◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

氮磷代谢及可持续管理研究综述

王　欣，罗梓梦，胡山鹰

（清华大学 化学工程系，北京　100084）

［摘　要］氮磷代谢是生态系统和人类社会发展最基本的两大代谢过程。近年来，氮磷研究关注度持续增长，相关研究主要关注于氮磷循环过程、足迹分析、环境污染及政策管理等方面，研究方法涉及元素流分析、生命周期评价、足迹分析、生态网络分析、评价指标体系、情景分析和优化等，在全球、国家、区域、城市、行业等空间尺度上全面评估各维度下氮磷代谢及其可持续管理现状。已有研究主要聚焦于农业食品系统、人为因素驱动、环境效应评价及废物资源化管理等维度，存在宏观视角下耦合关系和能源系统领域应用关注度不够等局限。开展未来氮磷代谢及可持续管理领域的展望分析，以促进更全面和有效的氮磷资源管理策略。

［关键词］氮代谢；磷代谢；可持续管理

［中图分类号］TQ126.2；TQ126.3　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）06-0057-07

A review of research on nitrogen and phosphorus metabolism and sustainable management

WANG Xin, LUO Zimeng, HU Shanying

(*Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Nitrogen and phosphorus metabolism are two of the most basic metabolic processes in ecosystems and human social development. In recent years, the attention of nitrogen and phosphorus research continues to grow, and the related research mainly focuses on nitrogen and phosphorus cycling process, footprint analysis, environmental pollution and policy management, etc. The research methodology involves elemental flow analysis, life cycle analysis, footprint analysis, ecological network analysis, evaluation index system, scenario analysis and optimization, etc., and comprehensively evaluates the current status of nitrogen and phosphorus metabolism and its sustainable management under each dimension at the spatial scales of the global, national, regional, urban and industrial levels. The existing studies mainly focus on the dimensions of agri-food system, human-driven factors, environmental effect evaluation and waste resource management, and there are limitations such as insufficient attention to the coupling relationship in the macro perspective and the application in the field of energy system. A prospective analysis of the future nitrogen-phosphorus metabolism and sustainable management is carried out, in order to promote a more comprehensive and effective nitrogen-phosphorus resource management strategy.

Key words: nitrogen metabolism; phosphorus metabolism; sustainable management

氮和磷元素是自然界中不可或缺的元素，对于植物、动物和微生物而言，这两个元素共同维持着它们正常的生理功能和生长发育。氮、磷元素在农业中被广泛应用于生产化肥，促进作物生长，保障粮食安全。全球90%的已开采磷矿石和80%的合成氨氮[1]被用于食品生产，从而维持人类正常的营养供应。在工业领域，氮和磷的化合物被用于生产药品、洗涤剂等，为各行各业提供必要的原料。在能源领域，氮和磷的重要性也逐渐凸显，尤其在绿色氢能和新能源电池等新兴技术产业发展中发挥着重要作用。氮和磷元素的重要性不仅局限于单一领域，而是涵盖了生态、社会经济系统的方方面面，是维护生态-社会系统稳定运行的基石。

然而，随着人口数量快速增加，以及工业化和

［收稿日期］2024-05-15

［作者简介］王　欣(2001-)，女，江西赣州人，博士研究生，研究方向为生态工业循环经济。E-mail：wangxin23@mails.tsinghua.edu.cn

［通信作者］胡山鹰(1965-)，江西上饶人，清华大学化学工程系生态工业研究中心主任，长聘教授，研究方向为生态工业循环经济。E-mail：hxr-dce@tsinghua.edu.cn

城镇化进程深入推进，人类活动的范围和强度不断扩大，人类对氮磷元素的需求不断增长，加大了对氮、磷代谢的人为干预程度，由此带来了不可忽视的问题：一是磷矿的短缺。磷矿石作为一种不可再生的战略性稀缺资源，耗竭危机一直存在[2]。二是氮、磷元素排入环境造成污染。大量的氮、磷元素通过人类活动进入湖泊、河流引起水质恶化，造成富营养化等环境问题[3]，严重影响产业发展以及人类生活环境。此外，未来极端天气[4]、经济危机等潜在冲击和压力也会对氮磷代谢系统的不安全性造成影响，因此，迫切需要探究氮磷元素可持续发展潜力以及落实最合适的政策部署来实现可持续性管理。

