/水文、作物模拟和土地利用模型等
劣势 Disadvantages	1.研究区域仅限于欧盟区; 2.目前对农业和非农业用水间竞争的分析能力有限	1.由于需求系统中缺乏价格反馈,人均需求不受人口变化的影响; 2.区域需求是外生的,因此价格缺乏弹性	1.缺乏对水资源相关内容分析; 2.生物能源是外生变量	缺乏对水资源相关内容分析	由于缺乏更精细的信息,大多数行为参数(包括土地供应弹性)需要进一步校准	与其他能源模型相比,在经济和政策工具方面的详细信息较少	模型仍无法将气候纳入其对粮食生产和贸易的估计中

CAPRI:共同农业政策区域影响分析模型 The Common Agricultural Policy Regionalised Impact Model;MAGPIE-LPJmL:农业生产模式及其对环境的影响模型-基于网格的全球植被和水文模型 The Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment, Lund-Potsdam-Jena managed Land;GLOBIOM:全球生物圈管理模型 Global Biosphere Management Model;MAGNET:模块化的应用地球物理均衡工具 Modular Applied GeNeral Equilibrium Tool;SIMPLE-G:农业价格、土地利用和环境的简化国际贸易模型 a Simplified International Model of agricultural Prices, Land use, and the Environment- Gridded Model;IMACE:全球环境综合评估模型 The Integrated Model to Assess the Global Environment;IMPACT:农产品贸易政策分析国际模型 The International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade

模型与区域水文模型(The Community Water Model,CWATM),模拟农业种植行为对河流营养物及污染的影响过程^[97]。模型将精准刻画生态-水文过程的变动对农业生产的影响,进而作用于农业面源污染的水质响应,推动农业复杂系统集成评估模型中自然-经济要素之间的有效互馈。

二是,推动空间栅格尺度农业生产行为中资源环境要素禀赋、农业生产的理性与非理性选择行为的耦合。具体可通过链接微观行为主体模型(如网络分析法、计量经济学模型和基于多主体的建模方法),将防治主体多元性与农业生产非理性行为纳入模型框架,模拟污染防治中农民、企业、政府及其他多主体行为变动对农业面源污染的影响,实现数据在不同尺度的一致性表达,进而开展自然过程模型与社会经济系统模型的互馈模拟。在模型整合技术方面,随着 ABM 模型和 CGE 模型链接的最新进展,以系统科学思想为推进 IAM 模型与其他模型整合提供了巨大的发展潜力。

3 结语

农业面源污染调控政策多以人的生产行为调控为目标,探讨施肥减量化管理、种植结构布局优化、农业资源转化与循环利用等相关生产过程的环境经济效应。然而,传统农业生产行为与资源环境的空间异质性特征决定了管理政策需要向精准化方向进一步发展,进而避免政策的“一刀切”和微观规制缺乏造成的粗放式管理问题。农业面源污染治理是降低农业发展过程的环境负外部效应,实现农业绿色可持续发展的重要举措。本文通过整理现有经济政策仿真模拟模型和农业面源污染的特征,将建模方法划分为自上而下、自下而上以及相互耦合的三种方式。研究提出未来需融合水系统演化、地球化学循环过程等自然规律认知,构建自上而下宏观政策目标约束与自下而上的行为传导集成的复合系统模型,以解决农业面源污染防治主体多元性与防治对象广泛性所带来的复杂性系统难题。同时,研究提出的耦合污染物迁移转化过程的农业复杂系统集成评估模型在系统分析中呈现出了巨大潜力。将政策评估或仿真模拟由区域尺度降低至空间栅格尺度,一方面有助于实现自然过程与人类活动互馈的过程刻画上的尺度匹配,另一方面也有利于推动主体行为调控的管理向更为精准化的方向探索。在模型技术方面,从经济学理论的可计算一般均衡分析模型与信息计算科学的微观行为多主体仿真模型或计量经济分析模型框架出发,集成自然过程规律的认知模块,将为构建人-自然耦合复杂系统模型提供技术与理论研究的重要支撑。此外,研究可在大数据技术支持下不断提高模型模拟的精度,增加模型新的功能模块或链接不同的集成评估模型,以实现人口-资源环境-经济复合系统的集成模拟。然而,模型的复杂性与数据需求量也会随之大幅增加,数据公开性问题与多节点数据融合问题将成为巨大的挑战^[87]。面对该难题,如何将模型简化并通过大数据分析技术以加深对重要问题的刻画,是值得深入探究的问题。

