

鄱阳湖流域种植系统氮磷通量时空变化及减量潜力*

刘慧敏¹, 付航¹, 李远航¹, 孙玉恒¹, 袁雯¹, 罗斌华², 石磊^{1**}

(1: 南昌大学资源与环境学院, 南昌 330031)

(2: 江西省生态文明研究院, 南昌 330036)

摘要: 近年来, 鄱阳湖流域种植系统氮磷的过度输入与低效利用造成了氮磷负荷增加等环境问题, 因此, 定量追溯鄱阳湖流域种植系统的氮磷时空格局, 对保护流域生态系统可持续性具有重要意义。本研究采用物质流分析方法, 分析了鄱阳湖流域 2000-2022 年种植系统氮磷通量的时空变化, 并基于种植系统氮磷污染物排放现状设计了基准情景, 减少耕地化肥投入情景、秸秆回收率提高情景和综合措施情景, 在各种情景下定量描述减排潜力, 提出了氮磷污染物减排防治的策略。结果表明, 流域内氮磷输入情况总体呈现先上升、后平稳波动的变化, 于 2015 年前后氮磷输入量出现峰值; 空间分布上, 鄱阳湖环湖区氮磷总输入量最高, 分别为 28.1 万吨和 6.4 万吨; 化肥和有机肥是最大来源, 贡献了一半以上的氮磷输入量; 从种植系统养分利用效率来看, 氮和磷的综合利用率分别为 48.5% 和 31.0%, 2010 年以来各种作物氮磷利用率呈下降趋势, 养分投入氮磷比 (N/P) 也在持续下降, 平均输入 N/P 为 3.9。综合措施情景结果表明, 到 2050 年, 氮磷污染排放可减少 15.9 万吨, 与基准情景相比减少了 53.4% 的污染物, 排入环境中的氮磷比可升至 6.5。通过定量分析鄱阳湖流域种植氮磷结构, 追溯 20 年来流域氮磷输入情况, 识别判断氮磷比的变化趋势, 可系统评估种植系统的氮磷代谢关键过程, 并通过评估未来情景的潜在结果, 为鄱阳湖流域建立有效的氮磷综合管理措施提供科学依据。

关键词: 可持续农业; 氮磷流动; 鄱阳湖流域; 种植系统

Spatiotemporal dynamics and mitigation potential of nitrogen-phosphorus fluxes in cropping systems of Lake Poyang Basin

Liu Huimin¹, Fu Hang¹, Li Yuanhang¹, Sun Yuheng¹, Yuan Wen¹, Luo Binhua² & Shi Lei^{1**}

(1: School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, P.R.China)

(2: Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang 330036), P.R.China)

Abstract: In recent years, the excessive input and inefficient utilization of nitrogen and phosphorus in cropping systems has led to significant losses of these elements. Lake Poyang Basin has led to significant losses of these elements, resulting in persistent nitrogen and phosphorus levels exceeding the legal limit, as well as other environmental issues. Therefore, tracing the spatiotemporal patterns of nitrogen and phosphorus metabolism in the Lake Poyang Basin cropping system is crucial for ensuring the basin's ecosystem sustainability. This study used the Material Flow Analysis (MFA) method to investigate the spatiotemporal variations in nitrogen and phosphorus fluxes in cropping systems across the Lake Poyang Basin from 2000 to 2022. Four scenarios were designed based on the current status of nitrogen and phosphorus pollutant emissions: a baseline scenario; a scenario with reduced fertilizer inputs for arable land; a scenario with increased straw recycling rates; and a scenario with comprehensive measures. The emission reduction potential was calculated for each scenario, and the optimal strategies for reducing and preventing nitrogen and phosphorus pollution were then proposed. The results show that nitrogen and phosphorus inputs to the basin initially

* 2025-01-08 收稿; 2025-03-28 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2023YFE010460)、国家自然科学基金项目 (52200215; 52270182) 和江西省社会科学基金项目 (24ZXST06) 联合资助。

** 通讯作者; E-mail: shilei@ncu.edu.cn

increased and then fluctuated stably, peaking around 2015. In terms of spatial distribution, the total nitrogen and phosphorus inputs were highest in the coastal lake district, reaching 281000 t of nitrogen and 64000 t of phosphorus respectively. Chemical and organic fertilizers accounted for over half of the total inputs. In terms of nutrient use efficiency, the combined use rates of nitrogen and phosphorus were 48.5% and 31.0%, respectively. Since 2010, the utilization rates of nitrogen and phosphorus for all crops have declined, as has the ratio of nutrient inputs of nitrogen and phosphorus, with an average N/P ratio of 3.9. Scenario analysis suggests that reducing chemical fertilizer use could decrease nitrogen output by 150000 t by 2050 and reduce nitrogen and phosphorus emissions by 159000 t, which would reduce pollutants by 53.4%. Compared with the baseline scenario, the N/P ratio discharged into the environment could rise to 6.5. Reducing fertilizer application accounts for 75.7% of the emission reduction, demonstrating its effectiveness as a mitigation strategy. Quantitative analysis of the nitrogen and phosphorus structure of the cropping system, and tracing nitrogen and phosphorus inputs over the past 20 years in the Lake Poyang Basin, has allowed us to identify and judge the trend in the nitrogen and phosphorus ratio. This analysis enables us to evaluate the key processes of the agricultural system systematically, providing a scientific basis for developing effective, integrated nitrogen and phosphorus management measures in the Lake Poyang Basin, and evaluating the potential outcomes of future scenarios.

Keywords: Sustainable agriculture; nitrogen and phosphorus fluxes; Lake Poyang Basin; cropping system

保障粮食安全和用水安全是目前人类刻不容缓需要解决的难题^[1], 氮磷在农业生产中起着至关重要的作用。自 20 世纪 80 年代以来, 我国农业领域内氮磷的使用量一直在持续增加, 农用氮肥从 9.99×10^6 t 增至 1.65×10^7 t, 位于全球前列^[2]。然而, 我国农业领域氮磷的利用率并不高, 氮肥利用率介于 30%~35% 之间, 磷肥利用率在 20% 左右, 而在欧美等发达国家, 氮利用率在 70% 左右^[3], 大量未利用的氮磷元素会流失在环境中。流域内氮磷过量会显著促进藻类的生长, 造成水体富营养化^[4]。除了总量超标外, 氮磷比也是衡量生态环境营养平衡的重要指标, 平衡的氮磷比应接近 16:1, 任何生态系统氮磷比偏离 16:1 都会引发生物体营养供给失衡^[5], 从而引起生态系统的结构失衡和功能下降。氮磷污染不仅会对水质造成破坏, 同时还可能对当地经济造成负面影响, 严重时甚至会对人民生命安全构成威胁。

鄱阳湖流域是长江水系重要的组成部分, 控制着长江 18% 的供水量。同时, 鄱阳湖作为长江最大的通江湖泊, 其水文情势受“五河”来水和长江水位的季节性变化共同影响。由于鄱阳湖蝶形湖独特的地形地貌在季节性的水文变化下对氮磷的保留和释放行为不同^[6], 其对氮磷输入的敏感度显著高于其他湖泊。近年来, 鄱阳湖水质呈持续恶化趋势, 湖中总氮浓度从 1.1 mg/L 增加到 1.9 mg/L, 总磷浓度从 2013 年的 0.058 mg/L 增加到 2018 年的 0.089 mg/L, 年均增长率为 8.9%^[7]。大型湖泊水质的演变主要受污染物排放量增加和水文条件变化的影响, 鄱阳湖总磷污染负荷主要来自陆域输入, 其中农业源(畜禽养殖、种植业、水产养殖)是最主要的面源污染源, 贡献比例总计达到 87.73%。此外, 近年来极端降水和干旱周期的频繁发生, 也可能将外来污染物引入湖泊, 导致湖泊中营养物质浓度上升^[8, 9]。生态环境部于 2018 年印发《关于加强固定污染源氮磷污染防治的通知》, 提出逐步将总氮、总磷列为重点湖库、长江经济带地表水首要污染物。因此, 厘清鄱阳湖流域氮磷循环过程, 并通过综合管理措施控制氮磷入湖, 具有重要的现实意义。