笔者从研究方法、空间尺度和研究分析维度3个方面综述了近些年氮磷元素代谢及其可持续管理的研究进展，分析氮磷代谢问题的关注热点和研究领域，阐明现有研究局限，提出未来研究展望，以期为氮磷代谢系统的可持续管理研究提供新思路。

1　氮磷元素代谢及可持续管理研究现状分析

国内外近年来针对氮磷元素代谢及可持续管理开展了大量研究，笔者从4个角度深入探讨该领域的研究现状与最新进展（见表1）。

表1　氮磷元素代谢及可持续管理研究分类

研究方法	空间尺度	关注维度	研究对象
元素流分析	全球尺度	农业食品系统	N、P[5-7]，N[8]，P[9]
	国家尺度	农业食品系统	N、P[10-11]
		人为因素驱动	N[12]，P[13-14]
		环境效应评价	P[15]
	区域/城市尺度	农业食品系统	N、P[16]，N[17]，P[18]
		人为因素驱动	N、P[19]，P[20-21]
	行业尺度	农业食品系统	N、P[22]
		人为因素驱动	N、P[23]
		废物资源化管理	N、P[24]
生命周期评价	全球尺度	人为因素驱动	N[25]
	国家尺度	环境效应评价	N、P[3]，N[26-28]
	区域/城市尺度	人为因素驱动	N[29]
		环境效应评价	N、P[30]
	行业尺度	环境效应评价	N、P[31]
足迹分析	全球尺度	人为因素驱动	P[32]
	国家尺度	农业食品系统	N[33]，P[34]
		人为因素驱动	N[35]
		废物资源化管理	N[36]，P[37]
生态网络分析方法	国家尺度	人为因素驱动	N[38]
	区域/城市尺度	农业食品系统	N[39]
		人为因素驱动	N[40]

首先，通过大数据分析识别氮磷元素代谢问题的关注热点和研究领域，揭示氮磷元素代谢问题的关注度逐渐升高。其次，探讨主流分析方法如元素流分析、生命周期评价、足迹分析及生态网络分析等在揭示氮磷代谢过程及其可持续管理上的关键作用，以及它们在评估资源利用效率、环境影响及可持续性方面的独特贡献。再次，空间尺度上概述从全球到国家、区域、城市乃至行业尺度的氮磷代谢研究进展，展示了全球性核算体系、国家层面的效率评估以及区域和行业针对性解决方案的多样性和深度。最后，从研究分析维度的视角，概述了现有研究在农业食品系统、人为因素驱动、环境效应评价及废物资源化管理等维度的研究现状。通过多维度的综合分析，为分析氮磷元素代谢过程并推动可持续管理策略的创新与发展奠定坚实基础。

1.1　氮磷元素代谢问题的关注热点和研究领域分析

在 Web of Science 数据库中以“氮代谢（Nitrogen metabolism）”、“磷代谢（Phosphorus metabolism）”和“管理策略（Management Strategies）”为主题共同搜索，共计文献3 300余篇，从时间维度上可以发现每年相关发文量在逐年波动上涨。从2000年的24篇增长到2023年396篇，增幅较大，说明氮磷元素代谢研究正在受到广泛关注。

此外，将检索得到的文献的关键词导入词云分析软件，得到关键词词云图，可以看到，目前关于氮磷代谢的研究热点主要包括氮磷循环过程、足迹分析、环境污染（如废水处理等）及政策管理等。

1.2　氮磷元素代谢的主流研究方法分析

在当前物质代谢研究的理论框架内，学术界对于宏观尺度下的氮磷循环主要采用元素流分析、生命周期评价、足迹分析、生态网络分析、评价指标体系、情景分析和优化等研究方法，本部分将以元素流分析、生命周期评价、足迹分析和生态网络分析详细展开介绍（见图1）。

元素流分析方法（SFA）是一种以质量守恒为基本原理，定量评估具有时空边界的经济–环境系统中特定元素或单一物质的存量与流量，从而追踪物质在该系统中流动的源、路径和汇的研究方法[41-42]。使用该方法分析氮磷代谢主要是关注特定年份或一段时间尺度下，氮、磷元素在各个功能子系统的流动情况，确定对氮、磷元素的利用和环境效应等。从全流程视角来看，现有研究更多关注氮磷流股，通过构建氮循环或磷循环模型，识别和量化氮磷流量与存量[15-16]，以及区别自然与人为排放，更好为氮磷元素管理提出建议[12]。当然，

