

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180668

马林, 马文奇, 张福锁, 柏兆海, 侯勇. 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, BAI Z H, HOU Y. Nutrient flow and management in the food chain in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1494–1500

中国食物链养分流动与管理研究*

马林¹, 马文奇², 张福锁³, 柏兆海¹, 侯勇³

(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/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 河北农业大学资源与环境学院 保定 071000; 3. 中国农业大学资源与环境学院/教育部植物-土壤相互作用重点实验室 北京 100193)

摘要: 为寻求食物生产与消费系统中粮食安全、资源高效和环境友好的协调和农业绿色发展途径, 研究团队构建了“土壤-作物-畜牧-家庭-环境”(简称食物链系统)研究体系, 运用物质流动和养分代谢理论方法创立了养分流动模型, 深入研究了该系统养分流动规律及调控机理, 经过近十多年系统研究, 获得结果如下: (1)提出食物链养分流动金字塔概念模型, 创建了食物链系统养分流动模型。通过分析养分在“土壤-作物-畜牧-家庭-环境”系统的行为特征, 发现养分从“土壤-作物-畜牧”向“家庭”的流动呈金字塔状, 其形状决定了系统生产力、养分效率和环境效应。处于金字塔顶端的“家庭”消费驱动了系统养分流动, 决定了养分效率; “土壤-作物-畜牧”位于金字塔底层, 支撑顶层“家庭”消费, 决定了系统养分通量, 也是养分调控的核心。在此基础上, 开发了食物系统养分流动模型——UFER, 构建了参数体系, 实现了国家和区域尺度食物链氮磷流量、利用效率和环境排放的定量分析。(2)揭示了食物链系统氮磷养分流量、利用效率及其资源环境代价的时空变化特征。阐明了我国土壤-作物系统、农牧系统和整个食物链系统氮磷养分流量、养分效率和环境排放的时空分异特征; 明确了土壤作物、畜牧和家庭各子系统对整个食物链养分环境排放的贡献; 提出了食物氮(磷)代价概念, 发现我国食物生产和消费的资源环境代价增速很快, 已远远超过发达国家。(3)明确了食物链系统养分流动的驱动因素, 阐明了提高养分效率和降低环境排放的调控机理。明确了决定食物链系统养分效率的关键环节, 发现城镇化、食物结构变化和畜牧业发展是食物链养分流动加速的主要驱动因子; 阐明了增加粮食和饲料进口、优化膳食结构和改善农牧业养分管理技术等对食物链系统优化的效应及作用机制。发现农牧结合和粪尿资源化利用是大幅度减少化肥需求和环境排放的关键途径, 是实现农业绿色发展和食物链养分优化管理的重要突破口。

关键词: 农业绿色发展; 养分资源管理; NUFER模型; 食物链系统; 氮循环; 磷循环; 面源污染

中图分类号: S1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)10-1494-07

Nutrient flow and management in the food chain in China*

MA Lin¹, MA Wenqi², ZHANG Fusuo³, BAI Zhaohai¹, HOU Yong³

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences /

* 国家自然科学基金面上项目(31572210)、河北省现代农业产业技术体系奶牛产业创新团队项目(HBCT2018120206)、中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-5)、中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-001)、河北省杰出青年基金项目(D2017503023)和中国科学院“百人计划”项目资助

马林, 主要研究方向为农业生态学与养分资源管理。E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2018-07-18 接受日期: 2018-07-28

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31572210), the Dairy Industry Innovation Team of Modern Agricultural Technology System of Hebei Province (HBCT2018120206), the Key Project of Chinese Academy of Sciences (ZDRW-ZS-2016-5), the Science and Technology Service Network Initiative of Chinese Academy of Sciences (KFJ-STZ-ZDTP-001), the Science Fund for Distinguished Young Scholars of Hebei Province (D2017503023) and the 100-Talent Project of Chinese Academy of Sciences.

