农业绿色发展系统研究思路与定量方法

金欣鹏，马林，张建杰，马文奇，张福锁

引用本文:
金欣鹏, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展系统研究思路与定量方法[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1127−1140.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200241

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农业绿色发展指标体系的构建与例证

Construction of a green development index system for agriculture in China and examples

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1113−1126 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200069

农业绿色发展理论框架和实现路径的思考

Theoretical framework and realization pathway of agricultural green development

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1103−1112 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200238

中国食物链养分流动与管理研究

Nutrient flow and management in the food chain in China

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1494−1500 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180668

中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征

Spatiotemporal variation of nitrogen indicators related to agricultural green development in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1141−1155 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200159

中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征

Spatiotemporal characteristics of green development indicators in the whole dairy industry chain in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1181−1199 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200471

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200241

金欣鹏, 马林, 张建杰, 马文奇, 张福锁. 农业绿色发展系统研究思路与定量方法[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1127−1140
JIN X P, MA L, ZHANG J J, MA W Q, ZHANG F S. Systematic research and quantitative approach for assessing agricultural green development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1127−1140

农业绿色发展系统研究思路与定量方法*

金欣鹏[1,2], 马 林[1**], 张建杰[3], 马文奇[3], 张福锁[4]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071001; 4. 中国农业大学国家绿色农业发展研究院 北京 100193)

摘 要: 农业绿色发展研究是融合多学科知识, 以食物系统为研究对象, 重点剖析系统内不同单元间关联和互馈关系, 进而阐明粮食安全、国民健康、资源节约、环境保护等目标的协调机制, 探索全产业链技术途径, 并致力于协同实现农业“绿色”和“发展”的科学。传统研究方法往往忽视对农业绿色发展的系统思考和定量分析, 无法统筹农业绿色发展的各环节和协调多类目标的实现。在本研究中, 我们首先基于系统研究的思路, 明确了“土壤-作物生产-畜牧业生产-食品加工-家庭消费—环境”整个食物系统是农业绿色发展系统研究边界; 其次, 结合农业绿色发展全链条和多尺度特性, 提出并论述了“自上而下”和“自下而上”的定量研究思路; 随后, 以上述两方面研究思考为基础, 构建了由 1 个核心模型[食物系统养分流动模型(NUFER)]、3 个定量分析模块(水、大气和土地利用分析模块)和 1 个指标关联模块[耦合驱动力-压力-状态-影响-响应概念框架(DPSIR)、可持续发展指标体系(SDGs)和星球边界理论框架(PBs)]组成的农业绿色发展系统分析耦合模型(NUFER-AGD); 最后, 梳理了农业绿色发展定量研究的案例。案例研究通过多指标关联分析和指标评价, 协同国家农业绿色发展的总体目标; 在流域尺度以绿色环境与资源阈值为约束, 定量设计农业绿色发展系统解决方案; 系统分析全产业链农业绿色发展的技术实现路径。该研究不仅能为农业绿色发展理论和应用研究提供系统思路和定量方法, 还可为国家农业绿色发展战略提供科学支撑。

关键词: 农业绿色发展; 食物系统; 系统研究; NUFER 模型; 多指标关联分析

中图分类号: S19; S158.5 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Systematic research and quantitative approach for assessing agricultural green development*

JIN Xinpeng[1,2], MA Lin[1**], ZHANG Jianjie[3], MA Wenqi[3], ZHANG Fusuo[4]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 4. National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Research on agricultural green development (AGD) is a scientific direction of integrating multi-disciplinary

* 国家自然科学基金项目(31972517)和中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-25)资助
** 通信作者: 马林, 研究方向为农业生态学。E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn
金欣鹏, 研究方向为农业生态学。E-mail: jinxinpeng19@mails.ucas.ac.cn
收稿日期: 2020-04-01 接受日期: 2020-06-10

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31972517) and the Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (2019-XZ-25).
** Corresponding author, E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn
Received Apr. 1, 2020; accepted Jun. 10, 2020

knowledge. It takes the food system as the research boundary, and focuses on analyzing the relationship between different sectors in the food system to achieve the targets of food security, human health, resource conservation and environmental protection. It also devotes attention to the coordination of "green" and "development" in agriculture production system. Previous methods often neglect systematically thinking and quantitatively analyzing of the AGD, and cannot coordinate multiple objectives of AGD. In this study, we firstly defined the research boundary of AGD, which considered "soil-crop production-animal production-food processing-household consumption-environmental impacts" systems; secondly, we developed the quantitative research approaches of "top-down" and "bottom-up", combining the whole food chain and multi-scale characters in AGD studies; thirdly, we developed the new modelling system for AGD (NUFER-AGD), including a core model (the food system nutrient flow model, NUFER), three quantitative analysis modules (water, atmosphere and land use modules) and one index module (linked to Driving force-Pressure-States-Impacts-Response, DPSIR; Sustainable Development Goals, SDGs; and Planet Boundaries, PBs); and last, we reviewed several case studies of quantitative research on AGD. Here, case studies were conducted by following 3 steps: (1) coordinating the overall goals AGDs at national level by nexus analysis approach and multiple indicators evaluation; (2) designing AGDs solutions quantitively by using green environment and resource limits as thresholds at the watershed scale; (3) analyzing the technical pathways of AGD systemically in the whole industrial chain. This research can not only provide systematic thinking and quantitative methods for the research of AGD, but also provide scientific support for the national strategy of AGD in China.

Keywords: Agricultural green development; Food system; Systematic research; NUFER model; Nexus analysis of multiple indicators

农业绿色发展是为加快农业发展方式从数量型向质量型的转变, 协同实现食物安全、资源高效、环境保护的可持续发展目标, 支撑"生态文明建设" "乡村振兴"的重要战略举措, 需要融合多学科知识, 开展交叉、创新型研究[1]。集约化农业向农业绿色发展转型不仅是我国的重大需求, 也是联合国提出的实现农业和食物系统可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)的全球战略[2]。农业绿色发展涉及"食物生产—加工—消费"的全过程, 同时与资源环境间存在着复杂的相互作用关系, 因此需要在明确不同过程(或单元)之间关联和互馈关系的前提下将农业绿色发展研究扩展到整个食物系统。而驱动力-压力-状态-影响-响应概念框架[3] (Driver-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR)是理解食物系统的驱动因素、各单元间的关联关系和互馈机制的重要方法之一, 也成为农业绿色发展的重要科学命题与挑战[4]。其核心要义是: 以食物系统物质循环及其社会、经济、生态效益的定量分析和系统设计为主线, 以构建"食物-土地利用-水-养分-温室气体"多指标系统分析模型和农业绿色发展评价指标体系为突破口, 探索并量化区域/流域尺度以绿色环境与资源阈值为约束的农业绿色发展实现路径, 进而提出绿色全产业链解决方案。基于农业绿色发展内涵和理论框架[5], 本研究阐述了农业绿色发展系统研究思路、方法和案例。

1 农业绿色发展系统研究思路

本文以食物系统为研究对象, 提出了"自下而上"和"自上而下"的农业绿色发展系统设计和定量研究的思路。

1.1 农业绿色发展系统研究的对象和边界

农业绿色发展研究对象是食物系统, 包含动植物生产、加工、消费和环境排放等多个相互联系、相互作用的要素(或部分), 是具有一定结构和功能的有机整体, 属于系统科学范畴, 而从系统的角度观察和研究客观世界的学科就是系统科学, 主要研究系统的要素(或元素)、结构和系统的行为(性质)[6]。系统研究的基本特征包括: 整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性、时序性等[7]。因此, 本文将系统思维引入到农业绿色发展研究时, 也充分考虑了系统研究的基本特征: 1)立足食物系统和农业产业链的整体性; 2)分析食物系统各单元的关联性; 3)阐明系统与各单元、国家与区域(流域)的等级结构性; 4)协调水、氮、磷、碳等各类物质的动态平衡性; 5)揭示系统和各单元的时空变化特征。

本文将食物系统作为研究对象, 研究边界由土壤、作物、畜牧业、食品加工和家庭消费 5 个核心管理单元组成, 同时兼顾了与之相关的大气环境和水体环境系统(图 1)。研究的空间尺度可以是全球、国家、区域、流域和农户等多种尺度, 时间维度上可以包含历史变化、现状特征和未来情景。在此基础上, 重点研究系统内各单元物质(水、氮、磷、碳等)流动的时空特征及其对农业生产力、生态环境和社会经济效益的影响。其中, 食物系统物质流动是指水、氮、磷、碳、耕地等在不同尺度的食

