

· 研究报告 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rds wxb.20240186



主持人: 吴少英

Open Access

海南岛 1990—2020 年食物链系统磷素流动分析

——历史变化与未来优化路径

王丹丹^{1,2#}, 李子琛^{1,2}, 马继勇³, 赵洪伟^{1,2*}

(1. 海南省热带生态环境修复工程研究中心, 海南 海口 570228 中国; 2. 海南大学 生态学院, 海南 海口 570228 中国; 3. 海口海洋地质调查中心, 海南 海口 571127 中国)

摘要: 本研究以海南岛食物链系统为研究对象, 基于食物链养分流动模型(NUFER)定量计算 1990—2020 年磷素流动变化特征, 探索磷素可持续利用途径。研究结果表明, 在 30 年间, 海南岛食物链系统中的作物生产子系统磷素投入总量从 135.92 kt 增长至 390.63 kt, 其中肥料投入是该子系统磷素的主要来源; 畜禽养殖子系统磷素投入总量从 13.70 kt 增加至 19.23 kt; 水产养殖子系统磷素投入总量从 6.32 kt 上升至 49.75 kt。本研究通过对海南岛食物链系统进行 2050 年情景模拟分析, 发现通过综合优化管理措施, 可减少磷素投入及磷素损失。未来海南岛食物链系统需控制磷素养分过量输入, 优化种植、养殖方式和技术手段, 并加强管理措施, 提高磷素利用效率(PUE)以减少磷素在各子系统之间的损失。同时, 还需促进海南岛食物链系统中各个子系统之间的协调关系, 实现磷素的高效可持续利用。

关键词: NUFER 模型; 食物链系统; 磷素流动; 历史变化特征; 情景分析

中图分类号: X2; X71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674 - 7054(2025)06 - 0949 - 12

王丹丹, 李子琛, 马继勇, 等. 海南岛 1990—2020 年食物链系统磷素流动分析——历史变化与未来优化路径[J]. 热带生物学报, 2025, 16(6): 949-960. doi: 10.15886/j.cnki.rds wxb.20240186

磷元素作为构成动植物的基本元素, 对动植物生长及全球粮食安全意义重大, 亦是食物链系统的重要养分资源^[1]。联合国粮农组织估计, 肥料中仅有 15%~30% 的磷被作物实际吸收, 原因在于肥料施用量远超植物需求^[2]。近半个世纪, 为满足快速增长的全球人口对粮食的大量需求, 磷肥施用量剧增, 引发土壤磷积累、水体富营养化等环境问题, 提高磷素利用效率迫在眉睫^[3-4]。诸多研究探讨了可持续磷利用的重要性及改善全球磷循环之法, 如改变饮食结构、减少食物浪费、优化作物系统内磷循环、改进施肥方法及提升畜禽饲料磷利用效率等^[5-6]。

鉴于磷的稀缺性、必要性、全球分布不均及区域产量过剩, 全球面临着严重的“磷挑战”, 磷流研究可以用来分析这些挑战, 为提高磷素利用效率找出潜在的解决方案^[7-8], 物质流分析方法(substance

flow analysis, SFA)是当前养分流动研究领域应用最为广泛的方法之一, 此方法以物质守恒定律为基础, 旨在对特定系统内物质的输入、输出、储存状况以及在系统各环节的转化过程进行量化分析, 以此来展现养分(如氮、磷等)在该系统中的流动路径与变化情形^[9]。作为世界上人口最多的国家, 中国农业生产集约化程度高, 但磷素利用效率较低, 农业生产和磷损失的环境效应大^[10]。中国是一个农业大国, 用不到全球 7% 的耕地养活了世界 18.5% 的人口, 为了应对快速增长的人口对粮食的大量需求, 磷肥的施用量大幅增加, 这导致土壤磷积累, 增加了土壤磷浓度^[11]。Ma 等^[12]量化了过去 30 年来中国区域尺度食物链中磷投入与磷排放、磷利用效率(PUE)之间的关系, 结果表明, 1980—2005 年间, 中国粮食生产和消费中的磷成本几乎翻了一番, 与其他国家相比, 中国的 PUE 相对较

收稿日期: 2024 - 12 - 11 修回日期: 2025 - 02 - 16

基金项目: 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2021008)