Corresponding author, MA Lin, E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

Received Jul. 18, 2018; accepted Jul. 28, 2018

Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University / Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to explore food security, high resources use efficiency and environmental friendly pathway for the coordinated and green developed agriculture in the food production and food consumption system, we constructed the “soil-crop-livestock-family-environment” (“food chain system” in short) research system. Using the material flow and metabolism theories, a nutrient flow model had been developed, and was used to evaluate the nutrient flow and control mechanisms of food chain system. After more than ten years systematic studies, the research team obtained the following main results: (1) Develop the pyramid framework for nutrient flow of the food chain, and the food chain nutrient flow model. By analyzing nutrients behavior in the “Soil-Crop-Livestock-Household-Environment” system, we found that the nutrient flow from “Soil-Crop-Livestock” to “Household” sector was in the shape of pyramid. The shape of pyramid determined the productivity, nutrient efficiency and environmental effects of the food chain system. The “Household” consumption at the top of pyramid was the driving force of nutrient flow in the whole food system, meanwhile, determined the nutrient efficiency of whole system. “Soil-Crop-Livestock” was located at the bottom of pyramid, supporting the “Household” consumption sector at the top. It determined the total nutrients flux and acted as the core of nutrients management. Based on this, the NUFER (NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use) was developed, the parameter set was build and quantification of nitrogen (N) and phosphorus (P) flows, use efficiencies and environmental emissions at the national and regional scales had been done. (2) Spatial and temporal analysis of N and P flows, use efficiencies and environmental costs in the food chain system. We quantified the spatial and temporal characteristics of N and P flows, efficiencies and environmental emissions in crop and animal production sector, and the whole food chain in China. We identified the contribution of nutrient losses form soil-crop system, livestock and human consumption. We also developed the concept of food N (P) cost and found that the resource and environmental costs of food production and consumption in China had increased rapidly, far exceeding the developed countries. (3) Identifying the driving forces of nutrient flow in the food chain and the options to improve nutrient efficiency and reduce environmental losses. The key sector that determined nutrient efficiency had been identified. Urbanization, diet changes and development of livestock production were the main driving forces of the accelerated nutrient flow in food chain system. We also explained the effects and mechanisms of increasing imports of food and feed, optimizing dietary and improving the nutrient management in agriculture production on improving food chain systems. We also found that the coupling of crop and livestock production, improving utilization of livestock manure was the key to reducing chemical fertilizer use and environmental losses, and was also the key for achieving green development of agriculture and sustainable food systems.

Keywords: Green development of agriculture; Nutrient management; NUFER model; Food chine system; Nitrogen cycle; Phosphorus cycle; Non-point source pollution

农业的本质就是人类不断地“耕作地球”。在人类食物需求的拉动下,高投入高产出的集约化农业和畜牧业为全球特别是我国粮食安全和国民营养改善做出了巨大的历史性贡献,但也带来严重的资源环境问题。受人口增加、经济发展、城镇化、膳食结构改善等驱动,农牧业集约化程度快速提高,化肥过量施用、农牧分离和畜禽粪尿循环率下降等越来越严重,由此带来的食物生产与环境保护的矛盾日益加剧^[1-5]。因此,定量粮食安全、资源利用和环境影响的关系并阐明调控机理成为重要科学命题^[6-7]。近年来,探索农业和食物系统可持续发展和农业绿色发展之路,正成为联合国、各国政要和科学家关注的重要命题^[8]。营养物质即养分作为比较容易定量的载体,其在土壤-作物-畜牧-家庭-环境系统(即食物链系统)的流量和去向,不仅直接影响农业和畜牧业系统的生产力,也关系到农业资源的利用效率和环

境质量,还关乎到人体健康。因此,定量食物链体系养分行为就成为探求农业绿色发展和食物系统可持续发展策略的重要突破口。

研究团队近年来对食物链和农牧系统养分管理进行了系统的研究,主要学术发现包括以下几方面:(1)以食物链系统为研究对象,以养分为定量载体,利用物质流和养分代谢等理论和方法,从新的解析视角构建了食物链和农牧系统研究体系,创立了“土壤-作物-畜牧-家庭-环境”食物链养分流动模型,开发了新的研究工具;(2)进一步揭示了食物链系统氮磷养分流量、利用效率和资源环境代价的时空特征,明确了作物、畜牧和家庭子系统对食物链养分环境排放的贡献;(3)在协同粮食安全、资源高效和环境可持续的前提下,通过模型和情景分析等手段,系统阐明了食物链养分流动的驱动因素及提高养分效率和降低环境排放的调控机理(图 1)。