物系统及其各个管理单元(库)之间的迁移和转化，由于涉及的物质库较多，加之各种物质自身的特征有很大差异，使得物质流动十分复杂。此外，各管理单元与外部环境(大气、水体)的物质交换过程、各经济主体在食品市场的博弈行为，进一步增加了物质流动的不确定性和复杂性，这也正是将生产、经济、社会和生态环境综合评价纳入定量分析的缘由。

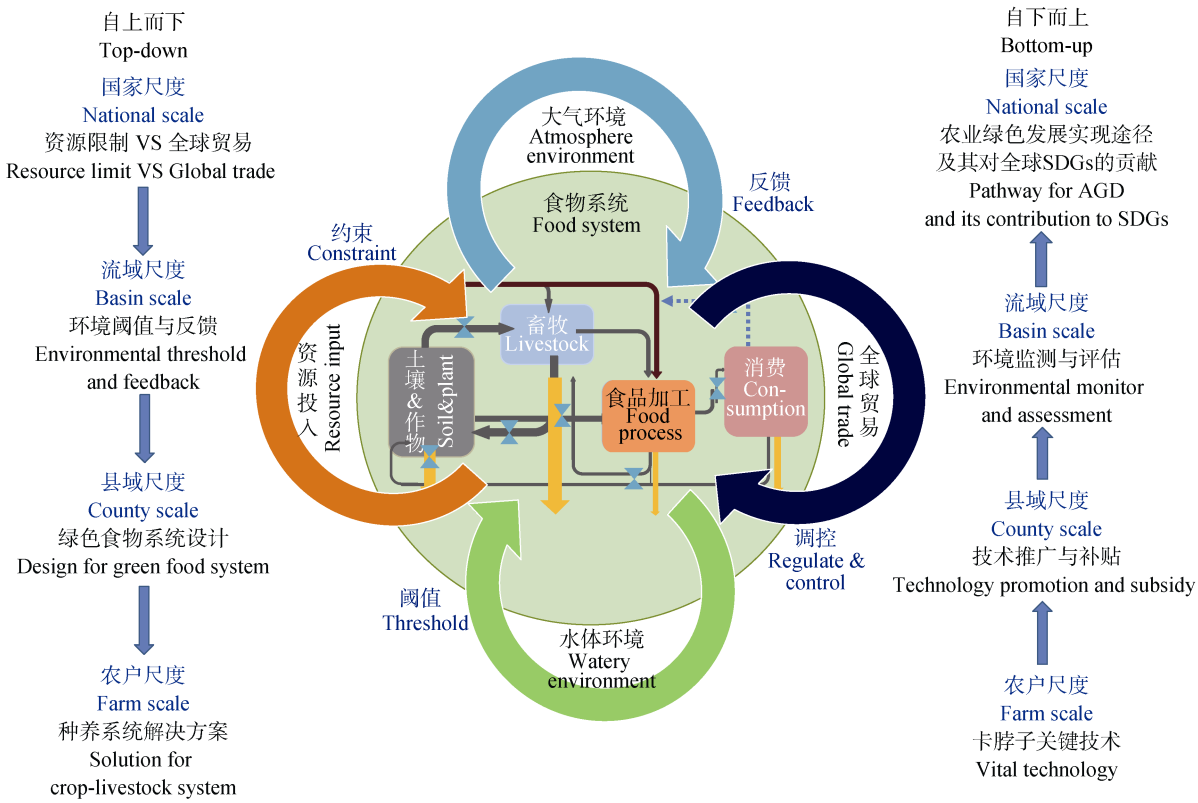

图 1　农业绿色发展研究边界与系统研究思路

Fig. 1　Research boundary and systematical thinking of agricultural green development

AGD: agricultural green development; SDGs: sustainable development goals.

1.2　农业绿色发展系统研究“自上而下”和“自下而上”的思路

基于系统研究的整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性、时序性等基本特征，并结合农业绿色发展全链条和多尺度的特性，本文提出了农业绿色发展“自上而下”和“自下而上”的研究思路，两条研究思路既有区别又有联系，统一于农业绿色发展实践中(图 1)。

“自上而下”研究思路是从宏观到微观、从整体到局部的演绎方法，有助于从整体理解局部问题，把复杂难题分解成具体问题，利用系统方法提出解决方案。本研究提出农业绿色发展“自上而下”的研究思路，包括：1)定量分析国家尺度水、耕地、矿产、能源等资源限制和全球贸易背景下农业生产的潜力；2)划定流域尺度大气和水环境阈值，以此为依据优化流域农业空间布局；3)构建县域尺度绿色发展指标体系，剖析全产业链绿色转型的瓶颈问题，提出绿色食物系统优化策略；4)对标先锋农户(企业)关键环节，分析种、养、加全产业链绿色发展的限制因素，提出系统解决方案。

“自下而上”研究思路是从微观到宏观、从局部到整体的归纳方法，有助于理解系统内部单元的相互作用，揭示客观事物构成的原因及其演化的历程。本研究据此提出了农业绿色发展“自下而上”的研究思路，包括：1)调研和跟踪农户(企业)，分析全产业链农业绿色发展的瓶颈问题，研发关键技术，探索全产业链农业绿色发展实现模式；2)对标县域农业绿色发展关键指标，探讨县域农业绿色转型的科技瓶颈、政策保障与路径，提出县域农业绿色特色产业的系统解决方案；3)完善流域生态环境监测网，联网并将其与模型结合，健全绿色生态环境的监测、评估和政策解决方案相结合的农业绿色发展管理机制；4)提出我国农业绿色发展的科技战略、创新重点、政策保障与实现途径，为我国农业绿色发

展战略提供科技与政策支撑，为全球 SDGs 实现提供成功案例。

“自上而下”和“自下而上”的关系是辨证统一的，二者相互作用、相互影响，形成推动农业绿色发展的合力。两种思路在形式上的区别是显而易见的，尤其是在农户尺度和全球尺度，“自上而下”的思路注重把握绿色的方向，以区域和流域环境阈值为限制因素，通过耕地资源配置，最大化农户尺度的生产力水平和农业效益；“自下而上”的思路强调农田和畜禽尺度绿色技术革新并落实到千万农户个体上，使某个环节的提升“涌现”为区域和国家生产力质的提升。而在中等尺度的流域和县域中，强调生态监测和构建可比的绿色发展指标评价体系，二者更多地体现为相互促进的关系。“自上而下”的思路通过划定阈值、指标分解，为“自下而上”的技术实践指明方向、设置标准；“自下而上”的研究在解决具体绿色生产技术问题的同时，为“自上而下”研究提供本地化参数和验证数据，为增强模型模拟、情景分析能力提供可能。两条思路共同推动国家尺度的农业绿色发展实现。

2 农业绿色发展的系统研究方法

2.1 系统研究思路

绿色发展强调人与自然的和谐共生，相关研究需要准确理解和评价人与自然复杂的交互关系[8]。具体到农业领域，食物系统既是农业生态系统的核心，又是人类与环境相互作用最为频繁的界面，因此农业绿色发展以食物系统为研究对象，重点研究人类需求驱动和强烈干扰下的食物系统与生态环境的互馈关系。本文围绕“自上而下”和“自下而上”的农业绿色发展系统定量研究的思路，在农户-流域-区域-国家-全球多尺度下，构建了农业绿色发展系统分析耦合模型(NUFER-AGD)(图 2)，为定量分析食物系统行为和探索农业绿色发展策略提供了方