农业种植系统是氮磷循环的核心环节之一, 在全球氮磷循环中, 种植系统涉及的养分通量占比超过一半^[10], 是氮磷养分循环的关键过程。2000 年以来, 国内外学者对流域氮磷通量已展开较为广泛的研究。有学者应用或改进了已有模型, 如 NANI/NAPI 模型、DNDC 模型和 SWAT 模型、MFA 模型等来识别流域内氮磷通量, 不同的模型因其侧重点不同, 其对氮磷演化趋势及组成结果之间存在显著差异^[11-13]。NANI 模型由食品氮输入、氮肥施用、作物固氮和大气氮沉降 4 个部分构成^[14], 相较于人类净氮/磷输入模型, 基于过程的 MFA 模型还包括作物收获、加工与秸秆回收利用, 以及向环境输出过程(大气、河流、土壤/地下水), 能更好地反映作物种植需求对氮磷循环的贡献作用, 并可全面追溯其对上下游产业的影响。DNDC 模型专注于土壤碳循环对氮磷添加的响应; SWAT 模型则以其在模拟流域水文和氮磷负荷方面的能力而著称, 但其需要较为详尽的气象、土壤、土地利用、作物管理等数据, 数据获取难度较大。因此, 鉴于不同研究目的应灵活选择分析方法。MFA 分析因其能够全面反映流域氮磷循环, 包括输入、输出和内部循环过程, 而被广泛采用。如李书田^[15]等构建了全国不同区域农田养分平衡关系, 指出中国大多

数地区氮磷利用模式存在化肥依赖性强、养分利用率不高、有机质回用率低等问题。对中国 2004-2018 作物种植系统的氮磷预算及计量关系进行分析，表明了种植系统氮磷投入已过剩，并且磷增量高于氮是水环境养分失衡的重要原因^[16]；对于利用率的研究，武慧君等^[17]指出巢湖流域种植系统氮利用效率（NUE）和磷利用效率（PUE）仅为 12.3%和 5.2%，并提出了控制化肥施用、改善畜禽粪便施用、调整种植面积等综合管理措施；王雪蕾等^[18]分析我国 2010 年氮磷养分利用效率分别为 52%和 48%。根据上述比较，鄱阳湖流域氮利用效率处于全国平均水平，磷利用效率有待提高。

目前种植系统氮磷通量研究已阐述了特定作物与区域的氮磷流动通量及其对该生态经济区的环境影响，然而还存在一定提升空间。现有研究并未阐述种植系统“投入—种植—收获—加工”整体过程的流动路径，不足以形成闭环路径；其次，对于流域尺度的氮磷循环研究尚未深入，鄱阳湖流域、巢湖流域等内陆湖流域水环境保护具有更高要求，控制外源氮磷入湖是维护水环境质量的重要一环。本文采用物质流分析，构建种植系统养分平衡模型，追溯了 20 年来鄱阳湖流域种植系统氮磷输入情况，并全面评估了其过程氮磷效率、流域氮磷比等特征指标，揭示了流域种植系统氮磷利用的存在问题与提升潜力，为未来鄱阳湖流域农业氮磷减排提供了理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖位于长江中下游南岸，是中国最大的淡水湖，流域面积为 162 225 km²，地形复杂，多以低山丘陵和滨湖平原为主，水系东、南、西三面环山。流域范围覆盖南昌、景德镇、鹰潭三市全部领土以及九江、新余、抚州、宜春、上饶、吉安的部分县（市、区），包括江西省 11 个地级市。鄱阳湖流域支流众多，包括赣江、抚河、信江、修水和饶河五大水系，水流经湖盆调蓄后由湖口最终注入长江。鄱阳湖水系有 96.6%的水域处于江西省境内，流域范围与省域高度重合^[19]，基于此，研究重点在江西省流域，另外按系数折算处于浙江、安徽、湖南等部分流域的氮磷流入量。

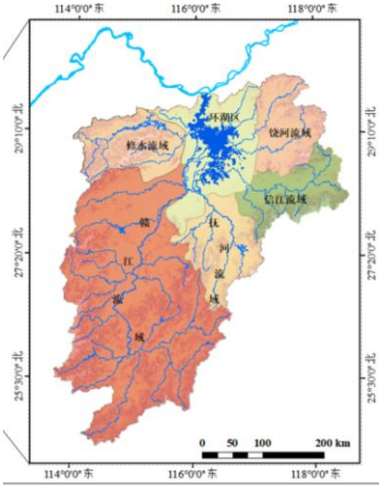


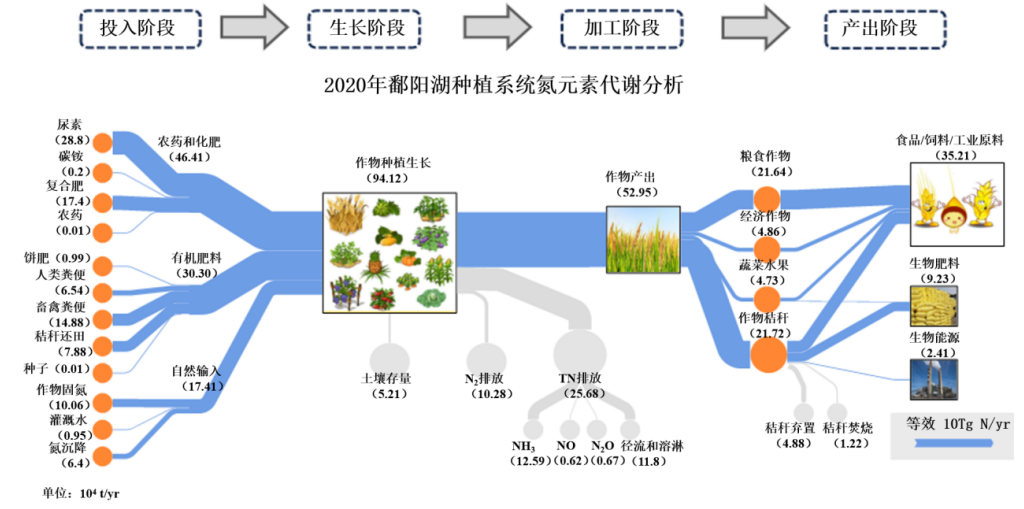
图 1 研究区域概况图

Fig.1 Overview map of the study area

1.2 研究方法

种植系统指在特定的农业生态环境和社会经济条件下，对农作物的种植、生长、收获等全过程进行综合规划和管理的一整套技术和方法，核算涉及与人为过程有关的氮磷循环过程，包括投入阶段中化肥施用、有机肥输入、自然固定等投加量；在作物种植过程中通过土壤、大气、径流等途径在环境中的损失量；产出阶段中包括水稻、油料、甘蔗、蔬菜等作物产量等要素，是一个涵盖了农业生产的自然属性和社会经济属性的复杂系统。本研究的基础数据，包括研究区内 11 市人口数量、畜禽养殖数量、农作物生产量、农作物种植面积、化肥施用等，活动水平数据来源于 2000-2022 年《江西省统计年鉴》《南昌市统计年鉴》《九江市统计年鉴》《中国农业统计年鉴》及公报等。部分缺失值采用线性差值法获取。模型公式中各参数数值参考《中国统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》和已发表的文献^[20-22]。农业领域人类活动氮

平衡关系如



2020年鄱阳湖种植系统磷元素代谢分析

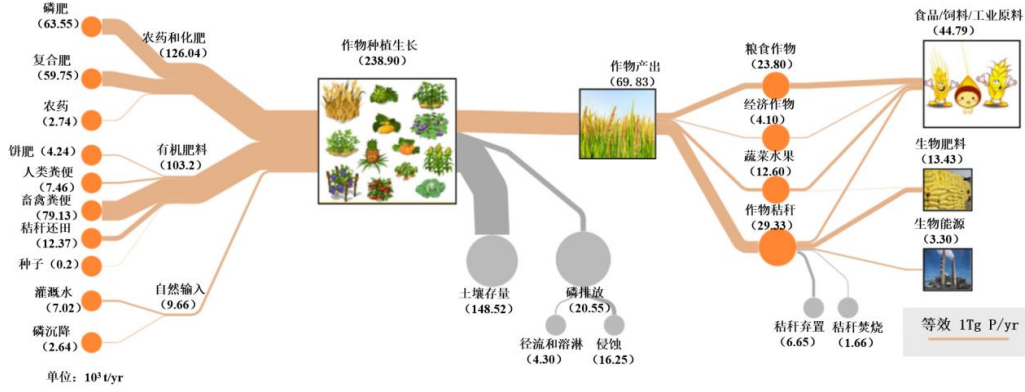


图 2，直观展示涉及的过程路径及相应的通量。

以 2000-2022 年为例，分析鄱阳湖流域种植系统中氮磷流量，种植业及加工过程包含粮食作物生产子系统、经济类作物生产子系统、其他类作物生产子系统及植物类食品加工四个子系统，其总体平衡关系如下所示：

$$N_{in} = N_N^{1-3} + N_{AF}^{1-3} + N_{OF}^{1-3} \quad (1)$$

$$N_{out} = N_B^4 + N_{PBF}^4 + N_{PF}^4 + N_{WS}^4 + N_{CF}^4 + \sum_{i=1}^3 N_{loss,i}^{1-3} \quad (2)$$

$$N_N^{1-3} = AA \times K_1 + AA \times K_2 + \sum_{i=1}^n CP_i \times N_i \quad (3)$$

$$N_{AF}^{1-3} = N_{co} \times K_3 + N_{c1} \times K_4 + N_{other} \quad (4)$$

$$N_{OF}^{1-3} = O_1 \times K_5 + O_2 \times K_6 + (RP + UP) \times K_7 \times K_8 + \sum_{i=1}^n AP_i \times K_9 \times K_{10} \quad (5)$$

$$N_B^4 = \sum_{i=1}^n CP_i \times K_i \times SF_1 \quad (6)$$

$$N_{PBF}^4 = \sum_{i=1}^n CP_i \times K_i \times SF_2 \quad (7)$$

$$N_{PF}^4 = \sum_{i=1}^n CP_i \times K_i \times SF_3 \quad (8)$$

$$N_{WS}^4 = \sum_{i=1}^n CP_i \times K_i \times SF_4 \quad (9)$$

$$N_{CF}^4 = \sum_{i=1}^n CP_i \times K_i \times SF_5 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^3 N_{loss,i}^{1-3} = AA \times K_{11} + AA \times K_{12} + N_{in} \times (N^{NH_3} + N^{N_2O} + N^{DEN}) \quad (11)$$