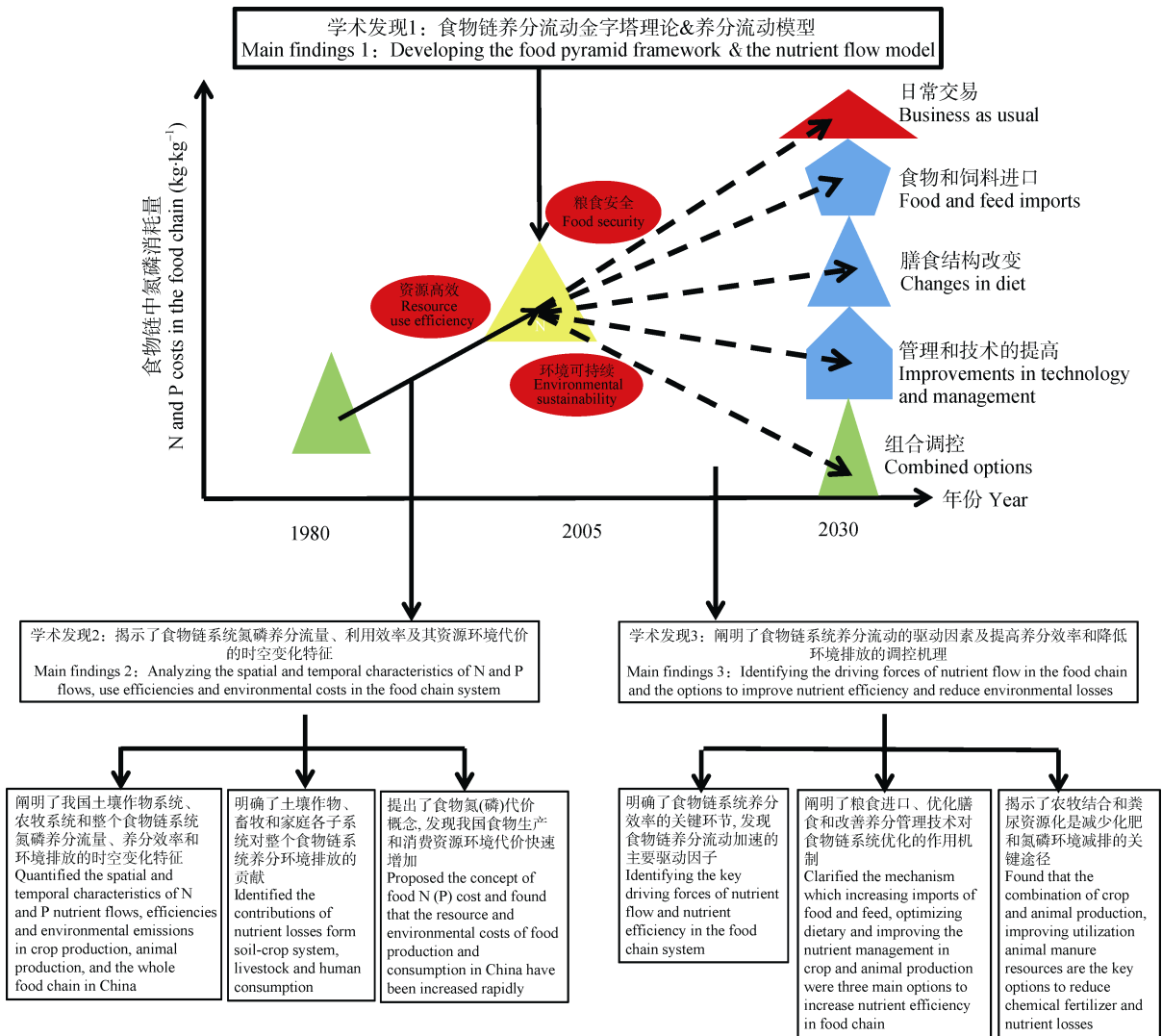


图 1 食物链和农牧系统养分管理主要学术发现
Fig. 1 The main scientific findings of nutrient management in food chain