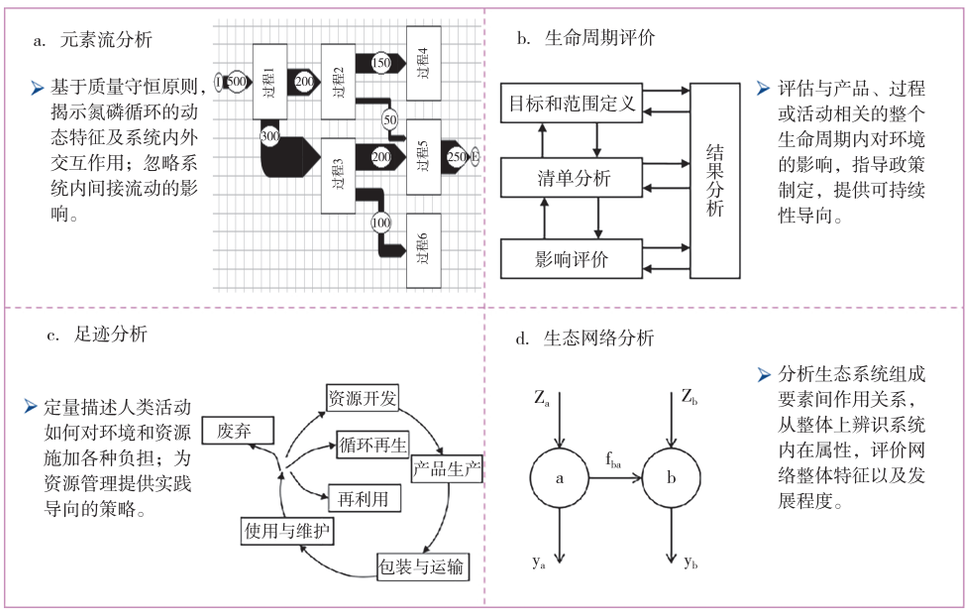

图 1　氮磷元素代谢的主流研究方法框架

SFA 方法也存在着缺点，即会忽略氮磷代谢中网络间接流的影响[40]。由于间接流在系统中通常占据较大的比例[43]，忽略这一部分可能导致对整个系统的分析存在高度误导。

生命周期评价方法（Life Cycle Assessment）是一种通过量化和评估消耗的所有资源以及释放到环境中的所有排放物和废物来评估与产品、过程或活动相关的所有环境影响的方法[44]，主要量化了人类活动中氮磷流动带来的一系列环境问题[45]。目前广泛应用于评估农业生产与消费、废物回收利用等领域的氮磷元素流动造成的环境影响，如 FUCHS 等[31]量化了从施肥农业到水生环境氮和磷损失的命运因素；ZHANG 等[26]关注我国氮肥生产和消费所产生的温室气体量，发现使用先进技术可以减少 20% ~ 63%的氮肥相关排放，有助于向低碳农业迈进和氮元素代谢的可持续发展。

足迹分析方法（Footprint Analysis）是量化生产过程或活动对环境影响的重要方法[46]，可以定量描述人类活动如何对环境和资源施加各种负担。主要关注由于消费端需求引起在生产、运输及消费过程向环境中排放的活性氮、磷总量。食品氮足迹由食品消耗氮足迹和食品生产氮足迹组成。GUO 等[33]将氮足迹工具（N-Calculator）与食物链模型（NUFER）相结合，以分析我国食品的氮足迹，并鼓励与较低的氮足迹相关的饮食，进而减少粮食生产造成的氮损失。JIANG 等[34]考虑作物、牲畜和水生食品以及非食品商品，开发更全面的磷足迹模型，量化了我国磷足迹，并分析了磷足迹变化的驱动因素，为更好地进行磷资源管理和可持续性发展提供依据。