其中， AA 为耕地面积， K_1 为灌溉水输入强度， K_2 为氮沉降系数， CP_i 为作物 i 的产量， N_i 为作物固氮速率； N_{co} 为氮肥消耗量， N_{c1} 为复合肥消耗量， N_{other} 为其他肥料氮输入， K_3 为氮肥氮含量， K_4 为氮肥氮含量； O_1 为秸秆还田量， O_2 为饼肥消耗量， RP 为农村人口数， UP 为城市人口数， AP_i 为牲畜存栏数， K_5 为秸秆氮含量， K_6 为饼肥氮含量， K_7 、 K_8 为人类氮排泄系数，牲畜排泄系数， K_9 、 K_{10} 为粪便还田率； K_{11}

为耕地径流系数， K_{12} 为耕地淋滤沉降系数， K_{13} 为磷风蚀损失系数， K_i 为作物氮含量， SF_i 为作物用作该部分产品的比例， N^{NH3} 、 N^{N2O} 、 N^{DEN} 分别表示 N 通过脱氮， N_2O 排放，氨挥发形式排放至大气子系统中的比例。

通过统计年鉴和参数对已知量进行计算，由于统计年鉴一般仅统计农作物作为经济收获的部分，而秸秆等非期望产出并不进行统计，因此秸秆采用草谷比的方式进行计算，种植系统磷素平衡计算与氮计算类似，本文不再赘述。上述计算涉及部分参数如

表 1、

参数	单位	数值	来源
固氮速率 (N_i)	kg N/hm ²	大豆：113 花生：87 水稻、甘蔗：33 苜蓿：135 其他：11	[24, 25]
灌溉水输入强度 (K_1)	kg N/(hm ² ·a)	南方：3.6 北方：5.5	[20, 26]
氮沉降 (K_2)	kg N/(hm ² ·a)	(00-10S):19.5 (10-20S):24.1	[22, 27, 28]
N_2O 排放 (N^{N2O})	kg / (hm ² ·a)	5.1	
脱氮排放 (N^{DEN})	kg / (hm ² ·a)	132	[29]
氨挥发 (N^{NH3})	kg / (hm ² ·a)	44	
径流系数 (K_{11})	kg / (hm ² ·a)	氮：13.29 磷：2.1	[30]
淋溶系数 (K_{12})	kg / (hm ² ·a)	氮：5 磷：2	[31]
磷风蚀损失 (K_{13})	kg /ha·a	0.255	[32]

表 2 所示。

过程效率是衡量系统资源利用有效性的重要指标，一般以氮利用效率（Nitrogen use efficiency, NUE）、磷利用效率（Phosphorus use efficiency, PUE）表示，指植物吸收单位养分所能产生的总生物量或经济产量。养分利用效率计算，为 N 或 P 产品产出除以作物种植的 TN 或 TP 投入^[23]，具体计算方法如下所示：

$$NUE = \frac{O_N}{I_N} \times 100\% \tag{12}$$

$$PUE = \frac{O_P}{I_P} \times 100\% \tag{13}$$

其中， I_P 为每种作物种植过程中总氮/磷投入量，包括农药和化肥、有机肥、自然输入； O_P 为每种作物产出含氮/磷量，包括作物作为食物、饲料、材料、肥料、能源产出时的养分含量，得到各种作物养分利用率之后进一步计算系统氮磷利用效率。

1.3 情景分析

目前，中国的农田肥料预算遵循“高投入高产出”的模式，氮肥投入量比全球平均水平高出 136.7%^[35]，在粮食产量增加的同时，大量污染物也随之而来，为探究未来种植系统的氮磷污染排放趋势，本研究选择 2025-2050 年作为预测期，预测不同管理策略对污染物排放的影响。情景涵盖了基准情景（S1）、化肥减量情景（S2）、秸秆回收率提高情景（S3）和综合措施情景（S4）见表 3。

表 1 种植系统氮磷流动模型过程参数

Tab.1 Parameters of nitrogen and phosphorus fluxes model in planting systems

参数	单位	数值	来源
固氮速率 (N_i)	kg N/hm ²	大豆: 113 花生: 87 水稻、甘蔗: 33 苜蓿: 135 其他: 11	[24, 25]
灌溉水输入强度 (K_1)	kg N/ (hm ² ·a)	南方: 3.6 北方: 5.5	[20, 26]
氮沉降 (K_2)	kg N/ (hm ² ·a)	(00-10S):19.5 (10-20S):24.1	[22, 27, 28]
N ₂ O 排放 (N^{N_2O})	kg / (hm ² ·a)	5.1	
脱氮排放 (N^{DEN})	kg / (hm ² ·a)	132	[29]
氨挥发 (N^{NH_3})	kg / (hm ² ·a)	44	
径流系数 (K_{11})	kg / (hm ² ·a)	氮: 13.29 磷: 2.1	[30]
淋溶系数 (K_{12})	kg / (hm ² ·a)	氮: 5 磷: 2	[31]
磷风蚀损失 (K_{13})	kg /ha·a	0.255	[32]

表 2 不同作物的草谷比, 谷物氮磷含量和秸秆氮磷含量

Tab.2 Ratio of straw to grain, and nitrogen and phosphorus content in grains and straw of different crops

类别	作物	谷物氮含量 (%)	谷物磷含量 (%)	草谷比	秸秆磷含量 (%)	秸秆氮含量 (%)	来源
粮食种植	水稻	1.2	0.36	0.97	0.13	0.91	[33]
	小麦	1.9	0.41	1.28	0.08	0.65	[15]
	玉米	1.4	0.27	1.25	0.152	0.85	[34]
	薯类	0.3	0.14	0.5	0.27	0.31	[35]
	其他谷物	1.35		1.35		1.1	
经济作物	豆类	5.5	0.48	1.53	0.2	1.54	
	花生	3.9	0.31	0.8	0.16	1.75	[35]
	油菜籽	3.5	0.68	2.39	0.14	0.78	
	葵花籽	3.6		2.28		0.79	
	甘蔗	0.2	0.14	0.12	0.14	1.00	
	甜菜	0.24		0.18		0.75	
	蔬菜	0.26	0.06	0.1		2.37	
	瓜果	0.21		0.1		2.03	
	棉花	3	0.48	1.1	0.15	3.1	[35]
	棉籽	1.9	0.78				
	麻类	0.8		1		0.68	
	烟叶	1.5		1.06		1.3	
其他作物	苜蓿	3					农场访谈
	麦草	2.1					
	绿肥	0.5					