1 提出了食物链养分流动金字塔理论, 构建了食物链和农牧系统养分流动模型

针对当今国际上食物生产和消费系统养分流动研究的空白, 我们通过分析养分在“土壤-作物-畜牧-家庭-环境”系统的行为特征, 发现养分从“土壤-作物-畜牧”向“家庭”的流动呈金字塔状, 其形状决定了系统的生产力、养分效率和环境效应, 提出了食物链养分流动金字塔理论。发现处于金字塔顶端的“家庭”消费驱动了系统的养分流动, 决定了养分效率; “土壤-作物-畜牧”位于食物养分金字塔底层, 支撑顶层“家庭”消费, 决定了系统养分通量, 也是养分调控的核心^[9]。此外, 我们建立了一个覆盖全国主要区域(20 多家科研院校参加)的食物链和农牧系统养分管理研究协作网, 开展了多学科交叉联网研究。

经过十多年的逐步发展和完善, 构建了食物链系统养分流动模型(NUFER: NUtrient flows in Food chains,

Environment and Resources use), 提出了食物链养分评价指标体系。模型第 1 版(CNFC)已获国家著作权登记。模型发展版相继发表在国际学术期刊《Journal of Environmental Quality》和《Environmental Science & Technology》^[9-10]。模型边界为食物链系统即食物生产与消费系统, 包括作物生产子系统、畜牧生产子系统、食品加工子系统和家庭消费子系统(图 2)。模型实现了国家和区域尺度食物链氮磷流量、利用效率和环境排放的定量分析, 为协调粮食安全、资源利用和区域环境的关系, 实现农业和食物系统可持续和绿色发展提供了新思路和新方法。

2 揭示了食物链系统氮磷养分流量、利用效率及其资源环境代价的时空变化特征

2.1 阐明了我国土壤-作物系统、农牧系统和整个食物链系统氮磷养分流动、养分效率和环境排放的时空变化特征

20 世纪末我国农牧业系统开始向集约化转型,

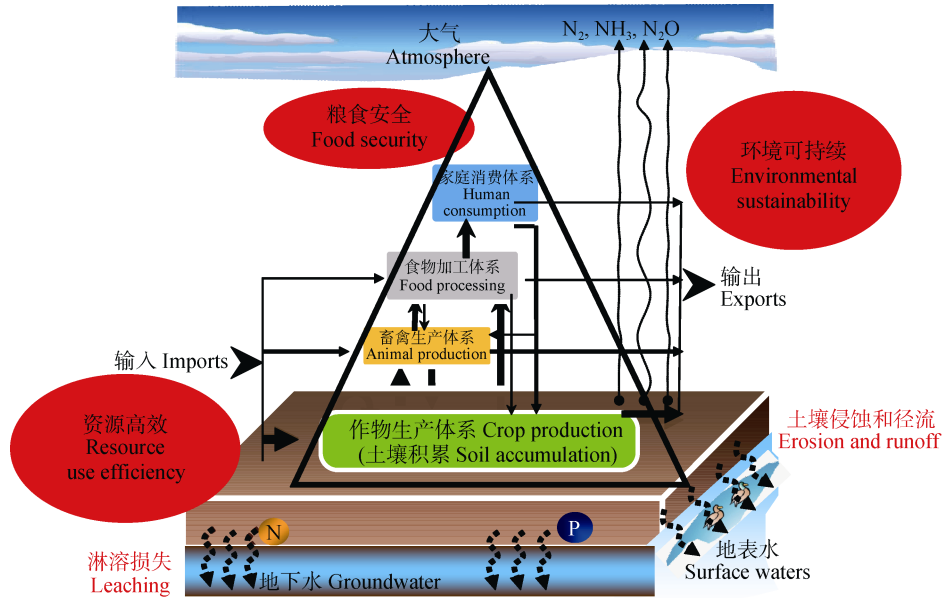


图 2 “土壤-作物-畜牧-家庭-环境”食物链养分流动模型示意图^[9]

Fig. 2 The framework of nutrient flows in food pyramid/food chain (soil-crop-animal-household-environment systems)