*第一作者: 王丹丹(1999—), 女, 海南大学生态学院 2022 级硕士研究生。E-mail: w18230553239@163.com

*通信作者: 赵洪伟(1983—), 男, 教授。研究方向: 海陆统筹污染防控与生态修复研究。E-mail: hwzhao@hainanu.edu.cn

低,因此,迫切需提高食物链系统中磷素利用效率。

随着海南岛经济发展与农业集约化水平提升,畜禽养殖业规模迅速扩大^[13]。尽管满足了肉类产品需求,但食物链系统的废弃物管理问题导致磷负荷升高,引发水体富营养化等环境问题^[14]。目前,国内外在磷素养分管理及提高磷利用效率方面已有大量研究,但尚无针对海南岛食物链系统中磷素的历史变化与损失途径特征研究相关报道,其磷素输入输出定量计算、利用效率、子系统账户损失特征及环境效应等尚不明确。本研究基于 NUFER 模型,分析了 1990—2020 年间海南岛食物链系统的磷素输入、输出、利用效率、损失途径及排放特征,明确了各子系统养分流动差异。本研究对实现海南岛食物链系统磷资源可持续利用、提高磷利用效率及降低环境风险具有重要意义。

1 材料与方

1.1 研究区域 海南岛为中国第二大岛,整体位于北纬 18°~20°,东经 108°~111°E 之间,地势呈中部高四周低的穹窿山地形,属热带海洋性季风气候,陆地总面积达 3.39 万 km²。常住人口从 1990 年的 655.74 万人增加到 2020 年的 1008.12

万人。1990—2020 年,本地经济发展迅速,GDP 从 1990 年的 102.42 亿元增加到 2020 年的 5532.39 亿元,至 2020 年,粮食产量 147 万 t,蔬菜产量 572.19 万 t,水果产量 494.61 万 t,生猪出栏量 262.25 万头,牛出栏量 20.02 万头,鸡出栏量 1.1 亿只,水产品总产量 135.8 万 t^[15-16]。

1.2 研究方法 食物链包括 4 个主要部分,分别为作物生产(包括土壤层)、动物生产(包括水产养殖)、食品加工以及家庭消费^[17]。本研究以 NUFER 模型为基础,将海南岛作为系统研究的边界范围。海南岛食物链系统由作物生产子系统、畜禽养殖子系统、渔业生产子系统、食品加工子系统以及家庭消费子系统构成,通过定量计算来明确海南岛食物链系统磷素流动的历史变化特征。

1.3 计算方法

1.3.1 数据来源 食物链系统(图 1-6,表 1-5)中的基础数据和信息(人口数量、化肥使用量、单位耕地面积人口数、作物种植面积和产量、蔬果产量、食品消费情况)来自海南省统计年鉴^[15]、相关研究及调研。肥料中磷素消耗量来源于磷肥中纯磷含量和复合肥中磷素纯养分含量。收获作物和动物产品中的磷含量、每种动物的排泄物磷含量