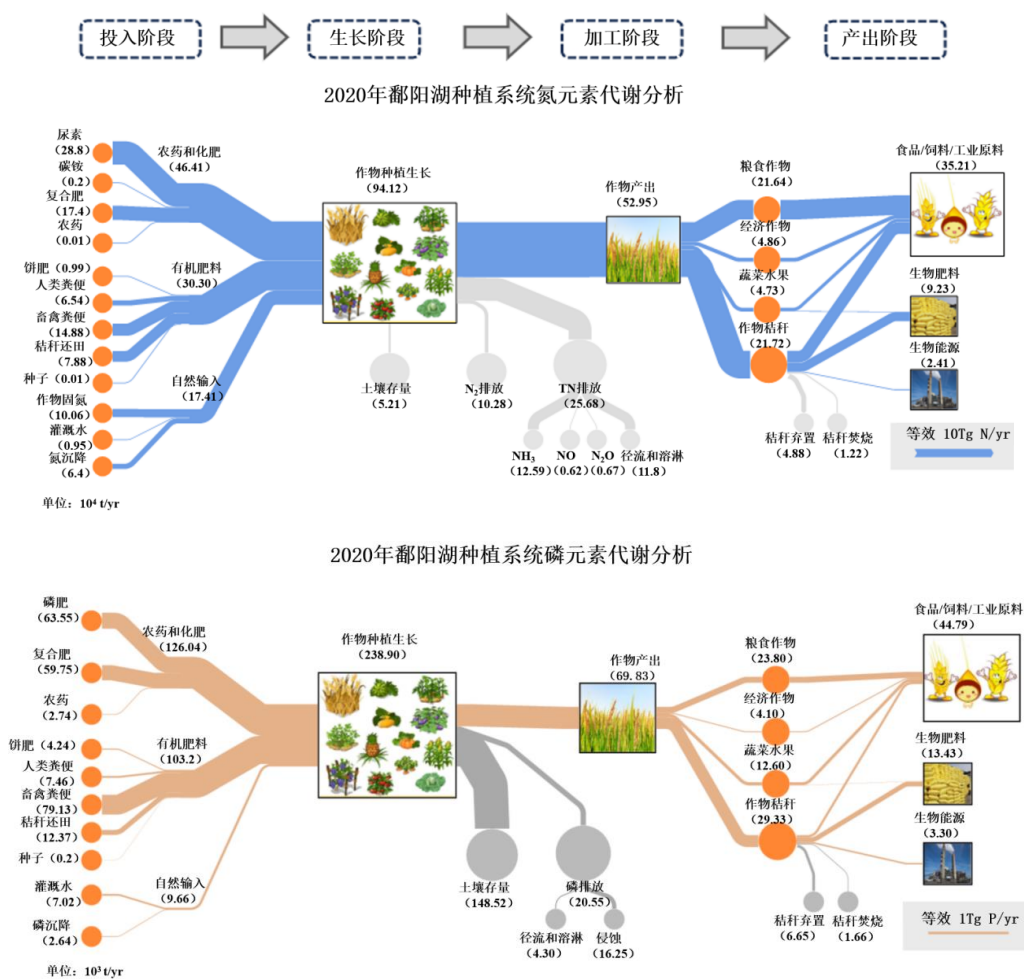


图 2 种植系统氮磷供需平衡分析

Fig.2 Nitrogen and phosphorus supply and demand balance analysis for cropping systems

表 3 不同预设情景参数特征

Tab.3 Characteristics of different preset scenarios

社会经济指标		当前	预设情景（2050）			
		2020	S1	S2	S3	S4
肥料输入	人口（10 ⁴ ）	4517	4517	4517	4517	4517
	城市城镇化率（%）	61.5	80	80	80	80
	氮肥施用量（10 ⁴ t）	28.8	28.8	22.8	28.8	22.8
	复合肥施用量（10 ⁴ t）	49.8	49.8	39.3	49.8	39.3
	磷肥施用量（10 ⁴ t）	15	15	11.9	15	11.9
	秸秆还田率（%）	36.8	36.8	36.8	60.9	60.9
利用率水平	磷利用效率（%）	34	60	60	60	60
	氮利用效率（%）	56	70	70	70	70

据联合国粮食及农业组织（FAO）预测，收获作物中的磷含量将从每年 1 300 万吨（2010 年）增至 1 930 万吨（2050 年），为实现 2050 年全球粮食安全并控制磷污染，需将磷利用效率提升至 68-81%^[36]。同时据预测，通过 4R 养分管理策略，可以使地区养分利用效率在 2050 年翻倍^[37]。基于流域内经济快速提升及大规模农业的发展的客观基础，到 2050 年假设流域磷利用效率将达到 60%，氮利用在 70%^[38, 39]。由于人口，城市化率属于客观条件，参考 2019 年联合国对中国人口的预测，在四种情景中设定值保持不变。在基准情景中，假定施肥量保持不变，作物产出也保持现状，表现为在停滞发展的 2050 年氮磷污染

物现状：秸秆的综合利用在污染物减排中发挥着重要作用，2018 年中国农村水稻秸秆和小麦秸秆综合利用率分别为 85.30%和 98.41%^[40]，而玉米秸秆综合利用率仅为 40.25%，其中用于还田的秸秆比例在 42.4%，在保障作物产量前提下，设置秸秆回收率提高情景，假设作物秸秆堆弃焚烧率为 10%，还田率到 2050 增至 60.9%，以实现到 2050 年氮磷利用率达到上述水平；肥料是种植系统养分输入的关键因素，中国农业农村部提出到 2020 年化肥使用量实现零增长的政策^[41]，同时，使用平衡营养基础肥料可在保证作物产量的同时，显著减少氮磷肥料使用量的 35%~88%^[41]，考虑到高效化肥管理以及政策发展，在达到上述利用率的前提下，预测 2050 年化肥减量 21%；在综合措施情景下，综合考虑减少化肥施用及提高秸秆回收利用率，减量参数与上述两种情景一致，观察协同减排效益。此外，由于 2021-2022 年关键参数（化肥量、秸秆还田率）与 2020 年差异不足 2%，且部分数据因统计延迟尚未公开，因此选择 2020 年作为基准年进行分析。

2 结果与讨论

2.1 鄱阳湖流域氮磷流动模式

对 2000-2022 年鄱阳湖流域种植系统氮磷通量进行计算，结果如图 3 所示，氮磷的通量变化趋势相似度高，这可能是因为影响二者的主要因素施肥强度一致决定的。在贡献率上，化肥，粪便，秸秆还田所提供的氮输入量最大，其中化肥贡献了总氮输入的 59.2%，该比例近年来有所下降，这与江西省近年为实现绿色农业，持续推进化肥减量增效行动相符。此外，秸秆，饲料以及环境流出是主要氮输出途径，农作物秸秆中的氮素流失量逐年增加。肥料施用和粪便还田是最主要的磷源，二者之和贡献了 90%的总磷输入，除了秸秆和作物输出角度外，施加的磷有 62.8%留存于土壤，未被利用，耕地磷富集确实已成为中国地表水质的最大威胁，有 10.1%的总磷产量最终进入水体^[42]。从时间来看，氮磷输入量都呈现先上升后下降的趋势，2000 年流域氮投入总量为 9.12×10^5 t，磷投入 1.96×10^5 t，到 2022 年氮投入为 9.77×10^5 t，磷投入增至 2.46×10^5 t，2015 年氮输入量出现峰值（ 1.16×10^6 t），磷输入在 2016 年达到峰值（ 2.83×10^5 t）。

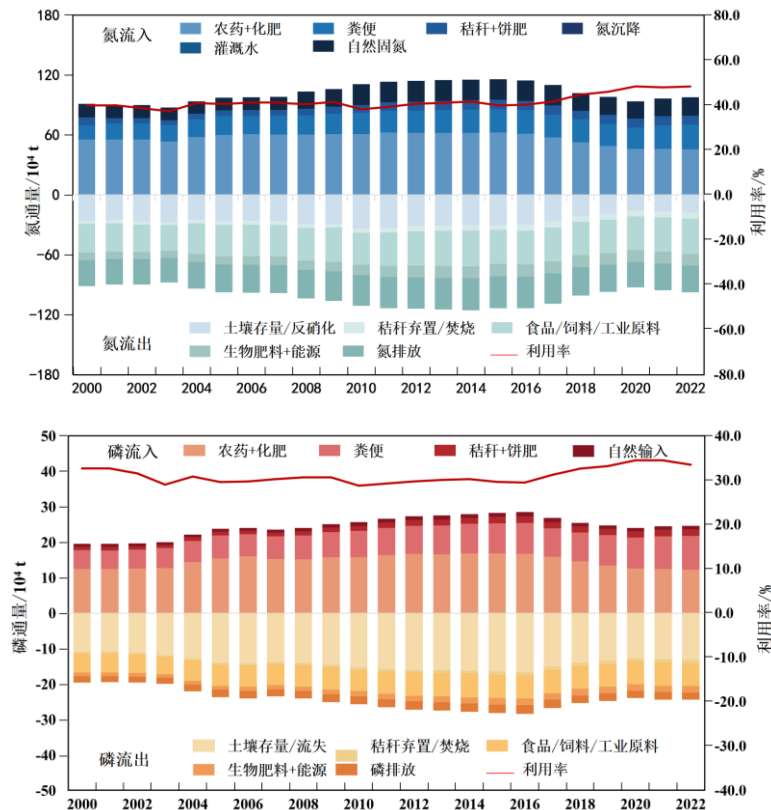


图 3 2000-2022 氮磷输入输出结构

Fig.3 Structure of nitrogen and phosphorus input and output from 2000 to 2022

在过去的十年中，流域养分利用效率略有提高，其中氮利用率平均为 48.5%，磷利用率为 31%，相较之下，2013 年全国 NUE 平均水平为 20%，PUE 为 24%，各省差异很大（NUE 为 12%~33%，PUE 为 10%~53%）^[43]；巨晓棠等^[44]研究表明，2003-2006 年太湖流域和华北平原作物种植的氮素利用率分别为 49.6%和 46.7%，刘伟等人^[45]指出，鄱阳湖流域的 PUE 从 1950 年的 31.33%显著提高至 48.47%。鄱阳湖流域种植系统氮磷利用率略高于全国平均水平，其一是由于肥料投加量的减少，氮肥由 2000 年的 4.7×10^5 t 降至 2022 年的 2.8×10^5 t，磷肥由 2.2×10^5 t 降至 1.4×10^5 t，在此期间，农作物的产量保持稳步增长，以适应 20 年来江西省人口 10%的增长率。养分利用效率与动物源性食品、果蔬的消费呈负相关^[46]，这 20 年来作物产品消费量有所增加，综合考虑各种影响因素，研究区域内养分利用效率有着小幅度上升。其二，过去 10 年，肥料累积回收效率的提高进一步支持了这一趋势，合成氮的累积回收效率从 40%逐渐提高到 45%^[47]，有效减少了化肥使用量并提高了作物对氮磷元素的吸收，从而促进了养分利用效率的整体增加。