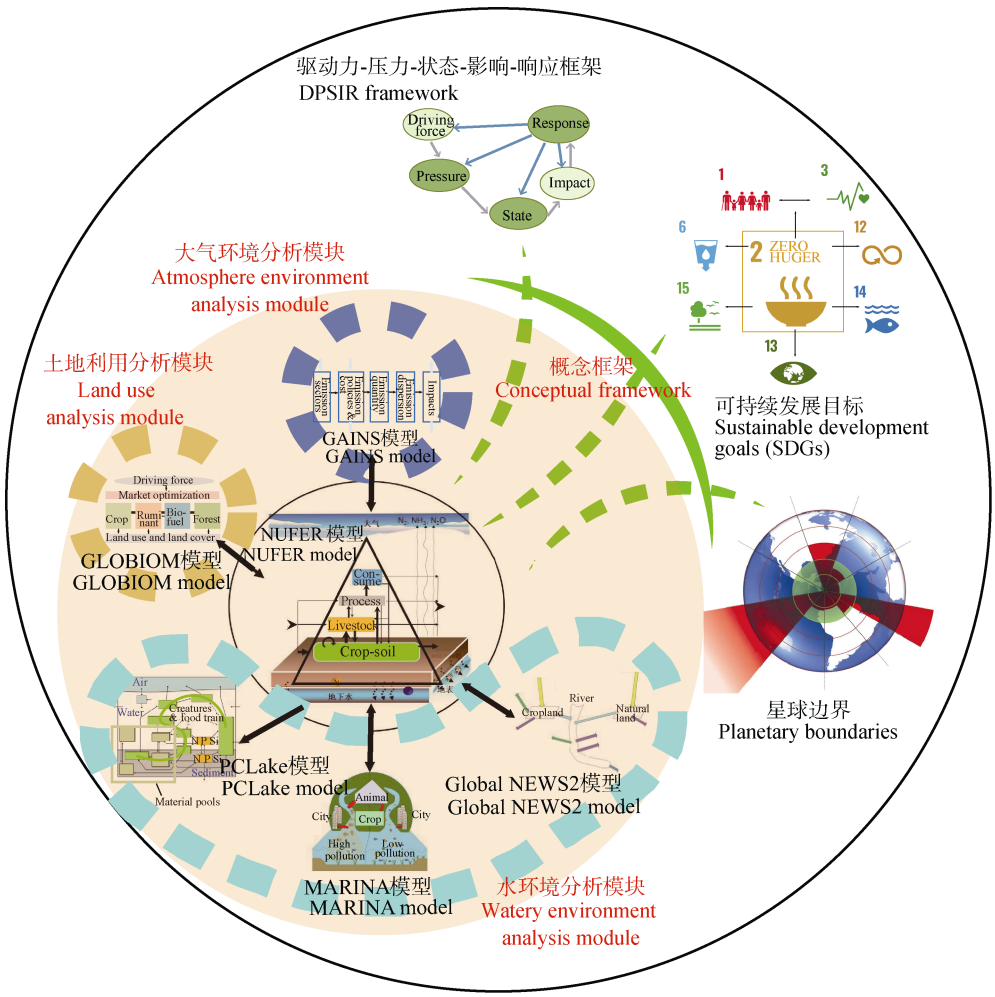

图 2 农业绿色发展系统分析耦合模型系统(NUFER-AGD)

Fig. 2 Framework of modeling system for analyzing agricultural green development (NUFER-AGD)

图中各模块的详细介绍见后文及其参考文献[3,9-15]。The more details of modules in this figure are included in the text and the references [3,9-15].

法。NUFER-AGD 以食物系统分析为核心, 涵盖农牧产品生产—加工—消费—贸易全过程, 集成水体-土壤-大气环境全要素分析功能, 并耦合驱动力-压力-状态-影响-响应概念框架[3]、可持续发展指标体系[9]和星球边界理论框架(Planetary Boundaries, PBs)[10]。该耦合模型由 1 个核心模型[食物系统模型流动模型(NUFER)][16]、3 个关联模块(水、大气和土地利用分析模块)和 1 个指标关联分析模块(耦合 DPSIR、SDGs 或 PBs 概念框架)构成。NUFER 作为核心模型, 其主要功能是以养分为定量载体, 量化食物系统的氮磷等养分流动、利用效率和环境效应[17]; 为增强对地球系统关键过程的模拟和综合评价能力, 对核心系统功能进行延伸, 利用 3 个关联模块和 1 个指标关系分析模块分别对水体、大气和土地利用等要素进行定量分析以及可持续发展指标评价(图 2)。上述模型系统总称为农业绿色发展系统分析耦合模型(NUFER-AGD), 作为农业绿色发展系统研究的核心方法。

农业绿色发展内涵[5]是农业绿色发展的评判标准和指引方略, 应当在系统研究的思路和方法中充分彰显, 系统研究的思路和方法是农业绿色发展内涵的实践, 应当将可操作性放在首要位置, 因此农业绿色发展的内涵、系统研究的思路、方法三者是联动的(图 3)。系统研究方法和农业绿色发展系统分析耦合模型的关键步骤和研究思路中强调的研究重点相对应(图中字母标号所示)。

自上而下: A. 进行时空特征和对标分析, 从 3 个支柱和 4 个界面角度锁定大尺度农业绿色发展现存的重大问题; B. 考虑 5 个利益主体公平性和 10 个过程, 建立流域和县域可比的量化指标体系和环境阈值; C. 协调 5 个利益主体和 6 个目标, 进行系统优化与迭代, 确定最优农业绿色生产结构和空间布局; D. 参考 7 个途径, 进行情景分析和反推分析, 将情景分析结果与 6 个目标比对, 检查目标实现情况, 最终结果用于指导县域尺度农业绿色发展实践。

自下而上: E. 从 10 个过程入手, 研发农户尺度关键技术, 从 4 个界面考虑和借鉴优秀典型县域模式, 与此同时, 积累生产技术和模式参数; F. 以 6 个目标和 7 个途径为参考, 考察并监测农户和县域尺度生产、生活、生态、科技、政策落实等方面的状况, 建立本地化模型数据库; G. 将本地数据代入县域指标体系, 并结合生态联网检测的环境排放的实际值, 与模拟数据比对, 考察模型模拟结果在 6 个目标和 10 个过程模拟中的准确程度; H. 基于 3 个支柱和 4 个利益主体的视角, 总结凝练国家应着力发展和建设的科技战略、重大工程、政策保障等。

综上所述, 联动机制完成了从顶层设计到基层调研的良性循环, 使得政府规划管理的有形之手和技术创新、市场开放的无形之手共同推动农业绿色发展。需要说明的是, 这里的农业绿色发展内涵、系统研究思路、定量方法中各个步骤或侧重点并非完全独立分离, 不同研究中可能有所交叉和重叠, 此外, 三者联动关系中各个内涵都有不同程度的彰显, 这里我们选择最为普遍和适合的模式开展研究(图 3)。

2.2　农业绿色发展系统分析耦合模型

NUFER 是基于物质流分析开发的, 以食物系统为研究对象, 以养分为载体, 定量分析全球、国家、区域、流域和农户等不同尺度食物系统下氮磷流量、利用效率和环境排放等养分流动时空特征, 综合评价粮食安全、资源利用和环境影响耦合关系的经验模型[17](表 1)。将 NUFER 作为农业绿色发展系统分析耦合模型的核心模型, 其在整个 NUFER-AGD 模型框架下的优势和具备的功能是: 1)基于物质流分析的方法, 揭示氮磷等养分流动的时空特征, 有助于分析其时空演变的驱动力、揭示当前农业发展存在的资源环境问题; 2)涵盖“农畜产品生产—加工—贸易—消费”多环节, 一方面, 可以进一步锁定造成养分资源利用效率低下、环境排放超标的关键环节, 另一方面, 这一特点也使得其能与其他专门生态环境模块较好地耦合; 3)以多尺度食物系统为研究对象, 这是开展“自上而下”和“自下而上”的系统研究的基础; 4)利用情景分析的方法, 可以分析农业绿色发展技术和政策调控途径的影响, 并可以与最优化分析结合, 提出切实可行的策略组合。不可否认的是 NUFER 也存在某些不足, 例如: 对各类环境排放模拟不够细致, 缺乏验证; 情景分析往往以技术情景为主, 只是针对某一方面“最乐观”的影响-适应性分析, 这样做代表着研究范围内都不考虑分异性、不计成本地采用某种技术组合减排, 这种减排策略对于改善环境是“最乐观”的, 但得出的结论只能用于方向性的指导, 缺乏实际操作性。综上, 尽管 NUFER 模型在某些方面存在不足, 但是具有不可替代的全面性(多尺度、多环节), 不足之处都在模型中有所涉及, 兼容性好, 可通过耦合其他专门模块加以完善, 因此 NUFER 模型作为 NUFER-AGD 模型框架的核心是最优选择。