生态网络分析方法（Ecological Network Analysis）是一种分析生态系统组成要素间作用关系、从整体上辨识系统内在属性的系统分析方法[40, 45]，可以定量研究网络内部成员之间的相互作用关系，是识别系统中物质循环的有效手段，可用于剖析系统的复杂性和整体性。该方法包括两部分，即传统生态网络分析（网络环境分析）、基于信息理论的生态网络分析。传统生态网络分析是基于网络各节点流量的分布特征，来评估网络内部的结构分布特征及功能关系，如流量分析、效用分析等。如在自然生态系统中用于描述生态系统组成部分的相对重要性，为环境监管提供信息[47]；在社会经济系统中利用 SFA 获得直接流的基础上进行间接流计算，提供更全面的物质代谢系统视角[40]。但该方法主要是评价网络节点间的相互关系，无法评价网络整体特征以及发展程度。HIRATA 等将信息理论引入生态网络分析，提出了一种方法——基于信息理论的生态网络分析[48]，来量化系统的有效性能（效率）和储备容量（冗余），并采用鲁棒性度量来表示权衡分配，识别系统整体的性能与特征。该方法能够捕捉到系统中直接和间接影响，特别是间接影响，能够为识别重要的影响因素以及调控系统提供更多的抓手。目前主要应用于经济贸易体系[49]、城市管理[50]以及水系统[51]中，也有学者初步尝试将其应用于我国磷代谢[38]和氮磷耦合循环代谢网络[52]中，均得出磷代谢网络韧性正在恶化，未来趋势还

需要重点关注等结论。该方法的优势是能够从系统网络视角评价产业系统抵御干扰与波动的能力，为氮磷元素的可持续发展提供新的观察视角。

综上所述，以上4种针对宏观尺度氮磷循环评估的主流研究方法各具特色，从不同维度为探究氮磷循环的可持续性提供了宝贵的分析工具。因此，对于不同的研究目标和关注维度应灵活选择或综合运用不同的方法，以期实现对氮磷代谢可持续性的准确评估。

1.3　氮磷元素代谢在空间尺度的研究现状分析

国内外学者利用上述各方法在全球尺度、国家尺度、区域/城市尺度、行业尺度等开展了大量相关研究。

全球尺度的氮磷代谢研究主要聚焦于建立全球性的氮磷核算体系。学者们通过开发核算账户表和建模等研究方法，深入分析人类活动对全球氮磷循环的影响。例如，FUJIMORI等[5]基于物质平衡原则提出全球氮、磷元素的核算账户表，运用投入产出表、贸易统计以及各种工业生产统计数据作为输入，计算得到人类生产活动引起的全球层面的氮磷流动代谢。全球贸易[53]和农业系统[54]对全球氮磷代谢的影响也成为研究的焦点。如CHEN等[55]使用全球农业贸易矩阵统计数据和远程耦合的概念框架计算1997—2016年全球221个国家或地区农产品贸易中320种农产品的氮和磷的物理和虚拟流动。这些研究有助于深刻理解人类活动对全球氮磷循环的影响机制，为未来可持续发展提供科学依据。

国家尺度的研究通常聚焦于解决氮、磷资源系统的利用效率以及整体可持续性等关键问题。这些研究侧重于全面评价氮、磷代谢系统各环节对氮磷元素的利用效率，为不同国家或地区的可持续发展提供战略指导[15]。如TANZER等[13]对奥地利的氮磷资源系统进行耦合物质流分析，并关注各种措施的改善效果。也有学者关注于各环节氮磷资源消耗利用等的全面评估[56]、氮磷循环格局[26]和网络韧性变化趋势[38]等研究，有助于深入了解氮、磷资源在各个国家不同环节的流动与变化，为相关的资源规划和政策措施提供有益参考。

将研究尺度进一步下放至更低的空间视角，聚焦区域/城市尺度和行业尺度，现有研究关注于氮磷代谢通量[19-20]、环境污染[3]以及探索不同技术的可行性[23-45]，为解决特定区域和行业面临的氮磷问题提供切实可行的解决方案。例如，LIU等[20]基于流域尺度建立自下而上的流域磷流分析模型，量化了鄱阳湖流域带的磷循环，并探究影响其强度的驱动因素。SEN等[24]考虑4种从农业系统中回收磷的新技术方案的可行性，以实现磷循环经济。

综上所述，现有研究在不同空间尺度下对氮磷代谢及其可持续管理进行了大量的研究，从全球尺度的循环模型与影响评估，到国家尺度的效率与可持续性策略，再到区域/城市及行业层面的精准管理与技术探索，形成了对氮磷资源流动与影响的多层次剖析，为推动氮磷元素可持续管理提供了坚实的理论基础和政策指导。