从 2000 年到 2022 年，各流域的氮磷输入均值在空间分布上存在差异：修水流域总氮总磷输入均值分别为 $(101\ 312 \pm 11\ 660)$ TN/a 和 $(22\ 856 \pm 4\ 398)$ TP/a，饶河流域总氮总磷输入均值分别为 $(81\ 529 \pm 7\ 221)$ TN/a 和 $(22\ 960 \pm 6\ 982)$ TP/a，信江流域分别为 $(87\ 075 \pm 7\ 989)$ TN/a 和 $(28\ 997 \pm 4\ 753)$ TP/a，抚河流域均值分别为 $(97\ 685 \pm 11\ 675)$ TN/a 和 $(20\ 421 \pm 4\ 611)$ TP/a，赣江流域总氮总磷输入均值分别为 $(170\ 957 \pm 15\ 381)$ TN/a 和 $(49\ 410 \pm 9\ 570)$ TP/a，环湖区流域总氮总磷输入均值分别为 $(244\ 999 \pm 22\ 347)$ TN/a 和 $(57\ 893 \pm 13\ 454)$ TP/a。在过去的 20 年中，各支流的总氮输入呈现先上升后下降的时间序列趋势，并在 2010-2015 年期间达到峰值。这一现象在环湖区和赣江流域尤为明显，如

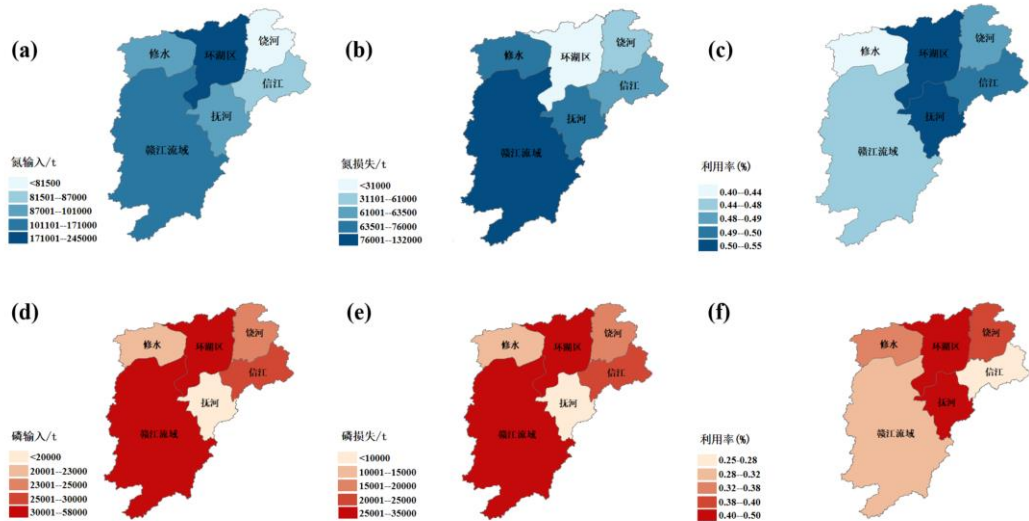


图 4 (a) 所示，这两个区域的氮磷输入量居于首位。这可能是因为这两流域面积广阔，流经了九江市、南昌市、上饶市等人口稠密区，赣江流域人口有近 976 万人，流域面积为 $8.01 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ，氮磷输入量较大；同时，这些地区处于农业生产和人类活动热点区域，活动水平数据高，鄱阳湖环湖区土地利用类型上有超过 40%的用地属于农田，占比远超其他支流。虽然在 2015 以后氮磷输入总量有所下降，但截至 2020 年，环湖区的氮磷输入量仍然相当高，分别为 2.8×10^5 t 和 1.8×10^5 t。同时，环湖区的氮磷损失通

量在六个区域内属于低水平

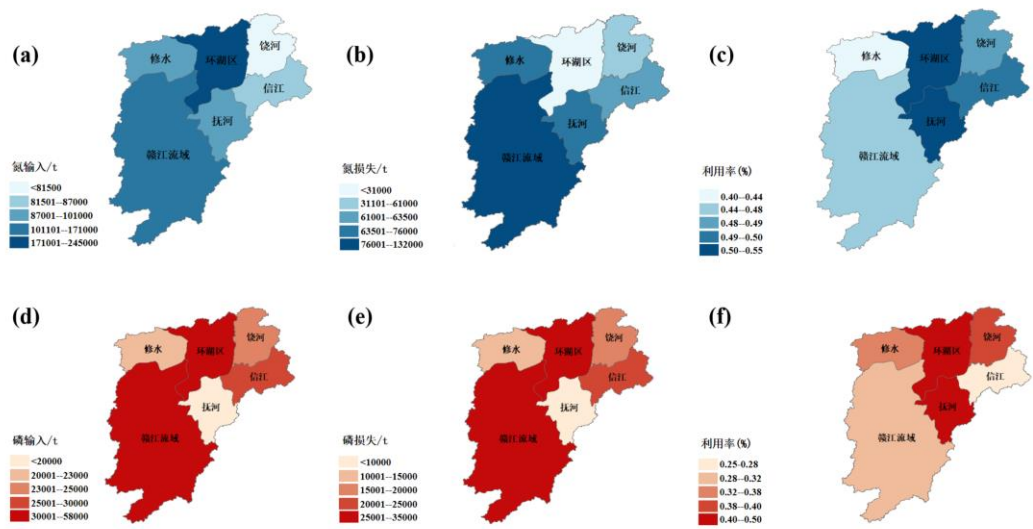


图 4 (b)，因此该地区的氮磷利用效率较高，分别为 67.4%和 46.25%。相比之下。赣江流域由于损失量较大，其氮磷利用率反而处于低水平，为 59.3%和 31.31%