带来了化肥用量快速增长、集约化畜牧业飞速发展、畜禽粪尿管理滞后等问题, 而其对土壤、水体和大气环境的影响重视不够, 更缺乏养分效率、养分流动及其环境排放的定量研究。我们通过模型分析发现, 我国土壤-作物系统氮利用效率从 1980 年的 32% 降低到 2005 年的 26%, 而畜禽养殖系统的氮利用效率增加了 1 倍, 整个食物链系统氮利用效率从 16% 大幅度降低到 9%。1980—2005 年期间, 土壤-作物系统、农牧系统和食物链系统磷利用效率的变化趋势与氮基本一致, 分别降低 61%、增加 6% 和降低了 63%。食物链系统的总氮磷损失都呈快速增加趋势, 1980 年土壤-作物系统的氮损失为 940 万 t, 而 2005 年则达到 2 700 万 t, 增加了近 2 倍; 畜禽养殖系统氮损失增加了近 4 倍; 食物链系统氮损失约扩大了 2 倍。磷损失历史变化规律与氮基本一致, 但是显著区别于氮损失的是 1980 年畜禽养殖体系基本不存在磷损失, 而 2005 年损失量则达 210 万 t (折纯磷, 下同)。该结果揭示了我国食物链系统氮磷养分利用效率较低且持续下降、氮磷损失高且持续增加的历史演变规律, 加深了对食物生产与环境效应之间定量关系的理解^[11-13]。

同时利用模型揭示了区域尺度食物链系统氮磷利用效率和损失的空间分异特征。研究表明氮磷高环境排放区域集中在华北平原、长江三角洲和珠江三角洲等都市圈及其周边主要农牧业生产区, 其主要原因是农田化肥过量施用和农牧系统分离的生产体系导致的大量粪尿养分未被循环利用。该研究的

启示是都市化的快速发展正在改变着农业和畜牧业生产系统的氮磷养分流动^[11,14]。

2.2 明确了土壤-作物、畜牧和家庭各子系统对整个食物链系统养分环境排放的贡献

通过模型进一步明确了食物链各子系统对氮磷环境排放的贡献, 发现 2005 年土壤作物系统是食物链氮气体损失的第 1 大排放源, 占总损失的 68%; 而畜禽养殖体系为第 2 大排放源, 占总损失的 27%。对于氮的水体损失而言, 土壤-作物系统贡献率下降到 56%, 但仍为最大排放源; 而畜禽养殖的贡献率增加到 33%。磷水体损失规律与氮损失规律相反, 畜禽养殖占总磷水体损失的 68%, 为最大排放源; 其次为土壤-作物体系, 占 15%; 其他如家庭消费和食品加工也占较大比例^[9,15]。该结果可用于识别食物链氮磷损失的关键环节, 为可持续食物链系统和农业绿色发展的优化设计提供科学依据^[9,15]。

2.3 提出了食物链氮(磷)代价的概念, 发现我国食物生产和消费的资源环境代价增速很快

我们首次提出了食物氮(磷)代价, 其定义为人类消费 1 kg 食物氮(磷), 在农业和畜牧业生产系统需要投入的氮(磷)数量, 该指标可以作为综合评价食物链氮磷流动的指标。分析表明, 1980—2005 年我国食物氮代价从 6 kg·kg⁻¹ 增加到 11 kg·kg⁻¹, 食物磷代价从 5 kg·kg⁻¹ 增加到 13 kg·kg⁻¹, 同时我国食物氮磷代价也显著高于国际发达国家水平^[9,11,16]。在食物消费拉动下, 2005 年人均化肥、饲料、食物

氮素消费量分别为 1980 年的 2.1 倍、2.2 倍和 1.3 倍,这是导致我国食物氮代价增加的主要原因。该结果对调控我国食物链系统养分流动,降低单位食品生产和消费的资源代价和生态足迹具有重要意义^[9,11,16]。