参考文献(References):

- [1] 牛志明, 解明曙, 孙阁, Steven G. McNulty. 非点源污染模型在土壤侵蚀模拟中的应用及发展动态. 中国水土保持, 2001(03): 20-22.
- [2] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 刘宏斌, 王立刚, 逢焕成. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [3] Young A. A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. Jour. of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 121-132.
- [4] 洪华生, 黄金良, 张珞平, 杜鹏飞. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用. 环境科学, 2005(04): 63-69.
- [5] 孟春红, 赵冰. AGNPS 模型在小流域农业非点源污染中的应用. 长江科学院院报, 2008(04): 24-27.
- [6] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS- 2000: Runoff and sediment transport model. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(6): 493-502.
- [7] Beasley D B. ANSWERS: A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING THE EFFECTS OF LAND USE AND MANAGEMENT ON WATER QUALITY. Neuropharmacology, 1977, 18(4): 355-60.
- [8] 张玉斌, 郑粉莉. ANSWERS 模型及其应用. 水土保持研究, 2004, 011(004): 165-168.
- [9] Dillaha T A, Beasley D B. Distributed parameter modeling of sediment movement and particle size distributions. Transactions of the ASAE, 1983, 26(6): 1766-1772.
- [10] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, Arnold J G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research

- directions. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [11] Douglas-Mankin K R, Srinivasan R, Arnold J G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1423-1431.
- [12] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展. 地理科学进展, 2005(05): 123-132.
- [13] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [14] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Nserl Rep, 1995, 10: 1-123.
- [15] M. A. Nearing, L. J. Lane, E. E. Alberts, J. M. Laflen. Prediction Technology for Soil Erosion by Water: Status and Research Needs. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(6): 1702-1711.
- [16] 张玉斌, 郑粉莉, 贾媛媛. WEPP 模型概述. 水土保持研究, 2004(04): 148-151.
- [17] 李雪松, 秦天宝. 欧盟水资源管理政策分析及对我国跨边界河流水资源管理的启示. 生态经济, 2008(01): 38-41+55.
- [18] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ. 中国农业面源污染控制中存在问题分析. 中国农业科学, 2004(07): 94-101.
- [19] Bargur J S, Davis H C, Lofting E M. An intersectoral programming model for the management of waste water economy of San Francisco bay region. Water Resources Research, 1971, 7(6): 1393-1409.
- [20] Leontief W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. The Review of Economic Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [21] Rose A. Input-output economics and computable general equilibrium models. Structural change and economic dynamics, 1995, 6(3): 295-304.
- [22] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3): 262-271.
- [23] 陈锡康, 陈敏洁. 水资源投入产出模型及水价的计算问题. 农业系统科学与综合研究, 1987, (2): 1-17.