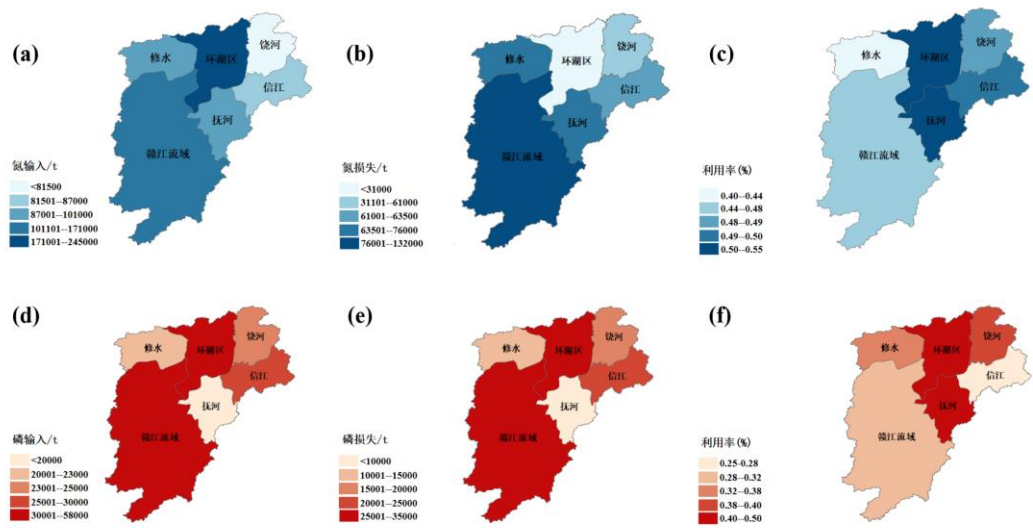


图 4 (c)。

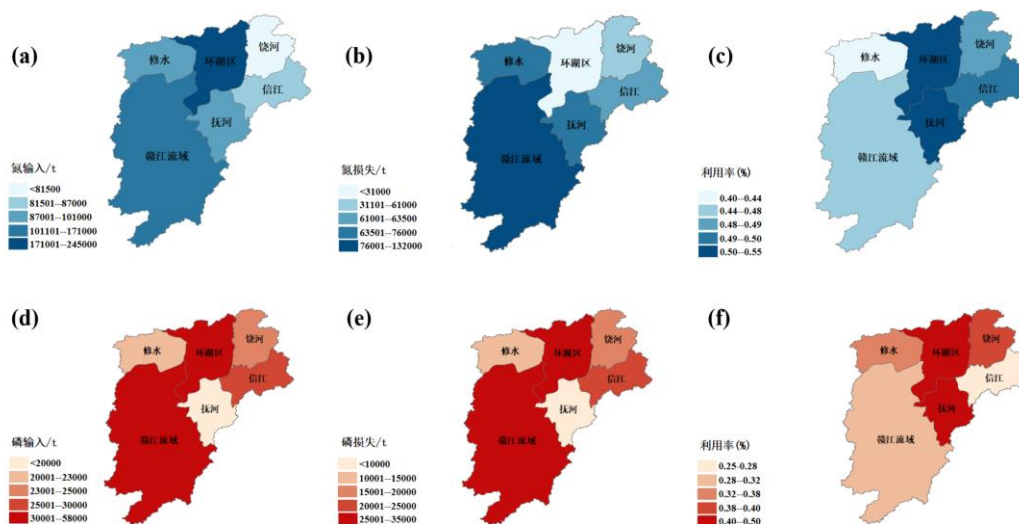


图 4 研究区域支流氮磷空间分布情况：

(a) 氮输入通量；(b) 氮损失量；(c) 氮利用率情况；(d) 磷输入通量；
(e) 磷损失量；(f) 磷利用率情况

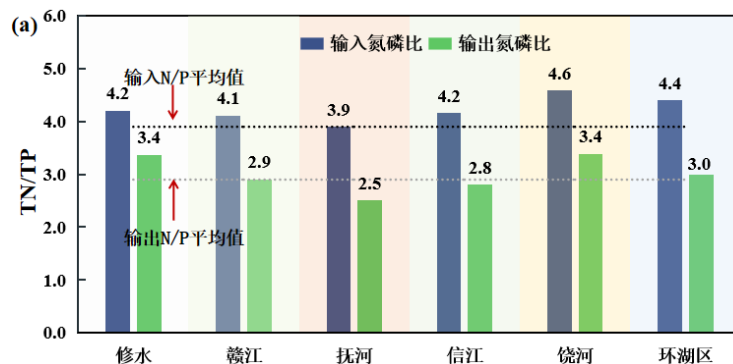
Fig.4 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus in tributaries of the study area

(a) Nitrogen input fluxes; (b) Nitrogen loss amounts; (c) Nitrogen utilization rates; (d) Phosphorus input fluxes;
(e) Phosphorus loss amounts; (f) Phosphorus utilization rates

氮磷代谢模式对流域环境承载能力具有重要影响。其代谢过程，如底泥的吸附与释放、硝化和反硝化作用等，直接影响水体的营养状态和富营养化潜力。在水体中，溶解态氮的去除主要依赖于微生物的反硝化作用和藻类的合成代谢过程，而磷的去除则主要通过藻类的同化作用来实现。水环境中的有机物和总氮促进了细菌群落的多样性和代谢活动，而细菌的代谢活动又推动了沉积物中磷的释放^[48, 49]。氮磷代谢通过调控初级生产力、维持水体营养状态、影响微生物群落结构与功能以及调节沉积物-水界面的物质交换等多个方面，对流域环境承载能力产生重要影响。

2.2 系统氮磷比

氮磷比 (N/P) 是影响作物生长和代谢的关键因素之一，通过计算养分投入量、产出量氮磷比，可对土壤 N 饱和度进行评估，并揭示土壤中养分有效性和限制水平^[50]。作物生长受 N 和 P 限制的 N/P 阈值为 14 和 16，当 N/P 比小于 14，表明作物生长受 N 限制，生物固氮作用会更显著，以消纳环境中相对较多的磷；而 N/P 比大于 16 表示作物生长受 P 限制^[51]。鄱阳湖流域种植系统氮磷比从 2000 年至 2022 年平稳下滑，通过肥料等输入的 N/P 由 2000 年的 4.66 降至 2022 年 3.97，排放到环境、储存于土壤中的 N/P 由 3.73 降至 2.74，均低于 14 的临界值。据研究，全国土壤表层的全氮和全磷平均含量分别为 1.86 g/kg 和 0.78 g/kg，中国农田 N/P 为 3.28^[51, 52]，鄱阳湖流域农田系统氮磷比略高于中国其他区域（图 5）。



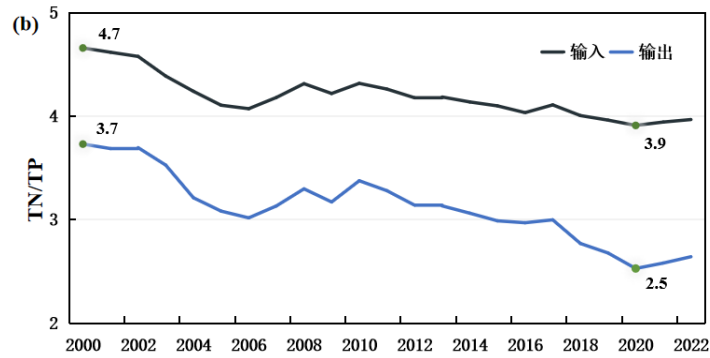


图 5 区域 N/P 情况：（a）为种植系统各支流养分输入输出 N/P 比，
（b）为 2000-2022 年研究区域输入输出 N/P 比

Fig.5 Regional N/P ratios : (a) N/P ratios of nutrient input and output in the cultivation system, (b) N/P ratios of input and output in the study area from 2000 to 2022.

2020 年，鄱阳湖种植系统输入平均氮磷比为 3.9，输出平均氮磷比为 2.9，这种差异主要是由于氮和磷的化学循环存在不同的动态特性。氮在还原条件倾向反硝化作用以气态流失，且易随水流动和淋溶流失；而磷则易在土壤中沉积并固持，长期的磷肥施用导致土壤内磷累积，加之作物对磷肥的利用率不高，使大量磷肥截留至环境中。因此，种植系统的输入和输出之间的氮磷比存在显著差异。区域上，处于饶河的农田输入氮磷比较高，为 4.6，抚河流域截留至环境中的氮磷比较低，为 2.5，总体来说，其氮磷比并没有显著区域的异质性。在养分总投入上，氮磷输入量都处于过量的状态，依然存在大量营养元素未利用而暂时封存在土壤中，但在肥料投入组分上，施加比例还是处于失衡状态，输入氮磷比远低于 14，N/P 化学计量变化可以表明植物营养限制模式，在氮磷输入都过量的条件下，该值说明相较于磷元素，系统对氮元素的需求更明显，秦伯强对不同湖泊类型中营养限制的研究指出，在深度大于 20 米的富营养化湖泊中，氮限制更可能起主导作用，这与鄱阳湖的现状相符^[53]。因此，治理种植系统的氮磷问题，应着重调控氮磷平衡，可通过调整肥料成分、优化轮作模式、增加高吸磷作物等措施来降低土壤磷盈余^[54]。

研究显示，与常规化肥相比，施用有机肥的土壤氮磷比显著较高，并且随着有机肥施用年限的增加，氮磷比呈下降趋势^[55]。在预设情景中，通过提高秸秆还田率，氮磷比从 2.53 增至 3.9，而通过调整肥料施用，输出氮磷比升至 5.3，变化显著。这与上述研究一致，表明虽然有机肥能增加土壤养分储备，但对土壤养分平衡的调控作用有限。因此，未来需要考虑采用新型肥料来进一步调整土壤肥力，以实现作物的可持续生产。

2.3 情景分析减排效应

化肥的减量施用和秸秆还田对氮磷污染减排具有显著效果，特别是减少化肥使用量在减少污染排放方面效果更显著，与基准情景相比，通过径流和淋溶排放至环境的氮减少了 6.77×10^4 t，实施减少氮肥施用措施，预计到 2050 年将累计减少氮污染物排放 1.37×10^5 t，相当于减少了 48.6% 的氮污染物。通过提高秸秆回收率将使径流和淋溶的氮污染物减少 2.18×10^4 t， NH_3 排放减少 7.5×10^3 t，秸秆还田不仅能够提供有机质和养分，还能改善土壤结构，增加土壤碳储量，从而减少氮素的挥发损失和磷素的流失。在综合措施下，通过有效普及化肥减量增效技术，并引导农民多用有机肥，提高有机肥替代化肥比例，预计到 2050 年，种植系统的氮污染物排放量将减少 1.50×10^5 t 如图 6。