3 明确了食物链系统养分流动的驱动因素,阐明了提高养分效率和降低环境排放的调控机理

3.1 明确了决定食物链系统养分效率的关键环节,发现城镇化、食物结构变化和畜牧业发展是食物链养分流动加速的主要驱动因子

我们通过敏感性分析明确了改善食物链系统养分效率的关键环节。针对三大作物生产和消费链条的分析表明,不同作物体系氮磷养分利用效率的关键调控环节存在较大差异。其中,玉米生产环节氮肥利用效率(RE)、玉米口粮比例(GUP)和畜禽养殖环节氮效率(ANU)每增加 5%,生产链条的氮利用消费将提高 20%~25%,因此是调控玉米氮利用效率的关键环节。但是对于小麦和水稻而言,提高肥料氮磷利用效率(RE+FRE)以及增加食品加工环节效率(PND 和 PPD)是调控氮磷效率的关键环节。氮磷养分利用效率调控的关键环节识别可为食物链氮磷养分利用增效提供重要依据^[17-18]。

基于 NUFER 模型的定量分析,明确了我国食物链氮磷养分投入与损失的历史变化和主要驱动因子。结果表明人口增长和人均食品消费量增加是食物链养分流动和氮磷损失加速的主要驱动力^[19];进一步针对城镇人口食品消费的驱动因子分析表明,城镇人口增加贡献了城镇食品消费增长的 62%~72%,城镇人口食物结构变化(即动物性食品消费增加)的贡献率为 20%~30%^[19]。该结果进一步验证了都市圈是优化食物链养分管理的关键环节之一,也说明膳食结构改善对优化食物链养分流动具有较大潜力。

3.2 发现土壤-作物系统养分管理、畜禽粪尿资源化利用和农牧结合是大幅度减少化肥需求和氮磷环境排放的关键途径

我们定量了中国在 2030 年人口达到高峰时,膳食结构改变对口粮和饲料粮需求的影响,证明了土壤-作物系统综合管理技术实现 80%,可以满足三大粮食作物的需求,同时减少养分环境排放大约 30%和提高养分利用效率 30%~50%。以生猪生产为例,定量了畜禽粪尿资源化利用和农牧结合程度对系统

养分利用效率和去向的影响。情景分析结果表明,如果不做任何改变,2030 年生猪养殖体系氮和磷环境排放较 2010 年将分别增加 25%和 55%;通过改善粪尿管理、生猪种群管理以及优化饲料结构和精准喂养,2030 年我国生猪养殖的总氮和总磷损失可分别降低 64%和 95%^[13]。说明土壤-作物系统养分管理、畜禽粪尿资源化利用和农牧结合是大幅度减少化肥需求和氮磷环境排放的关键途径。

3.3 阐明了增加粮食和饲料进口、优化膳食结构和改善农牧业养分管理技术等对食物链系统优化的效应及作用机制,为实现优化食物链养分管理找到了突破口

利用 NUFER 模型开展情景分析,阐明了增加粮食和饲料进口、优化膳食结构和改善农田和畜牧业养分管理技术等策略对食物链养分需求、流量、去向和效率的影响。结果表明:如果不转变当前的农牧分离生产方式和食物消费模式,与 2010 年相比,2030 年食物链氮和磷养分环境排放将分别增加 44%和 73%,食物链养分利用效率将持续降低;而通过农牧结合和养分资源综合管理技术,氮肥和磷肥需求量可减少到 2 500 万 t 和 470 万 t,氮磷环境排放大幅度降低,为实现优化食物链养分管理找到了突破口^[10]。

4 结论和展望

综上所述,经过十多年的探索,形成了系统性的研究体系和一系列的研究成果。主要科学发现包括:(1)提出了食物链养分流动金字塔理论,构建了食物链系统养分流动模型(NUFER),将养分管理研究从农田扩展到区域和食物链系统,为区域环境研究和食物系统可持续发展提供了新的理论框架与研究方法。(2)定量揭示了氮磷在我国食物链和农牧系统养分流动特征及其对环境污染的贡献,加深了对养分行为特征及其资源环境效应的科学认识,为农业和食物系统可持续和绿色发展找到了突破口。

(3)阐明了“土壤-作物-畜牧-家庭-环境”系统养分流动的驱动因素及其作用机制,阐明了提高养分效率和降低环境排放的调控机理。发现农牧结合和粪尿养分资源化利用是大幅度减少化肥需求和氮磷环境排放的关键途径,为我国农业绿色发展、面源污染防治、化肥零增长和畜禽粪尿资源化利用等国家重大行动提供了理论依据。