1.4　氮磷元素代谢重点研究维度分析

近年来关于氮磷代谢的研究日益深入，研究聚焦于农业食品系统、人为因素驱动、环境效应评价及废物资源化管理等维度。

氮和磷元素在农业食品系统中十分重要，从生产端来看，识别农业食品价值链中的氮、磷元素流动情况[57]，分析农业粮食系统的循环利用比例[11]，量化粮食生产的氮磷损失[10, 56]有助于制定针对性的养分管理技术和政策，更好地进行农业食品系统中氮磷元素的可持续管理。例如，MA等[10]对我国食物链的氮、磷利用效率以及产生的氮、磷损失进行综合评价，发现与2005年相比，氮和磷损失将分别增加44%和73%。并通过情景分析提出了一系列政策建议。此外，部分研究以食物生产–消费链为研究对象开展了氮磷流股核算、效率分析[11]以及城乡粮食生产系统差异性分析等[18]。从消费端来看，消费需求对于农业食品系统的氮磷代谢影响越来越大，国内外越来越多的研究聚焦于人类活动引起的氮磷元素代谢的变化[5, 34]。例如，LARSEN等[7]关注人体新陈代谢中的营养物质对全球氮、磷循环的重要性，DONG等[17]开发了一种新的人–自然氮流耦合分析模型，计算了氮素在自然界与人类生产、消费和废弃过程的交换通量。

随着人口快速增长，人类活动对氮磷代谢系统的影响越来越大，探究人为因素如何驱动氮磷元素代谢有利于识别关键源头与过程，进而指导制定更为有效的资源管理和环境保护策略，促进氮磷代谢系统的可持续管理。氮磷代谢系统驱动力分析的研究通常集中在国家或部门层面，如XU等[35]探讨了影响我国氮氧化物和其他空气污染物排放的多种因素的区域差异，WANG等[58]基于LMDI方法探讨了农业污染与经济增长的潜在驱动力。此外，部分研究也从城市规模分析了氮磷代谢的驱动力因素，如HUANG等[32]通过建立全面的质量平衡模型，分析

了城市化如何影响磷代谢的机制，阐明了可持续磷利用的关键管理途径。PAN 等[29]通过生命周期分析和 LMDI 方法分析得到从时空角度分析城市氮代谢的变化模式和决定因素，以期促进特大城市的可持续城市氮管理和低氮发展。

然而，氮和磷相关产业的快速发展也带来了严重的环境问题，包括气候变化、水体富营养化和酸化等[59]。IPCC 2019 年报告指出农业部门占全球温室气体排放约 10% ~ 14%，农业氮肥产生的 N_2O 排放量加剧了全球暖化问题。UNEP 报告指出，全球近一半的湖泊、河流以及沿海海域遭受了严重营养物过载，其中氮、磷为主要因素之一。富营养化导致藻类暴发，消耗水中氧气，严重破坏水生系统，影响生物多样性。现有研究对氮磷代谢过程环境影响的关注度不断提高，如 LUO 等[27]对我国人类–环境耦合氮循环模型中氮元素代谢全流程分析，评估和量化不同氮源对我国整体氮污染的贡献，GAO 等[30]在区域尺度上量化了社会经济系统中氮与磷元素的代谢通量，研究了整个社会经济系统氮磷元素代谢通量，通过建立代谢拓扑结构来识别代谢中的关键节点。WU 等[3]在行业尺度上分析了中国农业生产中氮、磷营养素对环境的影响，为环境治理提供科学依据。

由于氮磷元素代谢过程带来的环境影响和资源消耗问题的日益显著，当前废物处理技术在氮磷回收领域逐渐受到广泛关注，旨在分析资源回收的经济、环境效益，LUO 等[27]量化了我国固体废物产生、处理和排放中的活性氮量，LIU 等[37]分析了我国含磷废物产生和回收的历史趋势，探索我国闭环磷循环、实现磷可持续性的解决方案，研究发现均衡施肥可以减少 17%的磷废物产生，促进废物回收可以减少 35%的磷损失。