- [24] Sánchez-Chóliz J, Duarte R. Analysing pollution by way of vertically integrated coefficients, with an application to the water sector in Aragon. Cambridge Journal of Economics, 2003, 27(3): 433-448.
- [25] Pasinetti L L. Contributi Alla Teoria Della Produzione Congiunta. Bologna: Il Mulino, 1977: 9-16.
- [26] Kitzes J. An introduction to environmentally-extended input-output analysis. Resources, 2013, 2(4): 489-503.
- [27] 刘金华. 水资源与社会经济协调发展分析模型拓展及应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [28] 庞军, 邹骥. 可计算一般均衡(CGE)模型与环境政策分析. 中国人口·资源与环境, 2005(01): 59-63.
- [29] André F J, Cardenete M A, Velázquez E. Performing an environmental tax reform in a regional economy. A computable general equilibrium approach. The Annals of Regional Science, 2005, 39(2): 375-392.
- [30] Nechifor V, Winning M. Projecting irrigation water requirements across multiple socio-economic development futures: A global CGE assessment. Water Resources and Economics, 2017, 20: 16-30.
- [31] 王勇, 肖洪浪, 王瑞芳. CGE 模型在水资源利用研究中的应用方法探讨. 人民黄河, 2007, 29(12): 54-56.
- [32] 赵永, 王劲峰, 蔡焕杰. 水资源问题的可计算一般均衡模型研究综述. 水科学进展, 2008, 19(5): 756-762.
- [33] Seung C K, Harris T R, MacDiarmid T R, Shaw W. Economic impacts of water reallocation: A CGE analysis for walker river basin of Nevada and California. Journal of Regional Analysis and Policy, 1998, 28(1100-2016-89752): 13-34.
- [34] Fang G, Wang T, Si X, Wen Xet, Liu Y. Discharge Fee Policy Analysis: A Computable General Equilibrium (CGE) Model of Water Resources and Water Environments. Water, 2016, 8(9): 413.
- [35] Velázquez E, Cardenete M A, Hewings G J D. Water Price and Water Reallocation in Andalusia: a Computable General Equilibrium Approach. Working Papers, 2011, 55(1): 19-21.
- [36] 王勇, 阮仁良, 戚仁海. 上海市长兴岛水资源开发与与水环境保护的系统研究. 自然资源学报, 1993, 8(2): 132-141.
- [37] 左其享. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型. 自然资源学报, 2007, 22(2): 268-274.
- [38] 魏泽洋, 刘毅, 宫曼莉, 陈迪. 基于主体的建模方法在环境学科中的研究进展. 中国环境管理, 2020, 12(1): 130-138.
- [39] 闫猛, 杜二虎, 王宗志, 张倩, 吴锋. 行为经济与自然过程耦合视角下的水资源复杂系统建模研究. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 53-60.
- [40] Bollen K A, Long J S. Tests for structural equation models: introduction. Sociological Methods & Research, 1992, 21(2): 123-131.
- [41] 洪佳雨, 张倩, 吴锋, 杨宇, 董聪聪. 农业生态补偿的环境效益评估——以“稻改旱”政策为例. 干旱区资源与环境, 2020, 34(08): 103-108.
- [42] Heckman J J, Ichimura H, Todd P. Matching as an econometric evaluation estimator. The Review of Economic Studies, 1998, 65(2): 261-294.
- [43] Dehejia R. Practical propensity score matching: a reply to Smith and Todd. Journal of Econometrics, 2005, 125(1/2): 355-364.
- [44] Thistlethwaite D L, Campbell D T. Regression-discontinuity analysis: an alternative to the ex post facto experiment. Journal of Educational Psychology, 1960, 51(6): 309-317.
- [45] 谢谦, 薛仙玲, 付明卫. 断点回归设计方法应用的研究综述. 经济与管理评论, 2019, 35(2): 69-79.
- [46] 罗胜. 断点回归设计: 基本逻辑、方法、应用述评. 统计与决策, 2016, (10): 78-80.