目前,系列研究成果也在养分资源管理研究领域得到应用:(1)NUFER 模型作为联合国可持续农业

和食物系统项目的定量研究方法之一, 其国际应用文章“Nitrogen flows in the food production chain of Hungary over the period 1961–2010”发表在《Nutrient Cycling in Agroecosystems》^[20]。(2)NUFER 模型的一个主要应用结果发表在国际顶尖学术期刊《Nature》, 定量分析了中国实现三大粮食作物高产高效技术的资源环境效益^[21]。(3)NUFER 模型与全球著名的水体养分富营养化模型 Global NEWS Model (Global Nutrient Export from WaterSheds)连接, 并用于农牧系统养分从陆地向水体和海洋运移的分析, 揭示了我国农牧分离和畜禽粪尿管理不当对污染源污染和海洋富营养化的影响^[22–24]。(4)建立全国协作网, 山西省农业科学院、吉林农业大学、西南大学、西南林业大学等单位研究人员运用 NUFER 模型对我国主要区域食物链养分流动特征进行分析, 文章发表在《中国农业科学》、《中国生态农业学报》、《农业工程学报》等刊物^[25–38]。

未来几十年, 我国农业发展将进入全新时期, 新时代呼唤高质量的绿色农业转型^[39]。绿色高质农业不是简单的绿色产品, 也不仅仅是绿色生产过程, 而是全产业链和食物链提质增效的体现。围绕国家需求, 立足国际前沿, 也为食物链养分管理研究提出了新的挑战, 未来应针对以下几方面进行重点研究: (1)食物链养分管理与农业绿色发展内涵、指标体系的关系; (2)食物链养分管理模型与区域农业绿色发展限制因素分析和评价; (3)“绿色生产资料-绿色生产过程-绿色农产品-绿色市场-绿色消费”全食物链的产业化技术与模式设计; (4)国家和区域全面实现农业绿色发展的影响因素和驱动力解析及其政策设计。

参考文献 References

- [1] 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
- [2] 曹玉博, 邢晓旭, 柏兆海, 等. 农牧系统氮挥发减排技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 566–580
CAO Y B, XING X X, BAI Z H, et al. Review on ammonia emission mitigation techniques of crop-livestock production system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 566–580
- [3] 郭勇庆, 屠焰, 张乃锋, 等. 中国饲料磷推荐水平及磷酸盐应用现状和优化分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 581–592
GUO Y Q, TU Y, ZHANG N F, et al. Current situation and optimization strategy of phosphorus recommendation level and phosphate application of feed in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 581–592
- [4] 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
- [5] MA L, ZHANG W F, MA W Q, et al. An analysis of developments and challenges in nutrient management in China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 951–961
- [6] WANG M R, KROEZE C, STOKAL M, et al. Reactive nitrogen losses from China's food system for the shared socioeconomic pathways (SSPs)[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 605/606: 884–893
- [7] GUO M C, CHEN X H, BAI Z H, et al. How China's nitrogen footprint of food has changed from 1961 to 2010[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(10): 104006
- [8] WANG M R, MA L, STOKAL M, et al. Exploring nutrient management options to increase nitrogen and phosphorus use efficiencies in food production of China[J]. *Agricultural Systems*, 2018, 163: 58–72
- [9] 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
- [10] MA L, WANG F H, ZHANG W F, et al. Environmental assessment of management options for nutrient flows in the food chain in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7260–7268
- [11] 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
- [12] BAI Z H, MA L, MA W Q, et al. Changes in phosphorus use and losses in the food chain of China during 1950–2010 and forecasts for 2030[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(3): 361–372
- [13] BAI Z H, MA L, QIN W, et al. Changes in pig production in China and their effects on nitrogen and phosphorus use and losses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12742–12749
- [14] MA L, GUO J H, VELTHOF G L, et al. Impacts of Urban expansion on nitrogen and phosphorus flows in the food system of Beijing from 1978 to 2008[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 192–204
- [15] MA L, VELTHOF G L, KROEZE C, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from food production in China[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 9(10): 82–89
- [16] MA L, WEI Q, GARNETT T, et al. Review on drivers, trends and emerging issues of the food wastage in China[J]. *Frontiers Agricultural Science and Engineering*, 2015, 2(2): 159–167
- [17] MA W Q, LI J H, MA L, et al. Nitrogen flow and use efficiency in production and utilization of wheat, rice, and maize in China[J]. *Agricultural Systems*, 2008, 99(1): 53–63
- [18] MA W Q, MA L, LI J H, et al. Phosphorus flows and use efficiencies in production and consumption of wheat, rice, and maize in China[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 814–821