2　不足与展望

虽然目前氮磷元素代谢及其可持续管理的研究已获得了显著的成果，但是这些研究仍存在一些不足之处，可以进一步提升的空间包括：

（1）氮和磷元素具有天然耦合的属性，这使得它们在自然界中形成了紧密的关联网络，对生态系统产生深远影响。然而目前宏观尺度下的氮磷代谢研究主要集中在单一元素展开，对氮、磷元素之间的耦合关系探究较为有限，且氮磷耦合关系的研究主要集中在微观层面，许多学者专注于特定生态环境中氮磷元素的相互作用，以深入理解它们在土壤、植物和水体中的复杂关系。这种单一元素、单维度分析的研究方法使得我们对氮磷元素在整个社会系统中的综合行为认识仍然有限，会忽视现有的权衡挑战和协同机会[60–61]，未来仍需深入展开对宏观尺度下氮磷元素间的协同作用与相互影响的系统性研究。

（2）现有氮磷代谢的研究大多未关注清洁能源需求驱动氮磷元素在能源领域的应用，氮未来将大量用于生产绿色氨以满足航运或其他燃料需求，磷将大量用于锂电池以满足能源储存和电动车需求。随着氮和磷元素在能源领域的重要性逐渐增强，氮磷元素在能源领域相关应用有少量研究，然而，未来随着技术发展以及市场化应用增强，钠离子电池和锂离子电池等有望实现更大规模的商业化应用，作为电极材料一部分的氮、磷元素还将更大程度向能源部门转移，食品和能源领域间的磷资源竞争进一步加剧，未来还应进一步探究能源系统中的氮磷流动规律，以加强对产业系统未来演化的判断，以期实现氮磷产业系统的可持续发展。

3　总结

氮磷元素代谢及可持续管理已成为当今的研究热点，受到的关注度不断提高，研究维度也正在不断拓展。在现有的物质代谢框架下，氮磷元素代谢研究的核心方法主要包括元素流分析、生命周期评价、足迹分析、生态网络分析、评价指标体系、情景分析和优化等，这些方法共同构建了氮磷代谢研究的基础架构，为资源利用效率、环境影响及可持续性评估提供了多元化视角。空间尺度的研究范围涉及从全球循环模型评估到国家效率策略，再到区域精准管理与行业技术探索，多关注于农业食品系统、人为因素驱动、环境效应评估至废物资源化管理等维度。而已有研究的局限性，主要有宏观视角下氮磷元素耦合关系研究不足，以及氮磷元素在新兴能源领域的应用关注较少，可能出现对氮磷系统未来演化的判断不准等问题。因此未来研究应注重宏观耦合管理，深化新兴能源领域影响，以政策优化资源管理，实现氮磷元素代谢的可持续发展。

［参考文献］

[1] CORDELL D, DRANGERT J O, WHITE S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought [J]. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 2009, 19(2): 292–305.

[2] REIJNDERS L. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014, 93: 32–49.