- [47] Bousquet F, Le Page C. Multi-agent simulations and ecosystem management; a review. *Ecological modelling*, 2004, 176(3-4): 313-332.
- [48] 练继建, 徐梓曜, 宾零陵, 徐奎, Chan H Y. 基于 Agent 的水资源管理模型研究进展. *水科学进展*, 2019, 30(2): 282-293.
- [49] Blair P, Buytaert W. Socio-hydrological modelling; a review asking "why, what and how?". *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 443-478.
- [50] Tesfatsion L, Rehmann C R, Cardoso D S, Jie Y, Gutowski W J. An agent-based platform for the study of watersheds as coupled natural and human systems. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 89:40-60.
- [51] 李建勋, 解建仓, 高阳, 李维乾. 基于复杂 agent 的水污染迁移仿真模拟. *计算机应用研究*, 2015, 32(4): 1078-1081, 1090-1090.
- [52] Akhbari M, Grigg N S. A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. *Water resources management*, 2013, 27(11): 4039-4052.
- [53] Tze L N, Eheart J W, Cai X, Braden J B. An agent-based model of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop. *Water Resources Research*, 2011, 47(9): 1-17.
- [54] Berglund E Z. Using agent-based modeling for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(11): 04015025.
- [55] Bitterman P, Koliba C J. Modeling alternative collaborative governance network designs; an agent-based model of water governance in the lake Champlain basin, Vermont. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2020, 30(4): 636-655.
- [56] Barbat M, Bruno G, Genovese A. Applications of agent-based models for optimization problems; A literature review. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(5): 6020-6028.
- [57] Railsback S F, Lytinen S L, Jackson S K. Agent-based simulation platforms; Review and development recommendations. *Simulation*, 2006, 82(9): 609-623.
- [58] An L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems; Review of agent-based models. *Ecological modelling*, 2012, 229: 25-36.
- [59] Semertzidis T. Can energy systems models address the resource nexus? *Energy Procedia*, 2015, 83: 279-288.
- [60] 耿润哲, 梁璇静, 殷培红, 王萌, 周丽丽. 面源污染最佳管理措施多目标协同优化配置研究进展. *生态学报*, 2019, 39(8): 2667-2675.
- [61] 吴跃明, 郎东锋, 张子珩, 张翼. 环境—经济系统协调度模型及其指标体系. *中国人口.资源与环境*, 1996, 6(2): 47-50.
- [62] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1338-1344.
- [63] 方创琳, 鲍超. 黑河流域水-生态-经济发展耦合模型及应用. *地理学报*, 2004, 59(5): 781-790.
- [64] 王有乐. 区域水污染控制多目标组合规划模型研究. *环境科学学报*, 2002, 22(1): 107-110.
- [65] 龚琦, 王雅鹏, 董利民. 基于云南洱海流域水污染控制的多目标农业产业结构优化研究. *农业现代化研究*, 2010, 31(4): 475-478.
- [66] Semaan J, Flichman G, Scardigno A, Steduto P. Analysis of nitrate pollution control policies in the irrigated agriculture of Apulia Region (Southern Italy): a bio-economic modelling approach. *Agricultural Systems*, 2007, 94(2): 357-367.
- [67] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(2): 236-245.
- [68] Müller B, Hoffmann F, Heckelet T, Müller C, Hertel T W, Polhill J G, van Wijk M, Achterbosch T, Alexander P, Brown C, Kreuer D, Ewert F, Ge J Q, Millington J D A, Seppelt R, Verburg P H, Webber H. Modelling food security: bridging the gap between the micro and the macro scale. *Global Environmental Change*, 2020, 63: 102085.
- [69] Berger T, Troost C. Agent-based modelling of climate adaptation and mitigation options in agriculture. *Journal of Agricultural Economics*, 2014, 65(2): 323-348.
- [70] Valbuena D F. Farmer's Decisions and Landscape Change: an Actor-Based Approach for Land-Use Research[D]. Wageningen: Wageningen University, 2010: 1-136.
- [71] 张莹. 气候变化问题经济分析方法的研究进展和发展方向. *城市与环境研究*, 2017, (2): 82-102.
- [72] Leip A, Britz W, Weiss F, de Vries W. Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI. *Environmental pollution*, 2011, 159(11): 3243-3253.
- [73] Britz W. Automated model linkages; the example of CAPRI. *German Journal of Agricultural Economics*, 2008, 57(8): 363-367.
- [74] Britz W, Hertel T W. Impacts of EU biofuels directives on global markets and EU environmental quality: an integrated PE, global CGE analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(1/2): 102-109.
- [75] Lotze-Campen H, Müller C, Bondeau A, Rost S, Popp A, Lucht W. Global food demand, productivity growth, and the scarcity of land and water resources: a spatially explicit mathematical programming approach. *Agricultural Economics*, 2008, 39(3): 325-338.
- [76] Weindl I, Bodirsky B L, Rolinski S, Biewald A, Lotze-Campen H, Müller C, Dietrich J P, Humpeöder F, Stevanović M, Schaphoff S, Popp A. Livestock production and the water challenge of future food supply: implications of agricultural management and dietary choices. *Global Environmental Change*, 2017, 47: 121-132.
- [77] Weindl I, Popp A, Bodirsky B L, Rolinski S, Lotze-Campen H, Biewald A, Humpeöder F, Dietrich J P, Stevanović M. Livestock and human use of land; productivity trends and dietary choices as drivers of future land and carbon dynamics. *Global and Planetary Change*, 2017, 159: 1-10.
- [78] Bonsch M, Humpeöder F, Popp A, Bodirsky B, Dietrich J P, Rolinski S, Biewald A, Lotze-Campen H, Weindl I, Gerten D, Stevanovic M. Trade-offs between land and water requirements for large-scale bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(1): 11-24.