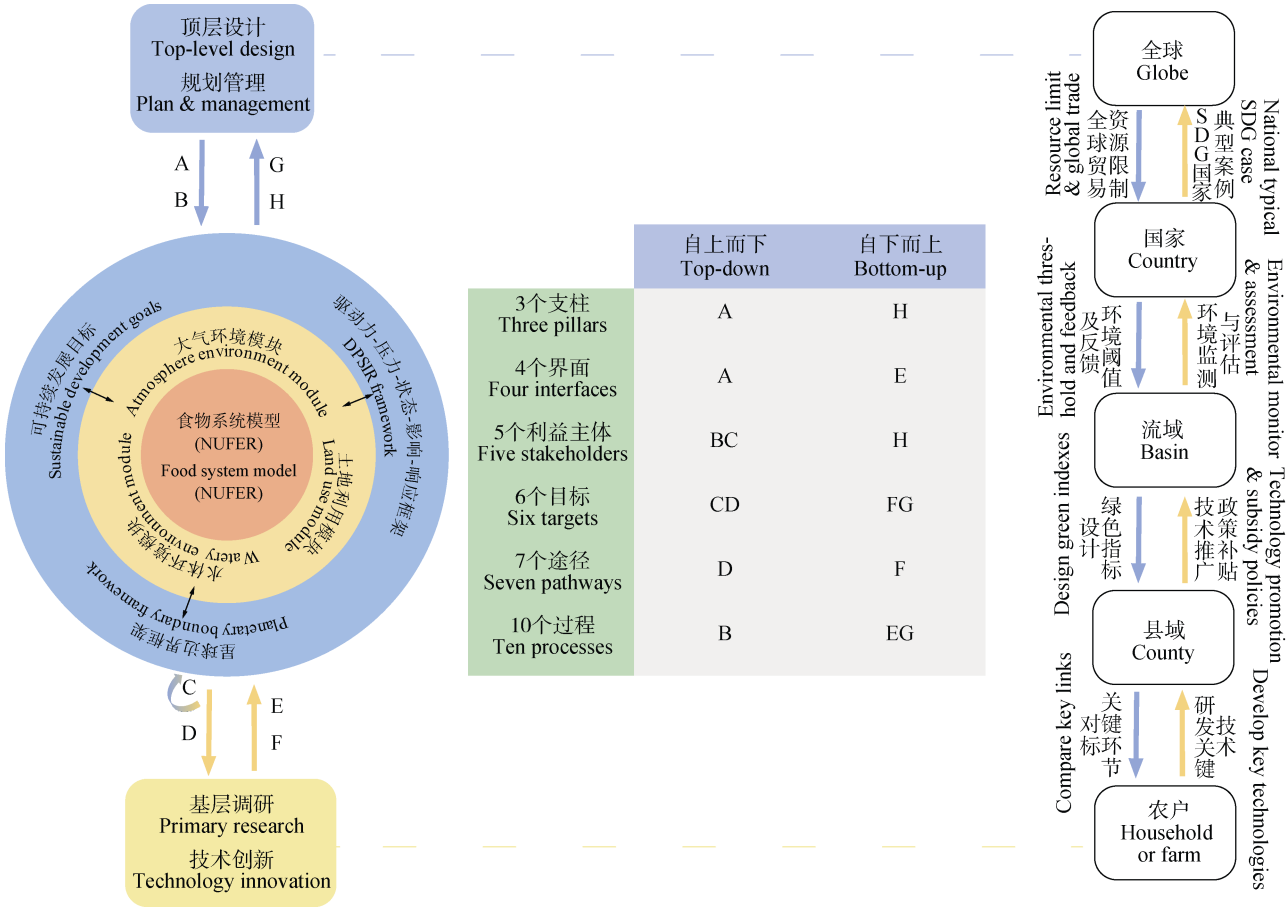

图 3 农业绿色发展系统分析耦合模型与系统研究思路

Fig. 3 NUFER-AGD model and systematical research approach

图中 3 个支柱为生产资源、生态环境、社会经济, 4 个界面为资源与生产之间、生产与消费之间、生产环节之间、生产消费与环境之间的界面, 5 个利益主体为政府、农民、企业、经销商、消费者, 6 个目标为社会、经济、生产、资源、生态、环境, 7 个途径为政策、市场、服务、技术、产品、知识、工程; 10 个过程为 1)作物生产与资源的交换、2)畜牧生产的资源输入和粪尿的资源化利用、3)作物产品直接用作饲料、4)作物产品与食物和饲料加工的交换、5)动物产品与加工的交换、6)作物生产与家庭消费的交换、7)食品加工与家庭消费的交换、8)动物生产与家庭消费的交换、9)农产品加工和食物损失浪费和 10)食物系统环境排放, 这些为马文奇等[5]提出的农业绿色发展的内涵。图中“自下而上”和“自上而下”的系统分析与定量研究步骤为: A, 时空数据分析与对标; B, 流域、县域指标和阈值; C, 多目标优化和迭代; D, 情景分析和反推分析; E, 生产技术和典型模式; F, 农业、生态和环境等政策; G, 县域流域指标验证; H, 凝练科技战略、创新重点。The connotations of agriculture green development shown in the middle of the figure are raised by Ma, et al[5]. Three pillars are resource for production, ecological environment, socio-economic; Four interfaces are the interface between resource input and production, the interface between production and consumption, the interface between different production sectors, the interface between production-consumption and environment. Five stakeholders are government, farmers, companies, dealers, consumers. Six targets are social targets, economic targets, production targets, targets of resources utilization, ecological targets and environmental targets. Seven approaches are policy approaches, market approaches, service approaches, technical approaches, product approaches, knowledge approaches and engineer approaches. Ten processes are: 1) resource input and crop production; 2) feed input, livestock production and manure utilization; 3) crop product used as feed directly; 4) crop product processed for food or feed; 5) livestock product process; 6) crop production and human consumption; 7) food process and human consumption; 8) livestock production and human consumption; 9) product process, food loss and food waste; 10) environmental emission from food system. The steps of systematic analysis and quantitative research of “top-down” and “bottom-up” in the figure are A: analyze and compare spatial-temporal data; B: build index system at basin and county scale and define their thresholds; C: multi-objective optimization algorithm; D: scenario analysis and backcasting method; E: develop technologies of production and explore typical patterns; F: agricultural, ecological and environmental policies; G: verify model results and observed value; H: develop key technological strategies and innovation fields.

在农户尺度重点关注种养生产系统, NUFER 模型可以分析不同类型和管理模式的农田、畜禽养殖和农户(农场)的养分利用效率、环境排放特征及其影响因素, 为优化农户养分管理行为提供科学依据, 可作为农户尺度农业绿色发展指标体系的定量工具。Zhao 等[18]利用 NUFER 模型, 分析了海河流域 400 余个不同类型农户的种养系统养分流动特征, 发现种养结合农场的养分利用效率比作物种植户和集约化养殖场高 5%~9%, 同时种养结合养殖场氮、磷环境损失分别较集约化养殖场低 20%~42%和 69%~78%。Wei 等[19]利用 NUFER 模型, 分析了北京都市型集约化养殖场养分流动特征、氮磷养分利用

效率及环境损失途径, 同时选取 13 个指标对都市畜牧业环境、经济和社会效益进行了定量评价, 完善了农户尺度种养系统的评价指标体系。

在区域和流域尺度重点关注种养生产系统与环境系统的关系, NUFER 模型通过分析不同流域养分环境排放特征, 识别热点环境排放区和生态脆弱区, 为区域环境管理政策的制定提供科学依据, 可以作为区域和流域尺度农业绿色发展指标体系的定量工具。Ma 等[20]在省域尺度上分析了 1980—2005 年氮磷流动时空变化特征, 揭示了京津冀、珠三角、长三角地区 25 年间氮素损失量快速增长的事实。基于上述特征和对农业面源污染问题的思考, Bai 等[21]将 NUFER 模型与地下水硝酸盐监测数据、环境公报发布的水质数据、分县农业统计资料和土壤地质信息等数据结合, 揭示了我国县域尺度农牧系统氮磷养分环境排放的历史变化趋势并识别了排放的热点区域[22], 初步划分了我国氮磷生态脆弱区和潜在脆弱区。该研究为推进化肥减施、有机肥替代、畜禽粪尿资源化、面源污染阻控和农业绿色发展等国家重大行动提供了重要依据[21,23]。针对农牧系统氨挥发和空气质量下降问题, Bai 等[24]利用 NUFER 模型, 提出了初步划定我国区域氨排放阈值的理论框架, 即: 1)以氨与 $PM_{2.5}$ 联动的人体健康评价为核心; 2)兼顾氨排放与区域森林、草地和海洋的生态多样性; 3)统筹生态红线区划和氨减排的成本效益。同时避免农业源污染的空间转移和形态转变, 即要避免氨排放阈值的设定增加贫困地区氨排放或增加硝酸盐脆弱区的氮素淋失风险[25]。上述研究为进一步治理大气雾霾、区域面源污染综合防控的技术研发和政策制定提供了科学依据。此外, Zhao 等[18,26]还针对农业主产区和位于养分环境排放热点区域的华北平原/海河流域开展了研究, 揭示了海河流域农牧系统氨挥发和水体特征和未来的减排潜力。