- [19] HOU Y, MA L, GAO Z L, et al. The driving forces for nitrogen and phosphorus flows in the food chain of China, 1980 to 2010[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 962–971
- [20] HOU Y, MA L, SÁRDI K, et al. Nitrogen flows in the food production chain of Hungary over the period 1961–2010[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(3): 335–346
- [21] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489
- [22] 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
- [23] 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
- [24] STROKAL M, KROEZE C, WANG M R, et al. Reducing future river export of nutrients to coastal waters of China in optimistic scenarios[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 517–528
- [25] 魏莎, 柏兆海, 吴迪梅, 等. 都市圈“土壤-饲料-动物”系统养分流动与环境效应——以北京市为例[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 430–441
WEI S, BAI Z H, WU D M, et al. Nutrient flow and environmental effects of “Soil-Feed-Livestock” system in metropolis: A case study in Beijing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 430–441
- [26] 马怡斐, 柏兆海, 马林, 等. 栾城城郊型农牧系统养分流动与环境排放时空特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 493–506
MA Y F, BAI Z H, MA L, et al. Temporal and spatial changes of nutrient flows and losses in the peri-urban crop-livestock system in Luancheng[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 493–506
- [27] 魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国苜蓿、黑麦草和燕麦草产量差及影响因素[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 507–522
WEI Z B, BAI Z H, MA L, et al. Yield gap of alfalfa, ryegrass and oat grass and their influence factors in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 507–522
- [28] 魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国天然草地氮磷流动空间特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 523–534
WEI Z B, BAI Z H, MA L, et al. Spatial characteristics of nitrogen and phosphorus flow in natural grassland of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 523–534
- [29] 魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国栽培草地氮磷流动空间特征[J]. *中国农业科学*, 2017, 51(3): 535–555
WEI Z B, BAI Z H, MA L, et al. Spatial characteristics of nitrogen and phosphorus flow in cultivated grassland of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 51(3): 535–555
- [30] 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
- [31] 魏莎, 柏兆海, 吴迪梅, 等. 北京“土壤-饲料-奶牛”系统氮磷流动及环境损失时空特征[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(3): 316–327
WEI S, BAI Z H, WU D M, et al. Temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus cycling and environmental losses in the “soil-feed-dairy” production system in Beijing[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(3): 316–327
- [32] 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
- [33] 魏莎, 马林, 江荣凤, 等. 基于 NUFER 模型的生猪养殖氮磷利用效率及排放时空变化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 190–196
WEI S, MA L, JIANG R F, et al. Use efficiency and emission spatial-temporal variability of nitrogen and phosphorus for pig production in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(13): 190–196
- [34] BAI Z H, MA L, OENEMA O, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 990–1001
- [35] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 等. 东北地区农牧系统氮、磷养分流动特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 417–429
ZHANG X M, WANG Y, YAN L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus nutrient flow in farming and animal husbandry system in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 417–429
- [36] 张建杰, 郭彩霞, 李莲芬, 等. 农牧交错带农牧系统氮素流动与环境效应——以山西省为例[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 456–467
ZHANG J J, GUO C X, LI L F, et al. Nutrient flow and environmental effects on crop-livestock system in farming-pastoral transition zone — A case study in Shanxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 456–467
- [37] 陈轩敬, 宫雅慧, 谢军, 等. 近 20 年重庆市农牧生产体系氮素流动特征及驱动力分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 468–480
CHEN X J, GONG Y H, XIE J, et al. Nitrogen flow of crop-livestock production system and its driving forces in Chongqing over the past 20 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 468–480
- [38] 李晓琳, 郑毅. 云南省农牧生产系统氮素流动时空变化特征与环境效应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 481–492
LI X L, ZHENG Y. Spatial-temporal distribution of nitrogen nutrient flow and environmental effects of crop-livestock system in Yunnan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 481–492
- [39] 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