[3] WU H J, WANG S, GAO L M, et al. Nutrient-derived environmental impacts in Chinese agriculture during 1978–2015 [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 762–774.
[4] GAUPP F, HALL J, HOCHRAINER-STIGLER S, et al. Changing risks of simultaneous global breadbasket failure [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(1): 54–57.
[5] FUJIMORI S, MATSUOKA Y. Development of estimating method of global carbon, nitrogen, and phosphorus flows caused by human activity [J]. Ecological Economics, 2007, 62(3–4): 399–418.
[6] BOUWMAN L, GOLDEWIJK K K, VAN D H K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(52): 20882–20887.
[7] LARSEN T A, MAURER M, UDERT K M, et al. Nutrient cycles and resource management: implications for the choice of wastewater treatment technology [J]. Water Science and Technology, 2007, 56(5): 229–237.
[8] CHANG J F, HAVLIK P, LECLERE D, et al. Reconciling regional nitrogen boundaries with global food security [J]. Nature Food, 2021, 2(9): 700–711.
[9] KOPPELAAR R H E M, WEIKARD H P. Assessing phosphate rock depletion and phosphorus recycling options [J]. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 2013, 23(6): 1454–1466.
[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] PAPANGELOU A, MATHIJS E. Assessing agro-food system circularity using nutrient flows and budgets [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112383.
[12] GU B J, JU X T, CHANG J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8792–8797.
[13] TANZER J, ZOBOLI O, ZESSNER M, et al. Filling two needs with one deed: Potentials to simultaneously improve phosphorus and nitrogen management in Austria as an example for coupled resource management systems [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 640: 894–907.
[14] XIONG C H, GUO Z, CHEN S S, et al. Understanding the pathway of phosphorus metabolism in urban household consumption system: A case study of Dar es Salaam, Tanzania [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122874.
[15] LIU X, SHENG H, JIANG S Y, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(10): 2609–2614.
[16] FIRMANSYAH I, SPILLER M, DE RUIJTER F J, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus flows in agricultural and urban systems in a small island under limited data availability [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1521–1532.
[17] DONG Y, XU L Y, YANG Z F, et al. Aggravation of reactive nitrogen flow driven by human production and consumption in Guangzhou City China [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1209.
[18] WU J C, HARTMANN T E, CHEN W S. Toward sustainable management of phosphorus flows in a changing rural–urban environment: recent advances, challenges, and opportunities [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2019, 40: 81–87.
[19] ESCULIER F, LE NOE J, BARLES S, et al. The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: A regionalized analysis of a water-agro-food system [J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 1028–1045.
[20] LIU W, QIN T, WU M T, et al. Analyzing the phosphorus flow characteristics in the largest freshwater lake (Poyang Lake) watershed of China from 1950 to 2020 through a bottom-up approach of watershed-scale phosphorus substance flow model [J]. Water Research, 2023, 245: 120546.
[21] LUO Z B, MA S J, HU S Y, et al. Towards the sustainable development of the regional phosphorus resources industry in China: A system dynamics approach [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 126: 186–197.
[22] ASMALA E, SAIKKU L. Closing a Loop: Substance Flow Analysis of Nitrogen and Phosphorus in the Rainbow Trout Production and Domestic Consumption System in Finland [J]. Ambio, 2010, 39(2): 126–135.
[23] PHAM H G, HARADA H, FUJII S, et al. Transition of human and livestock waste management in rural Hanoi: a material flow analysis of nitrogen and phosphorus during 1980–2010 [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(2): 827–839.
[24] SEN A, BAKSHI B R. Techno-economic and life cycle analysis of circular phosphorus systems in agriculture [J]. Science of the Total Environment, 2023, 872: 162016.
[25] LIN Y B, YANG J H, YE Y M. Spatial-Temporal Analysis of the Relationships between Agricultural Production and Use of Agrochemicals in Eastern China and Related Environmental and Political Implications (Based on Decoupling Approach and LMDI Decomposition Analysis) [J]. Sustainability, 2018, 10(4): 917.
[26] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8375–8380.
[27] LUO Z B, HU S Y, CHEN D J, et al. From Production to Consumption: A Coupled Human-Environmental Nitrogen Flow Analysis in China [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 2025–2035.
[28] CUI S H, SHI Y L, GROFFMAN P M, et al. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910–2010) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(6): 2052–2057.
[29] PAN J J, DING N, LU B, et al. Patterns change and determinants of urban nitrogen metabolism in Chinese