在国家尺度重点关注整个食物系统, NUFER 模型用于分析不同国家养分流动的历史变化特征及其影响因素, 阐明农牧生产系统技术改进、区域环境政策调控、膳食结构优化和全球贸易增加对食物系统养分利用效率的影响, 为国家农业绿色发展重大战略提供科学支撑, 可以作为国家尺度农业绿色发展指标体系的定量工具。Ma 等[16]利用 NUFER 模型分析发现我国作物生产氮效率从 1980 年的 32%降低到 2005 年的 26%; 而畜牧业氮效率提高了 1 倍; 食物系统氮效率从 16%降低到 9%。1980—2005 年, 土壤-作物系统的氮环境损失由 940 万 t 增加到 2 700 万 t; 畜牧业氮环境损失增加了近 4 倍; 食物系统氮环境损失约增加了 2 倍。该结果揭示了我国食物系统养分利用效率较低且持续下降、养分损失高且持续增加的历史演变规律, 加深了对食物系统与环境损失之间定量关系的理解[16,27]。进一步聚焦中国奶业产业链, 利用 NUFER 模型对中国牛奶消费与全球环境影响之间的关系进行定量分析, 研究表明, 2050 年中国牛奶消费总量将达到 2010 年牛奶产量的 3 倍, 在基准情境下耕地需求量、温室气体排放量和活性氮损失量将分别增加 32%、35%和 48%; 通过提高饲料品质、奶牛养殖生产效率和畜禽粪污资源化利用效率等全产业链提质增效的绿色生产措施, 不仅

表 1　不同尺度食物系统养分流动研究重点及其意义

Table 1　Key research areas and significances of nutrient flows in food system at different scales

研究尺度 Study scale	主要研究对象 Main study object	模型主要功能 Main functions of the model	重要应用领域 Key application fields
全球/国家尺度 Global or country scale	整个食物系统 Whole food system	分析不同国家养分流动历史变化特征及影响因素, 阐明农牧生产技术改进、区域环境政策调控、膳食结构优化和全球贸易增加对食物系统的影响 Analyze historical changes and influencing factors of the nutrient flows in different countries, and illustrate the impacts of improvement of crop-livestock production technologies, diet structure and global trade on food system	为国家农业绿色发展重大战略提供科学支撑 Provide scientific support for national agricultural green development
区域/流域尺度 Regional or basin scale	种养生产与环境系统的关系 Interaction between crop-livestock production and environmental system	分析不同流域养分环境排放特征, 识别热点环境排放区和生态脆弱区 Analyze nutrient emission characters in different basins, identify emission hotspots and ecologically vulnerable areas	为区域环境管理政策的制定提供科学依据 Provide scientific basis for reginal environmental management policies making
农户/农场尺度 Household or farm scale	种养生产系统 Crop-livestock system	分析不同类型和管理模式的农田、畜禽养殖和农户(农场)的养分利用效率和环境排放特征及其影响因素 Analyze nutrient use efficiency, emission characters and influencing factors in households or farms production system, whose types or management patterns are different.	为优化农户养分管理行为提供科学依据 Provide scientific basis for farms or households to improve nutrient management

可以满足奶产品需求, 同时可以减少耕地需求的 30%和温室气体排放的 12%; 该研究可为中国奶业振兴提供科学依据, 并对全球牛奶生产体系可持续发展具有重要借鉴意义[28]。

2.3 水环境系统分析模块的研究方法

水环境分析模块是 NUFER 模型向水环境分析的延伸, 该模块包含 3 个模型、两项功能, 其中 Global-NEWS 2(Global Nutrient Export from WaterSheds 2)[11]和 MARINA(Model to Assess River Inputs of Nutrients to seAs)模型[12,29]用来量化养分流从源向河口、入海口的迁移和滞留于各级河网的情况, 并通过沿海富营养化潜力(Inidcator for Coastal Eutrophication Potential, ICEP)等指标体现其环境影响。选用这两个模型是由于不同尺度下氮磷养分在水体中迁移机制不同, 而且二者原理一致, 与 NUFER 模型同属养分流动经验模型, 因此耦合效果较佳; PCLake 模型[13,30]属于系统动力学模型, 具有强大的展现稳态转换的能力, 用于确定湖泊水体氮磷投入的阈值, 并据该阈值进行情景分析、提出减少氮磷负荷的建议。

Global NEWS 2 模型是一个考虑了空间异质性的全球流域营养盐输出模型, 以年或季节为时间步长来模拟全球 6 000 多个流域不同来源(点源、面源)、不同元素(氮磷、碳、硅)、不同形式(有机可溶性、无机可溶性、悬浮性)的营养盐从陆地向河口及近海的输出量[11,31]。 模型已经用于分析全球和多个国家过去(1970—2000 年)及未来(2030—2050 年)流域营养盐的输出情况[11,32], 可作为流域环境管理的定量分析工具。聚焦子流域, Strokal 等[12]发展了区域子流域尺度的 MARINA 模型, 进一步考虑了畜禽粪尿和人粪尿直接排放入水体的情况, 并且针对中国 6 大水系进行了参数的更新和校验。 将模型应用于中国长江、黄河、珠江以及海河等重要流域, 发现在 1970—2000 年, 河流中溶解态氮和磷的输出量增加了 2~8 倍, 其中 20%~78%溶解态氮和磷来自畜禽养殖的非点源排放, 预测到 2050 年, 气候和社会经济变化将会使中国的河流污染情况更加复杂[33]。从季节尺度来看, 长江流域氮素输入的季节变化较大, 河流输出的氮素夏季最高, 冬季最低[34]。另外, MARINA 模型也被应用于中国典型湖库流域, Yang 等[35]研究发现, 在 2012 年, 官厅水库和白洋淀流域氮磷排放主要来自于农业生产, 若中国现行农业与环保政策全面执行, 到 2050 年, 两个流域氮磷年排放水平可以降至 2012 年排放水平之下。

PCLake 是考虑水生态过程的机理模型, 被广泛应用于水生态系统食物网及其环境影响研究中, 通过模拟水生态环境和沉积物之间的生物、物理和化学过程相互作用以定量分析污染物排放与水生态环境的响应关系, 可为湖库面源污染治理提供科学依据。PCLake 已在太湖、巢湖和滇池等重要湖泊研究中得到应用, 主要用于分析湖泊生态系统状态和污染负荷的响应关系[36-38]。研究表明, 太湖总氮磷负荷需要削减一半以上才能使湖泊大部分区域叶绿素浓度降至 30~40 μg·L^{-1}, 而如果要防止太湖浮游植物大量繁殖, 即把叶绿素浓度降到约 20 μg·L^{-1}, 需要减少近 90%的磷和氮的负荷[36]。上述目标需要通过减少肥料氮的应用和提高磷的污水处理效率来实现[39]。Kong 等[37]在巢湖的研究发现, 与仅由养分负荷驱动的动态变化相比, 该水域的水位控制进一步降低了临界磷负荷, 导致藻华出现的时间大约提前了 10 年。PCLake 在滇池应用的结果表明, 2012 年, 流域向滇池输入的氮磷负荷量分别是草海和外海的氮磷负荷限值的 82 倍和 17 倍[38]。

2.4 大气环境系统分析模块的研究方法

GAINS(greenhouse gas-air pollution interactions and synergies)模型[14]与 NUFER 耦合, 作为 NUFER-ADG 模型的大气环境分析模块。在农业绿色发展系统研究模型中, 主要发挥作用的是其大气化学-扩散转化模块和成本-效益分析模块。食物系统各环节释放的 NH_3、N_2O 等气体驱动大气化学-扩散转化模块, 模拟历史和未来各时期气体的空间分布情况; 成本效益分析模块则是整个模型系统优化分析的一部分, 寻求最大综合效益下, 大气污染、气候变化缓解政策和技术组合。

GAINS 模型是由国际应用系统研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)开发的研究温室气体和大气污染协同作用的综合评估模型, 主要为环境政策制定提供科学依据[14,40]。模型从研究区域未来经济发展、能源结构变化以及减排措施等驱动因素出发, 利用大气化学转化-扩散模型模拟未来大气污染物分布状况, 在此基础上综合考虑减排技术成本、量化人类和环境健康价值, 通过成本效益分析寻求代价最小的温室气体减排和大气污染防治方案。目前模型能够对 5 种大气污染物(PM、SO_2、NOx、VOC、NH_3)和 6 种温室气体(CO_2、CH_4、N_2O、HFCS、PFCs、SF6)进行综合评估[40], 并且针对亚洲开发了 GAINS-Asia 版本。模型对农业 NH_3 排放的计算主要基于化肥施用和畜禽粪尿管理两部分, 其中畜禽粪尿 NH_3 排放采

用物质流分析的方法[41]估计, 并通过计算“畜禽圈舍—粪尿储藏与处理—施用”链条各阶段的养分损失来提高估算结果的准确性, 但是该模型尚未考虑畜禽粪尿直接向水体排放时对 NH_3 排放结果的影响; 在估计化肥 NH_3 排放量时, 考虑了不同化肥种类的 NH_3 排放系数差异, 但仅区分了尿素/碳铵和其他化肥两种类型。GAINS 模型还可用于评价 NH_3 排放对 $PM_{2.5}$ 环境浓度的影响, 其中年均 $PM_{2.5}$ 浓度采用源-受体矩阵来估计[42]。Zhao 等[18]利用 GAINS 模型, 定量分析了海河流域农牧系统 NH_3 挥发特征和未来的减排潜力, 研究表明海河流域农牧系统 NH_3 排放量为 1 179 Gg, 全流域 54%的 NH_3 挥发来自占流域总面积 17%的 6 个热点区域, 优化农牧系统养分管理技术可使 NH_3 排放数量降至基线情景的 55%, 且有助于减少区域 $PM_{2.5}$ 产生。