- [79] Pastor A V, Palazzo A, Havlik P, Biemans H, Wada Y, Obersteiner M, Kabat P, Ludwig F. The global nexus of food-trade-water sustaining environmental flows by 2050. *Nature Sustainability*, 2019, 2(6): 499-507.
- [80] Havlik P, Schneider U A, Schmid E, Böttcher H, Fritz S, Skalský R, Aoki K, De Cara S, Kindermann G, Kraxner F, Leduc S, McCallum I, Mosnier A, Sauer T, Obersteiner M. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 5690-5702.
- [81] Wise M, Dooley J, Luckow P, Calvin K, Kyle P. Agriculture, land use, energy and carbon emission impacts of global biofuel mandates to mid-century. *Applied Energy*, 2014, 114: 763-773.
- [82] Ermolieva T Y, Ermoliev Y M, Havlik P, Mosnier A, Leclère D, Kraxner F, Khabarov N, Obersteiner M. Systems analysis of robust strategic decisions to plan secure food, energy, and water provision based on the stochastic GLOBIOM model. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2015, 51(1): 125-133.
- [83] Philippidis G, Shutes L, M'Barek R, Ronzon T, Tabeau A, van Meijl H. Snakes and ladders: World development pathways' synergies and trade-offs through the lens of the Sustainable Development Goals. *Journal of cleaner production*, 2020, 267: 122147.
- [84] Fujimori S, Hasegawa T, Krey V, Riahi K, Bertram C, Bodirsky B L, Bosetti V, Callen J, Després J, Doelman J, Drouet L, Emmerling J, Frank S, Fricko O, Havlik P, Humpenöder F, Koopman J F L, van Meijl H, Ochi Y, Popp A, Schmitz A, Takahashi K, van Vuuren D. A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation. *Nature Sustainability*, 2019, 2(5): 386-396.
- [85] Brouwer F, Avgerinopoulos G, Fazekas D, Laspidou C, Mercure J F, Pollitt H, Ramos E P, Howells M. Energy modelling and the Nexus concept. *Energy Strategy Reviews*, 2018, 19: 1-6.
- [86] Woltjer G B, Kuiper M, Kavallari A, Meijl H V, Powell J, Rutten M, Shutes L, Tabeau A. The MAGNET model: Module description. LEI Wageningen UR, 2014:1-148.
- [87] Baldos U L C, Haqiqi I, Hertel T W, Horridge M, Liu J. SIMPLE-G: a multiscale framework for integration of economic and biophysical determinants of sustainability. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 133: 104805.
- [88] Liu J, Hertel T W, Lammers R B, Prusevich A, Baldos U L C, Grogan D S, Froliking S. Achieving sustainable irrigation water withdrawals: global impacts on food security and land use. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(10): 104009.
- [89] Villoria N B, Liu J. Using spatially explicit data to improve our understanding of land supply responses: an application to the cropland effects of global sustainable irrigation in the Americas. *Land Use Policy*, 2018, 75: 411-419.
- [90] Dellink R, Chateau J, Lanzi E, Magné B. Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 200-214.
- [91] Alcamo J, Krol M, Posch M. An integrated analysis of sulfur emissions, acid deposition and climate change. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 85(3): 1539-1550.
- [92] Stehfest E, van Zeist W J, Valin H, Havlik P, Popp A, Kyle P, Tabeau A, Mason-D'Croz D, Hasegawa T, Bodirsky B L, Calvin K, Doelman J C, Fujimori S, Humpenöder F, Lotze-Campen H, van Meijl H, Wiebe K. Key determinants of global land-use projections. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2166.
- [93] Kling C L, Arriitt R W, Calhoun G, Keiser D A. Integrated assessment models of the food, energy, and water nexus: a review and an outline of research needs. *Annual Review of Resource Economics*, 2017, 9(1): 143-163.
- [94] Sulser T B, Ringle C, Zhu T, Msangi S, Bryan E, Rosegrant M W. Green and blue water accounting in the Ganges and Nile basins: Implications for food and agricultural policy. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3-4): 276-291.
- [95] Mason-D'Croz D, Sulser T B, Wiebe K, Rosegrant M W, Lowder S K, Nin-Pratt A, Willenbockel D, Robinson S, Zhu T J, Cenacchi N, Dunston S, Robertson R D. Agricultural investments and hunger in Africa modeling potential contributions to SDG2-Zero Hunger. *World Development*, 2019, 116: 38-53.
- [96] Mason-D'Croz D, Bogard J R, Sulser T B, Cenacchi N, Dunston S, Herrero M, Wiebe K. Gaps between fruit and vegetable production, demand, and recommended consumption at global and national levels: an integrated modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 2019, 3(7): e318-e329.
- [97] Wang M R, Tang T, Burek P, Havlik P, Krisztin T, Kroeze C, Leclère D, Stokal M, Wada Y, Wang Y P, Langan S. Increasing nitrogen export to sea: a scenario analysis for the Indus River. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133629.