megacities[J]. Journal of Cleaner Production,2020,264:121597.
[30] GAO C K,ZHANG S B,SONG K H,et al. Conjoint analysis of nitrogen, phosphorus and sulfur metabolism: A case study of Liaoning Province, China[J]. Ecological Modelling, 2018, 390: 70-78.
[31] FUCHS V J, MIHELCIC J R, GIERKE J S. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions [J]. Water Research, 2011, 45(5): 2073-2081.
[32] HUANG C L, QU S, GAO B, et al. Effects of urbanization on phosphorus metabolism in a typical agricultural area [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 803-815.
[33] 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.
[34] JIANG S Y, HUA H, SHENG H, et al. Phosphorus footprint in China over the 1961-2050 period: Historical perspective and future prospect [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 687-695.
[35] XU S C, MIAO Y M, LI Y M, et al. What Factors Drive Air Pollutants in China? An Analysis from the Perspective of Regional Difference Using a Combined Method of Production Decomposition Analysis and Logarithmic Mean Divisia Index [J]. Sustainability, 2019, 11(17): 4650.
[36] LUO Z B, LAM S K, HU S Y, et al. From generation to treatment: A systematic reactive nitrogen flow assessment of solid waste in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 121127.
[37] LIU X W, YUAN Z W, LIU X, et al. Historic Trends and Future Prospects of Waste Generation and Recycling in China's Phosphorus Cycle [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(8): 5131-5139.
[38] LIANG S, YU Y D, KHARRAZI A, et al. Network resilience of phosphorus cycling in China has shifted by natural flows, fertilizer use and dietary transitions between 1600 and 2012 [J]. Nature Food, 2020, 1(6): 365-375.
[39] ZHI L H, LI X U, BAI J H, et al. Integrating ecological and socioeconomic networks using nitrogen metabolism in the Yellow River Delta, China [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, 162: 105012.
[40] ZHANG Y, LU H J, FATH B D, et al. A Network Flow Analysis of the Nitrogen Metabolism in Beijing, China[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(16): 8558-8567.
[41] 张玲,袁增伟,毕军. 物质流分析方法及其研究进展[J]. 生态学报,2009,29(11):6189-6198.
[42] 朱春燕. 物质流分析简介[J]. 中国统计,2013(4):40-42.
[43] WOOTTON J T. Indirect effects in complex ecosystems: recent progress and future challenges [J]. Journal of Sea Research, 2002, 48(2): 157-172.
[44] 樊庆锌,敖红光,孟超. 生命周期评价[J]. 环境科学与管理,2007(6):177-180.
[45] 刘雪薇. 中国含磷废物产生格局与资源化潜力[D].南京:南京大学,2020.
[46] 季国军,纪洪亭,程琨,等. 江苏稻田轮作模式碳、氮足迹分析[J]. 南京农业大学学报,2023,46(3):510-521.
[47] HINES D E, SINGH P, BORRETT S R. Evaluating control of nutrient flow in an estuarine nitrogen cycle through comparative network analysis[J]. Ecological Engineering, 2016, 89: 70-79.
[48] HIRATA H, ULANOWICZ R. Information Theoretical-Analysis of ecological networks [J]. International Journal of Systems Science, 1984, 15(3): 261-270.
[49] KHARRAZI A, ROVENSKAYA E, FATH B D. Network structure impacts global commodity trade growth and resilience [J]. PLOS One, 2017, 12(2): 0171184.
[50] BODINI A, BONDAVALLI C, ALLESINA S. Cities as ecosystems: Growth, development and implications for sustainability[J]. Ecological Modelling, 2012, 245: 185-198.
[51] FANG D L, CHEN B. Ecological Network Analysis for a Virtual Water Network [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6722-6730.
[52] LUO Z M, YU Y D, KHARRAZI A, et al. Decreasing resilience of China's coupled nitrogen-phosphorus cycling network requires urgent action[J]. Nature Food, 2024, 5(1): 48-58.
[53] BAI Z H, LIU L, OBERSTEINER M, et al. Agricultural trade impacts global phosphorus use and partial productivity [J]. Nature Food, 2023, 4(9): 762-773.
[54] ZOU T, ZHANG X, DAVIDSON E A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges[J]. Nature, 2022, 611(7934): 81-87.
[55] CHEN X Z, HOU Y, KASTNER T, et al. Physical and virtual nutrient flows in global telecoupled agricultural trade networks [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2391.
[56] LI A A, STROKAL M M, BAI Z H Z H, et al. Modelling reduced coastal eutrophication with increased crop yields in Chinese agriculture [J]. Soil Research, 2017, 55 (5-6): 506-517.
[57] VINGERHOETS R, SPILLER M, DE BACKER J, et al. Detailed nitrogen and phosphorus flow analysis, nutrient use efficiency and circularity in the agri-food system of a livestock-intensive region[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 410: 137278.
[58] 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.
[59] FERNANDEZ-MENA H, NESME T, PELLERIN S. Towards an Agro-Industrial Ecology: A review of nutrient flow modelling and assessment tools in agro-food systems at the local scale [J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 467-479.
[60] PENUELAS J, JANSSENS I A, CIAIS P, et al. Anthropogenic global shifts in biospheric N and P concentrations and ratios and their impacts on biodiversity, ecosystem productivity, food security, and human health[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4): 1962-1985.
[61] KANTER D R, BROWNLIE W J. Joint nitrogen and phosphorus management for sustainable development and climate goals[J]. Environmental Science and Policy, 2019, 92: 1-8.