2.5　土地利用分析模块的研究方法

土地既是农业活动中最重要的生产资源, 也是保持生态稳定、缓解气候变化重要的生态资源, 而土地面积是固定的, 生态承载力也在一定限度之内。基于这一特性, 我们将 GLOBIOM(GLObal BIOsphere Management model)模型[15]与 NUFER 模型耦合, 作为整个系统研究方法的土地利用模块, 用来合理地预估未来食物系统生产、消费和贸易情况。该模块工作机制是: 以生态足迹理论和理性人假设为基础, 事先折算非货币化的社会、生态效益, 以各利益相关者的综合效益最大化为目标, 土地面积不变、产品市场出清、土地生态承载力为平衡或约束条件, 探索和设计国家或区域农业绿色发展路径。

GLOBIOM 模型耦合了 4 个宏观尺度的全球模型: EPIC(Environmental Policy Integrated Climate Model)、RUMINANT、BIOENERGY 和 G4M (Global Forest Model)模型, 分别用于计算全球栅格尺度下作物、畜禽、生物燃料和木材的供给情况, 并具有对土地利用类型变化和温室气体排放模拟的功能。在需求侧, 模型基于未来人口、人均 GDP、产品生产成本和均衡价格(包括关税、运输成本和能力约束)的预测, 对商品的内生需求和区域间的双边贸易流动进行预测, 形成了一个由 30 个经济区域(中国是其中独立的经济体)组成, 包括 18 种主要作物和 7 种牲畜产品的商品市场。该市场以总盈余(消费者盈余+生产者盈余)最大化为目标, 资源限制和市场出清为约束, 以 10 年为步长进行动态优化, 实现了对资源利用—产品生产—贸易—温室气体排放过程的综合模拟[43]。利用 GLOBIOM 模型分析土地利用, Havlík 等[15]发现生物质燃料生产与耕地、草地争地时, 对资源环境产生的负面效应高于与林地或未利用地争地的情形, 并可能导致农产品价格的上升, 因此政府制定生物质燃料生产政策时要综合考虑经济、生态、社会效益。Havlík 等[44]利用 GLOBIOM 模型定量分析了不同畜牧业政策对温室气体排放的影响, 揭示了畜牧生产与土地利用结合的政策优化情景比单纯畜牧生产优化的情景, 温室气体减排效率高 5~10 倍, 并且能保障发展中国家民众的营养健康和生态系统的稳定性。

2.6　农业绿色发展与全球可持续发展目标关联分析模块

尽管通过模型耦合能够输出定量的结果, 但这些结果多是基于生物物理或数理统计知识得到的各个过程的流量和存量, 未能在农业绿色发展研究框架下给出系统的研究结果, 更不能进行全链条定量评价, 且对社会经济驱动机制的理解也较弱。因此我们将模型与国内外广泛运用的理论框架和全球重大行动耦合, 构建农业绿色发展指标体系, 以期实现农业绿色发展从系统认知到实际运用的跨越。在资源环境研究领域, 被广泛接受并实际应用的概念框架主要包括驱动力-压力-状态-影响-响应概念框架(DPSIR)[3]、可持续发展目标(SDGs)[9]以及行星边界理论(PBs)[10]概念框架。这些理论和概念框架覆盖了资源环境和人类发展的各个方面, 并且有着相对严谨的推理论证过程, 但是都不同程度地存在着量化不足的问题。

DPSIR 框架最初由经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)在 1993 年对压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型和驱动力-状态-响应(driving force-state-response, DSR)模型修订时提出[3,45]。其中压力指标表征人类经济和社会活动对环境的作用, 状态指标表征特定时间段的环境状态和环境变化情况, 响应指标指社会和个人如何行动来减轻、恢复和预防人类活动对环境的负面影响的措施, 很好地揭示环境与人类活动的因果关系。SDGs 框架[9,46]是 2015 年 9 月在联合国峰会提出的, 它可以被理解为一个可持续发展蓝图, 针对人类面临的全球性挑战, 提出了包括贫困、气候变化、环境退化、和平和公平议题在内的 17 个相互关联的总体目标, 但各目标之间并非是相互促进的, 甚至有某些具有相互抑制的趋势, 因此需要基于不同研究背景对其进行权衡。PBs 最初由 Rockström 等提出[10], 从

9 个关键的地球系统过程出发定量了人类发展的扰动限值，即全球安全利用资源或环境排放的限值，但是该框架立足于全球尺度，对各个国家和地区并没有强约束力，亟需降尺度到国家甚至更小的尺度以增强其政策关联性[47]。

在农业绿色发展领域，国内学者针对上述概念框架做出了有益的探索。Bai 等[4]基于 DPSIR 框架，构建了包括经济社会因素(人均 GDP、城市化水平等指标)、资源环境因素(饲料、土地、外源氮素、温室气体、活性氮和氮素利用率)等在内的畜牧业绿色发展指标体系，剖析了中国畜牧业转型驱动力及其对资源环境的影响。Ma 等[2]以资源需求、资源利用效率和环境影响为纽带将食物系统养分流动与 SDG 目标相联系，并进一步将上述 3 部分细化为 NUFER 模型可量化的指标，具体包括：资源需求(水、土地和化肥投入)、资源利用效率(包括氮、磷利用效率)和环境影响(包括氮、磷和温室气体排放量)，构成了食物系统绿色发展指标体系，探索了未来食物系统可持续发展情景。

3 农业绿色发展系统定量研究的案例介绍

以食物系统为研究对象，基于“自上而下”和“自下而上”相结合的定量研究思路，利用多指标关联分析模型和评价指标体系，协同国家农业绿色发展多目标，以流域尺度绿色资源和环境阈值为约束，定量设计农业绿色发展系统解决方案，提出全产业链农业绿色发展技术实现路径。以下介绍农业绿色发展系统定量研究案例。

3.1 我国食物系统绿色发展的多目标优化的潜力

我国集约化农业和畜牧业数量快速增长，对国内和全球的粮食安全、土地利用、资源消耗、温室气体排放和氮磷等环境损失产生了非常重要的影响，但是之前的研究对农业转型和农业绿色发展指标体系的分析不足，多是定性的描述，缺乏定量分析。Ma 等[2]在 NUFER 模型的基础上，发展了多指标关联和评价模块，对中国可持续食物系统的目标、实现途径和可持续性评价开展深入研究。利用“自上而下”的方法，从食物链视角设计农牧生产结构，研究表明：2030 年，我国饲料粮、口粮和各种畜产品的需求量还将大幅度增加。如果不做任何改进，与 2010 年相比，2030 年耕地、草地、水、氮肥、磷肥等资源代价将增加 10%~81%，氮、磷、温室气体等环境代价将增加 28%~39%。提高农牧业生产力、鼓励健康饮食、适当增加进口将是缓解未来资源环境压力的最优路径，相对于 2030 年照常路径，可以降低上述资源消耗或环境排放 7%~55%。指出在全国范围内继续加强和完善测土配方施肥、耕地地力提升、粪污资源化利用、“科技小院”、居民膳食推荐等具体助农惠农举措对实现与农业密切相关的 8 个可持续发展目标具有重要意义。该案例属于“自上而下”的研究思路，也为国家尺度农业绿色发展指标体系构建[48]和相关政策制定提供了定量方法。

3.2 我国种养系统绿色转型的关键环节及其调控途径

畜牧业绿色转型是食物系统绿色发展的关键。Bai 等[4]利用自上而下的思路聚焦农牧系统，首次将 DPSIR 理论和“食物-土地-水-养分-温室气体”多指标关联分析方法(food-land-water-nutrients-GHGs nexus)结合，定量地描述了过去几十年中国畜牧业转型的变化趋势，揭示了该转型的驱动因素、资源环境效应，并设计了我国未来农牧系统绿色发展的路径。