在磷污染物排放上，与基准情景相比，通过减少化肥施用将使环境磷污染排放减少 8.8×10^3 t；与 S2 情景类似，增加秸秆还田情景最大的减排效益同样体现在由径流淋溶产生的磷污染排放上，S3 情景将使磷污染排放减少共 2.0×10^3 t；在 S4 情景下，到 2050 年，可减少磷污染排放 9.4×10^3 t，相当于减少了 43% 的磷污染排放，同时，排入环境中的 N/P 比，将由基准的 2.5 升至 6.3，意味着通过综合措施，可以改善种植系统内营养结构，有利于作物的生长。对比这三类措施，相比较而言协同减排措施是最有潜力与效果的选项，应当优先考虑。

以上结果表明，减少施肥量是减少种植过程中磷损失的有效方法，同时对秸秆进行回收利用对于氮磷

污染物的减排具有积极意义。为实现化肥减量，一种有效的方法是实施农田规模化管理，据预测，通过重新整合农田规模，可使肥料的使用量减少 26%^[56]。其次，有机废弃物是一种错放的资源，经过适当处理，可显著提高土壤肥力，根据目前秸秆综合利用情况和养分还田率，还田的养分可替代约 19.38% 的氮肥、23.28% 的磷肥^[57]。

近年来，鄱阳湖流域的几个城市的政府已经实施了一些政策来降低种植系统氮磷污染。南昌市生态环境局于 2021 年发布《农业面源污染治理与监督指导实施方案（试行）》办法，抚州市政府印发《关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的实施意见》等，旨在实现分区治理，进一步优化农业生产布局。江西是农业大省，耕地面积 4600 多万亩，常年农作物播种面积 8300 万亩以上，农作物秸秆资源丰富^[25]。为推动秸秆农用产业发展，江西省积极探索适合自身发展的秸秆综合利用新模式，因地制宜发展秸秆利用产业，发展秸秆纤维原料生产，草腐食用菌等产业，为其他流域氮磷污染综合治理提供借鉴。

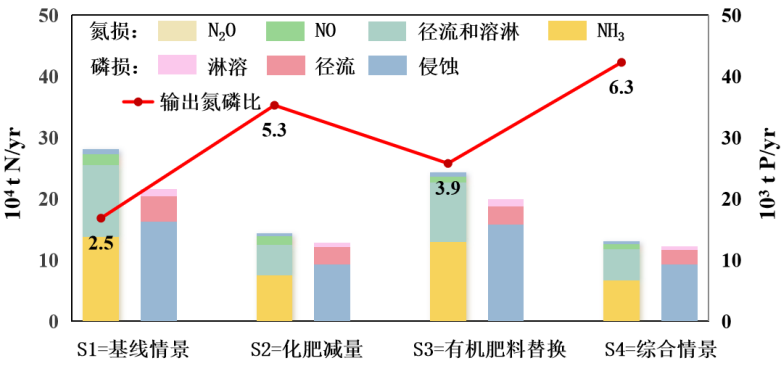


图 6 不同情景下氮磷污染物排放变化趋势

Fig.6 Trends in nitrogen and phosphorus pollutant emissions under different scenarios

2.4 不足与展望

研究基于物质流分析对 2000-2022 年鄱阳湖流域农业种植系统的氮磷负荷进行了核算，旨在为未来的水环境治理提供参考依据，但研究过程中亦存在若干局限性。首先，研究数据主要来源于政府统计数据、实地调研和专家咨询得出，而核算系数则基于已发表文献和统计资料，这些数据可能由于口径不同而存在一定的不确定性和误差，对核算结果的准确性产生影响；其次，当前宏观尺度上对氮磷循环的研究往往偏重于对单一营养元素的分析，且对湖泊富营养化与农业活动的耦联关系研究不够深入，对氮磷在种植系统中的综合行为认知有限。鉴于此，未来的研究重点将放在深入理解湖泊富营养化的耦联关系上，系统探究湖泊富营养化现象与营养盐输入、水文气象条件、生态系统变化、内源污染以及人类活动之间的复杂相互作用，揭示其内在机理。同时，可借助遥感技术和机器学习模型，提供大范围、高频率的监测数据，来提高对农业系统影响和湖泊富营养化过程的理解，为湖泊管理和保护提供更加精确的数据支持。

3 政策建议

为进一步改善鄱阳湖流域氮磷失衡现状，基于研究结论，提出流域氮磷综合治理政策建议如下：

（1）优化种植系统肥料投入结构。氮磷输入量的持续增加、利用效率低下、循环速率下降是鄱阳湖流域氮磷管理污染控制的主要障碍，为了最大限度地减少污染物排放，建议从以下三方面进行突破：建立基于土壤养分监测的精准施肥技术体系，从源头控制肥料投入；其次，应调动农民使用有机肥的积极性，实施有机肥替代专项补贴政策，对施用有机肥的农户给予每亩 200~300 元补贴；此外，农业部门应加强缓释肥、微生物菌剂等高效肥料研发与推广，尽可能减少氮磷在种植环节中的流失。

（2）构建氮磷协同治理体系。情景分析表明，综合措施可削减 53.4% 的氮磷排放，为了实现这个目标，需多部门协同发力。建议重点推进“农业-生态-水利”跨部门协作机制，将氮磷减排目标纳入河湖长制考核，积极发挥政府在鄱阳湖流域氮磷治理方面的主导作用。

4 结论

（1）2000-2022 年鄱阳湖流域种植系统氮磷输入通量呈“先增后减”的趋势，峰值出现在 2015 年前后，与我国农业面源污染治理政策的实施时段高度耦合。其中肥料始终是氮磷输入的主要来源（占比

46.8%~63.7%），但其贡献率近年来有所下降（氮源累计降低 14.1%，磷源降低 14.7%），表明种植系统有机肥替代策略初显成效。

(2)流域氮磷利用效率（NUE=48.5%，PUE=31%）虽高于全国均值，但与发达国家氮磷利用率水平还存在一定的差距。其次，流域养分输入 N/P 比（3.9）显著低于作物营养限制阈值，氮磷输入结构需要进一步优化。

(3)化肥减量与秸秆还田的协同实施，是解决养分利用效率低下和相关环境后果的直接有效方法，基于此，构建“精准施肥-有机替代-秸秆循环”养分管理体系，是鄱阳湖流域农业绿色转型，突破效率瓶颈并降低生态风险的重要措施。

5 参考文献

- [1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2016, 2(2):e1500323.DOI:10.1126/sciadv.1500323.
- [2] Huang J, Xu C, Ridoutt B G, et al. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159:171-179.DOI:10.1016/j.jclepro.2017.05.008.
- [3] Wang XL,Song BQ. Nitrogen fertilizer use efficiency: Research progress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36 (5), 93–97. [王响玲, 宋柏权. 氮肥利用率的研究进展. 中国农学通报, 2020,36(05):93-97.]
- [4] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Ecology controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, 323(5917):1014-1015.DOI:10.1126/science.1167755.
- [5] Zhang Y, Song C, Ji L, et al. Cause and effect of n/p ratio decline with eutrophication aggravation in Shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 2018, 627:1294-1302.DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.01.327.
- [6] Chen J, Li YL, Zhou JF, et al. Assessing surface water-groundwater interactions in the seasonal lake-wetland system of Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 842-853. [陈静, 李云良, 周俊锋, 等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖湿地系统地表地下水交互作用. 湖泊科学, 2021, 33(03):842-853.]
- [7] Zhang C, Su G, Li X. Changes in nutrient concentrations and limitations of Poyang Lake associated with socioeconomic development in the watershed from 1978 to 2021. *Water*, 2023, 15(18):3304.DOI:10.3390/w15183304.
- [8] Ge Y, Wu Z, Chen Y, et al. Cascading effects of human activities and enso on the water quality of Poyang Lake in China. *Catena*, 2024, 246.DOI:10.1016/j.catena.2024.108380.
- [9] Fang C, Hua W, Yi-Chuang Z, et al. Estimation of total phosphorus load to Poyang Lake Basin by watershed division. *China Rural Water & Hydropower*, 2024(1).
- [10] Bouwman L, Goldewijk K K, Van Der Hoek K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52):20882-20887.DOI:10.1073/pnas.1012878108.
- [11] Kemanian A R, Julich S, Manoranjan V S, et al. Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model swat : theory and model testing.*Ecological Modelling*, 2011, 222(12):1913-1921.DOI:10.1016/j.ecolmodel.2011.03.017.
- [12] Han Y, Fan Y, Yang P, et al. Net anthropogenic nitrogen inputs (nani) index application in mainland China. *Geoderma*, 2014, 213:87-94.DOI:10.1016/j.geoderma.2013.07.019.
- [13] Hu L, Wang L G, Li J Z, et al. The development of China-Dndc and review of its applications for sustaining Chinese agriculture. *Ecological Modelling*, 2017, 348:1-13.DOI:10.1016/j.ecolmodel.2017.01.003.
- [14] Hu M, Liu Y, Zhang Y, et al. Long-Term (1980 - 2015) changes in net anthropogenic phosphorus inputs and riverine phosphorus export in the Yangtze River Basin. *Water Research*, 2020, 177.DOI:10.1016/j.watres.2020.115779.
- [15] Li ST, Jin JY. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (20), 4207–4229. [李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡. 中国农业科学, 2011, 44(20):4207-4229.]
- [16] Liu X, Zhang D, Wu H, et al. Uncovering the spatio-temporal dynamics of crop-specific nutrient budgets in China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 340:117904.DOI:10.1016/j.jenvman.2023.117904.