研究表明[4]，在人口、经济、城镇化以及相关农业政策的驱动下，中国的畜牧业革命以国际上前所未有的速度——仅仅在改革开放前 30 年间就完成了从几千年的农户散养复合功能型向集约化单一功能型的转变。畜禽养殖数量增加了 3 倍，动物蛋白供给增长了 5 倍，同时气态和水体氮损失分别升至原水平的 2 倍和 3 倍，满足国民营养需求同时也成为了我国农业面源污染的重要原因，并通过饲料贸易(进口增长 49 倍)对全球环境造成巨大影响。新一轮的畜牧业转型必须站在“生产资料-生产过程-农产品-市场-消费”全产业链的高度，以饲料和牲畜集约化生产、畜禽粪尿全链条管理以及饮食结构转变为抓手深入推进。情景分析结果表明，上述路径下，环境影响可降低至常规情景的 50%~60%，这需要政府、生产企业、零售商和消费者的共同努力。该研究案例属于“自上而下”的研究思路，可为中国畜牧业绿色发展提供理论依据，也对其他发展中国家畜牧业转型发展具有重要的借鉴意义。

通过聚焦关键环节，分析农牧系统和“饲料-粪尿排泄-饲舍-储藏-处理-施用”全链条养分流动特征，指出饲舍和储藏环节 NH_3 挥发是养分环境排放的主要环节[49-50]。该研究揭示了农牧结合的关键是探索种养废弃物资源化和减少环境损失的技术途径与模式，包括：1)明确不同“土壤-作物-畜牧”系统养分循环规律和环境影响；2)探索有机肥替代化肥调控机理与技术途径；3)研发畜禽粪尿“畜禽饲喂—畜禽圈舍—粪尿储藏—粪尿加工—粪尿施用”全链

条养分循环利用机理和减排技术。该案例属于“自上而下”的研究思路, 研究表明发展种养一体化绿色发展技术, 保持种养系统养分高效循环, 减少环境损失, 提高农牧系统利用率是种养系统绿色发展的关键[51]。

3.3 流域生态环境阈值为约束的农业绿色发展系统解决方案

在流域尺度设置环境阈值、优化农业布局是自上而下思路的重要体现。Li 等[52]基于食物系统养分流动和水环境富营化的定量关系, 提出了基于流域水环境阈值为约束条件的农业绿色发展研究框架: 1)将农户调研与监测数据结合, 耦合食物链养分流动模型和流域水质模型, 定量分析食物系统区域养分流动特征, 揭示流域氮磷养分水体排放规律; 2)阐明流域氮磷排放与水环境富营养化互馈机制, 获得水环境富营养化阈值; 3)将模型情景分析和农业绿色发展技术经济效益分析结合, 探索基于水环境阈值的食物系统绿色发展调控途径。基于上述思路, 利用 back-casting 的方法开展了案例研究, 以黄淮海流域入海口富营养化潜势指标 ICEP 为约束, 分析了农牧业生产系统向水环境养分排放的最大阈值。结果表明, 我们需要减少 50%~90%的全氮和全磷排放才可缓解该流域沿海地区富营养化潜势; 通过情景分析验证了 54 种技术组合的减排效果, 发现其中畜禽废弃物循环及有机肥替代化肥、低氮磷饲料喂养和污水磷回收等是减排的关键技术途径。该案例属于“自上而下”的研究思路, 可为流域和区域农业环境政策的制定提供科学依据, 从而支撑农业绿色发展。

基于我国水体氮磷严重污染及其治理决策数据不足的现状, Bai 等[21]建议并初步划分了中国氮磷生态脆弱区和潜在脆弱区, 结果显示: 我国约有 6 800 万 hm^2 耕地位于上述两类区域中, 其中位于脆弱区的占 78%, 位于潜在脆弱区的占 21%。大部分硝酸盐脆弱区分布在农业生产密集的环渤海区域。东北地区的黑龙江省及长江三角洲部分地区, 由于作物和畜牧生产集约化、地下水位浅, 以及地下水硝酸盐浓度高等因素, 也被划分为脆弱区。此外, 位于西南地区的四川和重庆, 由于属丘陵地貌, 氮磷径流损失风险较高, 因此也被列入了脆弱区内。基于上述划定结果, Lu 等[53]构建了硝酸盐脆弱区分区养分管理策略, 将施肥、灌溉和粪污管理措施按脆弱区类型进行分级并实施, 较以往国家层面研究有效提高了各管理措施的可行性和情景模拟的精度。该案例属于“自上而下”的研究思路, 结果表明分区策略可使农牧生态系统氮素水体排放量减少 40%~52%, 潜在脆弱区面积消减 50%以上。

3.4 全链条技术路径支撑农业绿色发展

以我国奶牛生产系统氨挥发减排为例, 遵循自上而下与自下而上的研究思路, 将养殖场原位监测、技术验证实验和模型结合, 本文介绍全链条技术途径如何支撑农业绿色发展。Zhang 等[54]利用 NUFER 模型, 全面分析了中国奶牛养殖系统氮素利用及不同氮素损失途径的时空变异, 阐明了 1980 到 2010 年间, 中国奶牛养殖系统不同规模化水平的氮素利用效率以及不同途径氮素损失的历史变化, 发现 NH_3 挥发是最重要的氮素环境排放途径。同时, 利用光声谱-二氧化碳平衡法对华北平原两种典型的清粪模式的奶牛圈舍的 NH_3 挥发进行了原位测定, 结果表明, NH_3 损失量为 21~25 $kg(NH_3)\cdot LU^{-1}\cdot a^{-1}$ (LU: 标准牛头数), 相当于总饲料氮投入的 9.7%和 12%, 该研究弥补了中国 NH_3 排放清单奶牛圈舍环节排放参数的空白, 也进一步验证了 NH_3 挥发是奶牛养殖系统氮素环境损失的最主要途径。

利用自上而下的研究确定了奶牛养殖系统氮素主要损失途径是圈舍和储藏过程 NH_3 挥发的基础上, 张楠楠[55]利用模拟试验和监测技术, 开展了“圈舍-储藏”全链条 NH_3 减排试验, 探索了不同减排措施对“圈舍-储藏”链条 NH_3 排放的影响, 并分析了 NH_3 减排与 CH_4 和 N_2O 交互影响关系, 提出了低蛋白日粮投入、漏缝地板下粪污表面酸化、蛭石覆盖粪尿混合物、乳酸酸化蛭石覆盖粪尿混合物、蛭石覆盖液体粪污、乳酸酸化蛭石覆盖液体粪污、塑料薄膜覆盖固体粪污和固体粪污压实等奶牛场全链条 NH_3 挥发减排的技术途径。“自下而上”的研究思路和 GAINS 模型方法相结合, 分析了奶牛场不同减排技术途径在各个环节的 NH_3 减排效果(3%~98%), 验证了区域和国家尺度 NH_3 减排潜力和成本[15~45 $\$\cdot kg^{-1}(N)$]。从国家层面看, 圈舍表面粪污酸化可以得到最好的减排效果, 而考虑技术实施成本时, 降低日粮蛋白投入具有最佳经济效益[56]。该案例属于“自下而上”的研究思路, 可为奶牛养殖 NH_3 挥发减排政策的制定提供理论依据, 从而支撑奶牛养殖业绿色发展。

4 结论

系统分析方法是农业绿色发展研究重要研究方法之一, 有助于理解食物系统各环节之间的关联关系, 定量分析农业绿色发展的目标、解决途径和系

统评价，阐明各种优化措施对全产业链的影响。本研究提出了“自上而下”与“自下而上”结合的农业绿色发展系统定量研究思路；在农户-流域-区域-国家-全球多尺度下，构建了以食物系统定量分析为核心的农业绿色发展系统分析耦合模型(NUFER-AGD)；初步梳理了农业绿色发展系统定量研究案例。

利用“自上而下”和“自下而上”的研究思路和系统分析方法，以农业绿色发展系统分析耦合模型(NUFER-AGD)为工具，本研究：1)定量了国家尺度食物系统多目标优化的潜力，指明提高农牧生产力、引导健康饮食是减小我国未来资源环境压力、实现可持续发展目标的最优路径；2)明确了畜牧业转型是农业绿色发展的关键，尤其要以饲料和牲畜集约化生产、畜禽粪尿全链条管理以及饮食结构转变为重点来推进这一进程；3)以流域环境阈值为约束条件划定了我国重点流域的氮磷排放限值、确定了我国氮磷生态脆弱区的范围，强调了有机肥替代化肥等促进畜禽废弃物循环措施是减少水体污染的关键；4)通过发展粪尿全链条管理技术，遴选了圈舍表面粪污酸化、降低日粮蛋白投入等高效减 NH_3 增效技术，支撑奶牛养殖业绿色发展。案例 1-3 属于“自上而下”的研究思路，结合了自下而上研究提供的技术参数、调研数据定量设计国家、流域、县域和全产业链的农业绿色发展系统解决方案。案例 4 属于“自下而上”的研究思路，落实了自上而下研究中提出的政策、技术路径，研发畜牧业减排关键技术，切实助力农业农村生态生活环境改善，二者相互支撑、相互促进。