- [17] Wu H, Yang T, Liu X, et al. Towards an integrated nutrient management in crop species to improve nitrogen and phosphorus use efficiencies of chaohu watershed. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272:122765.DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122765.
- [18] Wang X, Feng A, Wang Q, et al. Spatial variability of the nutrient balance and related npsp risk analysis for agro-ecosystems in China in 2010. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 193:42-52.DOI:10.1016/j.agee.2014.04.027.
- [19] Deng X, Zhao Y, Wu F, et al. Analysis of the trade-off between economic growth and the reduction of nitrogen and phosphorus emissions in the Poyang Lake watershed, China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2):330-336.DOI:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.032.
- [20] Cui M, Guo Q, Wei R, et al. Anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs in a new perspective: Environmental loads from the mega economic zone and city clusters. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283:124589.DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124589.
- [21] Yang J, Li M, Liu L, et al. Dynamic characteristics of net anthropogenic phosphorus input to the upper Yangtze River basin from 1989 to 2019: Focus on the phosphate ore rich area in China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347:119140.DOI:10.1016/j.jenvman.2023.119140.
- [22] Fu H, Xie X, Zhao K, et al. Tracking social-economic system nitrogen flow in China for emissions reduction and efficiency improvement. *Resources Conservation and Recycling*, 2024, 207:107661.DOI:10.1016/j.resconrec.2024.107661.
- [23] Li H, Zhu X, Wang J, et al. Unraveling differential characteristics and mechanisms of nitrogen uptake in wheat cultivars with varied nitrogen use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 206:108278.DOI:10.1016/j.plaphy.2023.108278.
- [24] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[学位论文]. 中国农业科学院, 2018.
- [25] Ladha J K, Peoples M B, Reddy P M, et al. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research*, 2022,283:34.
- [26] 刘晓利. 我国“农田—畜牧—营养—环境”体系氮素养分循环与平衡[学位论文]. 河北农业大学, 2005.],
- [27] Chaopu T I, Yan X, Xia L, et al. Improving Nitrogen Safety in China: Nitrogen Flows, Pollution and Control. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9(3): 465–474.DOI:10.15302/J-FASE-2022454, 2022,9(3):10.
- [28] Tan J, Su H, Itahashi S, et al. Quantifying the wet deposition of reactive nitrogen over China : Synthesis of observations and models. *Science of the Total Environment*, 2022,851:10.
- [29] Luo Z, Hu S, Chen D. The trends of aquacultural nitrogen budget and its environmental implications in China. *Scientific Reports*, 2018,8.DOI:10.1038/s41598-018-29214-y.
- [30] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012,156:1-11.
- [31] Zhou J,Cui J, Wang QG, et al. Nitrogen balance and cycling in pasture ecosystem in south China. *Soils*, 2008(03):386-391. [周静, 崔健, 王国强, 等. 我国南方牧草生态系统氮素平衡与循环特征研究. 土壤, 2008(03):386-391.]
- [32] He W, Jiang R, He P, et al. Estimating soil nitrogen balance at regional scale in China's croplands from 1984 to 2014. *Agricultural Systems*, 2018, 167:125-135.DOI:10.1016/j.agsy.2018.09.002.
- [33] Jiang S, Yuan Z. Phosphorus flow patterns in the chaohu watershed from 1978 to 2012. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24):13973-13982.DOI:10.1021/acs.est.5b03202.
- [34] Liu X, Yuan Z, Liu X, et al. Historic Trends and future prospects of waste generation and recycling in China's phosphorus cycle. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(8):5131-5139.DOI:10.1021/acs.est.9b05120.
- [35] Shen W, Li S, Zhuang Y, et al. Phosphorus use efficiency has crossed the turning point of the environmental kuznets curve: opportunities and challenges for crop production in China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326.DOI:10.1016/j.jenvman.2022.116754.
- [36] Zou T, Zhang X, Davidson E A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges. *NATURE*, 2022,611(7934):81.
- [37] Snyder C S, Davidson E A, Smith P, et al. Agriculture : sustainable crop and animal production to help mitigate nitrous oxide emissions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014,9-10:46-54.
- [38] Ding X, Wu Y, Zheng B, et al. Assessment of nitrogen, phosphorus and potassium flows in China's food system during 2010-2019: Implications for integrated management. *Resources Conservation and Recycling*, 2024, 207.DOI:10.1016/j.resconrec.2024.107652.
- [39] Zhou J, Jiao X, Ma L, et al. Model-based analysis of phosphorus flows in the food Chain at county level in China and options for

- reducing the losses towards green development. *Environmental Pollution*, 2021, 288.DOI:10.1016/j.envpol.2021.117768.
- [40] Xu X, Ye Y, Li J, et al. Ghg emissions of straw treatments in rural China and scenario simulation based on life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377.DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134377.
- [41] 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知. 中华人民共和国农业部公报, 2015(03):19-27.
- [42] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1-3):140-152.DOI:10.1016/j.scitotenv.2008.06.031.
- [43] Wang M, Ma L, Strokal M, et al. Exploring nutrient management options to increase nitrogen and phosphorus use efficiencies in food production of China. *Agricultural Systems*, 2018, 163:58-72.DOI:10.1016/j.agsy.2017.01.001.
- [44] Ju X, Xing G, Chen X, et al. Reducing environmental risk by improving n management in intensive chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9):3041-3046.DOI:10.1073/pnas.0902655106.
- [45] Liu W, Qin T, Wu M, 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. *Water Research*, 2023, 245:120546.DOI:10.1016/j.watres.2023.120546.
- [46] Bai Z, Ma L, Ma W, et al. Changes in phosphorus use and losses in the food Chain of China during 1950-2010 and forecasts for 2030. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(3):361-372.DOI:10.1007/s10705-015-9737-y.
- [47] You L, Ros G H, Chen Y, et al. Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices. *Nature Communications*, 2023, 14(1).DOI:10.1038/s41467-023-41504-2.
- [48] Shou C, Yue F, Zhou B, et al. Chronic increasing nitrogen and endogenous phosphorus release from sediment threaten to the water quality in a semi-humid region reservoir. *Science of the Total Environment*, 2024, 931.DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.172924.
- [49] Liu J, Feng Y, Zhang Y, et al. Allometric releases of nitrogen and phosphorus from sediments mediated by bacteria determines water eutrophication in coastal river basins of Bohai Bay. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 235.DOI:10.1016/j.ecoenv.2022.113426.
- [50] Abrar M M, Xu H, Aziz T, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry mediate sensitivity of carbon stabilization mechanisms along with surface layers of a mollisol after long-term fertilization in northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(2):705-723.DOI:10.1007/s11368-020-02825-7.
- [51] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3):523-534.DOI:DOI 10.1046/j.1365-2664.2003.00820.x.
- [52] Du Y, Song JY, Zhang YL, et al.effects of mowing on leaf internal stability and leaf and soil stoichiometric characteristics of legumes and non-legumes. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1513-1521. [杜艺, 宋俊阳, 张玉林,等.刈割对豆科和非豆科植物叶片内稳性及叶片土壤化学计量特征的影响. 草地学报, 2024, 32(05):1513-1521.]
- [53] Qin B, Zhou J, Elser J J, et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6):3191-3198.DOI:10.1021/acs.est.9b05858.
- [54] Chen Y, Hu S, Guo Z, et al. Effect of balanced nutrient fertilizer: A case study in pinggu district, Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 754.DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.142069.
- [55] Song YH, Ai ZM, Qiao LL, et al.effects of fertilization on ecological stoichiometric ratio soil carbon,nitrogen and phosphorus in farmland of the Loess Plateau.*Soil and Water Conservation*, 2019, 26(06):38-45+52. [宋亚辉, 艾泽民, 乔磊磊,等.施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响. 水土保持研究, 2019, 26(06):38-45. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.006]
- [56] Wu YY, Xi XC, Tang X, et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (27) 7010-7015.DIO:10.1073/pnas.1806645115.
- [57] Li Y, Wang QB. Study on potential of straw resource nutrient return to field and application technology in China. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(01):119-126. [李一, 王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析. 中国土壤与肥料, 2020(01):119-126.]