参考文献 References

[1] 韩长赋. 大力推进农业绿色发展[N]. 人民日报, 2017-05-09
HAN C F. Promote agricultural green development vigorously[N]. People’ Daily, 2017-05-09

[2] MA L, BAI Z H, MA W Q, et al. Exploring future food provision scenarios for China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(3): 1385–1393

[3] ADRIAANSE A. Environmental Policy Performance Indicators: A study on the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands[M]. Uitgeverij: The Hague, 1993

[4] BAI Z H, MA W Q, MA L, et al. China’s livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. Science Advances, 2018, 4(7): eaar8534

[5] 马文奇, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展理论框架和实现路径的思考[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200238
MA W Q, MA L, ZHANG J J, et al. Theoretical framework and realization pathway of agricultural green development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200238

[6] HIERONYMI A. Understanding systems science: A visual and integrative approach[J]. Systems Research and Behavioral Science, 2013, 30(5): 580–595

[7] BERTALANFFY L V. General System Theory: Foundations, Development, Applications[M]. New York: Georges Braziller, 1969

[8] 胡鞍钢, 周绍杰. 绿色发展: 功能界定、机制分析与发展战略[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 14–20
HU A G, ZHOU S J. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1): 14–20

[9] The United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development[EB/OL]. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11125/unep_swio_sm1_inf7_sdg.pdf?sequence=1.2015-10-21/2020-03-31

[10] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. A safe operating space for humanity[J]. Nature, 2009, 461(7263): 472–475

[11] MAYORGA E, SEITZINGER S P, HARRISON J A, et al. Global Nutrient Export from WaterSheds 2 (NEWS 2): Model development and implementation[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(7): 837–853

[12] STROKAL M, KROEZE C, WANG M R, et al. The MARINA model (Model to Assess River Inputs of Nutrients to seAs): Model description and results for China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562: 869–888

[13] JANSE J H. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches[D]. Wageningen: Wagningen University, 2005

[14] KLIMONT Z, BRINK C. Modeling of Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Agricultural Sources in Europe[R].Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2004

[15] HAVLÍK P, SCHNEIDER U A, SCHMID E, et al. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 5690–5702

[16] MA L, MA W Q, VELTHOF G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1279–1289

[17] 马林, 马文奇, 张福锁, 等. 中国食物链养分流动与管理研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1494–1500
MA L, MA W Q, ZHANG F S, et al. Nutrient flow and management in the food chain in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1494–1500

[18] ZHAO Z Q, BAI Z H, WEI S, et al. Modeling farm nutrient flows in the North China Plain to reduce nutrient losses[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 108(2): 231–244

[19] WEI S, BAI Z H, QIN W, et al. Environmental, economic and social analysis of peri-urban pig production[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 596–607

[20] MA L, VELTHOF G L, WANG F H, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005[J]. Science of the

Total Environment, 2012, 434: 51–61

[21] BAI Z H, LU J, ZHAO H, et al. Designing vulnerable zones of nitrogen and phosphorus transfers to control water pollution in China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(16): 8987–8988

[22] WANG M R, MA L, STROKAL M, et al. Hotspots for nitrogen and phosphorus losses from food production in China: A county-scale analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 5782–5791

[23] 马林, 卢洁, 赵浩, 等. 中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2387–2391
MA L, LU J, ZHAO H, et al. Nitrate vulnerable zones and strategies of non-point pollution mitigation in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11): 2387–2391

[24] BAI Z H, WINIWARTER W, KLIMONT Z, et al. Further improvement of air quality in China needs clear ammonia mitigation target[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(18): 10542–10544

[25] BAI Z H, JIN S Q, WU Y, et al. China's pig relocation in balance[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(10): 888

[26] ZHAO Z Q, QIN W, BAI Z H, et al. Agricultural nitrogen and phosphorus emissions to water and their mitigation options in the Haihe Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 262–272

[27] HOU Y, VELTHOF G L, OENEMA O. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1293–1312

[28] BAI Z H, LEE M R F, MA L, et al. Global environmental costs of China's thirst for milk[J]. Global Change Biology, 2018, 24(5): 2198–2211

[29] STROKAL M, MA L, BAI Z H, et al. Alarming nutrient pollution of Chinese rivers as a result of agricultural transitions[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(2): 024014

[30] SCHEFFER M, JEPPESEN E. Regime shifts in shallow lakes[J]. Ecosystems, 2007, 10(1): 1–3

[31] MCCRACKIN M L, HARRISON J A, COMPTON J E. Factors influencing export of dissolved inorganic nitrogen by major rivers: A new, seasonal, spatially explicit, global model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(3): 269–285

[32] SEITZINGER S P, MAYORGA E, BOUWMAN A F, et al. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(4): GB0A08

[33] WANG M R, KROEZE C, STROKAL M, et al. Global change can make coastal eutrophication control in China more difficult[J]. Earth's Future, 2020, 8(4): e2019EF001280

[34] CHEN X J, STROKAL M, KROEZE C, et al. Seasonality in river export of nitrogen: a modelling approach for the Yangtze River[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 1282–1292

[35] YANG J, STROKAL M, KROEZE C, et al. Nutrient losses to surface waters in Hai He basin: A case study of Guanting reservoir and Baiyangdian lake[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 62–75

[36] JANSSEN A B G, DE JAGER V C L, JANSE J H, et al. Spatial identification of critical nutrient loads of large shallow lakes: Implications for Lake Taihu (China)[J]. Water Research, 2017, 119: 276–287

[37] KONG X, HE Q, YANG B, et al. Hydrological regulation drives regime shifts: evidence from paleolimnology and ecosystem modeling of a large shallow Chinese lake[J]. Global Change Biology, 2017, 23(2): 737–754

[38] LI X L, JANSSEN A B G, DE KLEIN J J M, et al. Modeling nutrients in Lake Dianchi (China) and its watershed[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 48–59

[39] WANG M R, STROKAL M, BUREK P, et al. Excess nutrient loads to Lake Taihu: Opportunities for nutrient reduction[J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 865–873

[40] AMANN M, BERTOK I, BORKEN-KLEEFELD J, et al. Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1489–1501

[41] AMANN M, BERTOK I, BORKEN J, et al. GAINS Asia: A Tool to Combat Air Pollution and Climate Change Simultaneously. Methodology[M]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2008

[42] KIESEWETTER G, SCHOEPP W, HEYES C, et al. Modelling PM2.5 impact indicators in Europe: Health effects and legal compliance[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 74: 201–211

[43] HAVLÍK P, VALIN H, MOSNIER A, et al. GLOBIOM Documentation[R]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2018

[44] HAVLÍK P, VALIN H, HERRERO M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(10): 3709–3714

[45] KRISTENSEN P. The DPSIR Framework, workshop on a comprehensive/detailed assessment of the vulnerability of water resources to environmental change in Africa using river basin approach[R]. Nairobi: UNEP Headquarters, 2004

[46] VAN NOORDWIJK M, DUGUMA L A, DEWI S, et al. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: reinventing agroforestry?[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018, 34: 33–42

[47] LUCAS P L, WILTING H C, HOF A F, et al. Allocating planetary boundaries to large economies: Distributional consequences of alternative perspectives on distributive fairness[J]. Global Environmental Change, 2020, 60: 102017

[48] 张建杰, 崔石磊, 马林, 等. 中国农业绿色发展指标体系的构建与例证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200069
ZHANG J J, CUI S L, MA L, et al. Construction of a green development index system for agriculture in China and examples[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/ j.cnki.cjea.200069

[49] BAI Z H, MA L, JIN S Q, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(24): 13409–13418

[50] BAI Z H, LI X X, LU J, et al. Livestock housing and manure storage need to be improved in China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(15): 8212–8214

[51] 马林, 柏兆海, 王选, 等. 中国农牧系统养分管理研究的意义与重点[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 406–416
MA L, BAI Z H, WANG X, et al. Significance and research priority of nutrient management in soil-crop-animal production system in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 406–416

[52] LI A, STROKAL M, BAI Z H, et al. How to avoid coastal eutrophication-a back-casting study for the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2019, 692: 676–690

[53] LU J, BAI Z H, CHADWICK D, et al. Mitigation options to reduce nitrogen losses to water from crop and livestock production in China[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2019, 40: 95–107

[54] ZHANG N N, BAI Z H, LUO J F, et al. Nutrient losses and greenhouse gas emissions from dairy production in China: Lessons learned from historical changes and regional differences[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 1095–1105

[55] 张楠楠. 中国奶牛养殖业氨排放特征及减排措施[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019
ZHANG N N. Ammonia emission and mitigation from dairy production system in China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019

[56] ZHANG N N, BAI Z H, WINIWARTER W, et al. Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(20): 11840–11848