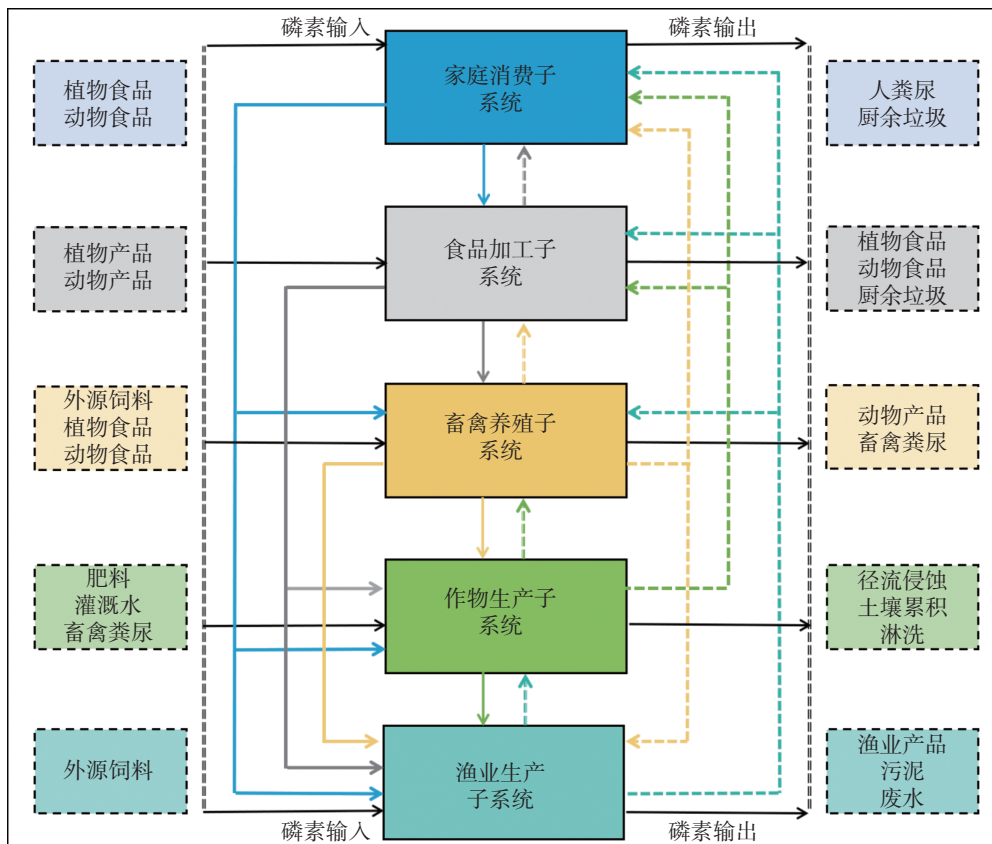


图 1 海南岛食物链系统磷流动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phosphorus flow in the food chain system of Hainan Island

及动物产品中可食用部分和其他部分的划分均从文献中获取。模型中涉及的养分含量、养分去向、排放系数等参数通过查阅文献获取。

1.3.2 参数来源

1.3.3 食物链系统磷素流动分析计算 食物链系统磷素养分的计算方法如下(单位: Gg=10³ t)^[26]:

$$\text{磷素总输入量} = \text{肥料含磷量} + \text{饲料外源输入含磷量} \quad (1)$$

式(1)中, 不包括大气磷沉降。

$$\text{磷素总输出量} = \text{植物性产品含磷量} + \text{动物性产品含磷量} + \text{径流、侵蚀、淋洗的磷素损失量} \quad (2)$$

一部分磷素累积于废弃物中, 即在家庭消耗

表 1 图 1 中英文对照表

Tab. 1 Figure 1: English-Chinese cross-reference

中文	英文	中文	英文	中文	英文
植物食品	Plant foods	家庭消费子系统	Household consumption subsystem	人粪尿	Human excrement
动物食品	Animal foods	食品加工子系统	Food Processing Subsystem	厨余垃圾	Food waste
植物产品	Plant products	畜禽养殖子系统	Livestock and poultry subsystem	径流侵蚀	Runoff erosion
动物产品	Animal products	作物生产子系统	Crop production subsystem	土壤累积	Soil accumulation
外源饲料	Exogenous feed	渔业生产子系统	Fisheries production subsystem	淋洗	Leaching
肥料	Fertilizer			渔业产品	Fishery products
灌溉水	Irrigation water			污泥	Sludge
畜禽粪尿	Animal manure and urine			废水	Wastewater

表 2 作物系统磷含量及去向

Tab. 2 Phosphorus content and fate in crop production subsystem

%

作物 Crop	果实(籽粒) 含磷量 Fruit (seed) phosphorus content	秸秆含磷量 Phosphorus content of straw	草谷比 Grass to grain ratio	卡路里含量 Calorie content	秸秆加工成 饲料比例 Proportion of straw processed into feed	秸秆还田比例 Proportion of straw returned to the field
小麦Wheat	1.600	0.08	1.10	301.5	14	78.75
玉米Maize	2.000	0.15	1.20	290.0	27	71.50
水稻Rice	0.600	0.13	0.90	376.0	16	77.50
谷物Cereal	0.280	0.10	1.00	256.0	58	30.75
高粱Sorghum	0.700	0.14	2.00	279.0	66	28.88
豆类Beans	0.600	0.19	1.00	229.0	34	62.25
薯类Potatoes	0.460	0.27	0.50	71.0	50	50.00
花生Peanuts	0.220	0.16	0.80	517.0	42	49.50
甘蔗Sucrose	0.170	0.14	0.33	59.0	10	33.13
蔬菜Vegetables	0.050	0	0	24.0	0	20.00
水果Fruits	0.030	0	0	41.0	0	100.00
橡胶Rubber	0.180	0.25	0	—	0	70.00
椰子Coconut	0.060	0.06	1.30	231.0	10	70.00
槟榔 Areca nut	2.400	0.22	0	87.0	10	70.00
胡椒Peppers	0.017	0.25	0	—	10	90.00

注: 主要参考相关研究^[17, 18-20]及调研。

Note: Referenced to the relevant studies^[17, 18-20] and survey.

表 3 畜禽系统磷含量及粪尿排放比例

Tab. 3 Phosphorus levels in livestock and poultry subsystem and proportion of manure and urine emissions

%

畜禽种类 Livestock species	主产品含磷量 Phosphorus content of main products	骨头含磷量 Bone phosphorus content	副产品含磷量 Phosphorus content of by-products	粪尿直接排放比例 Proportion of direct manure and urine discharges	粪尿磷素还田比例 Proportion of manure and urine phosphorus returned to the field
猪Hogs	0.17	0.33	2.2	10	90
奶牛Dairy cow	0.09	4.20	0	20	80
肉牛Beef cattle	0.17	4.20	2.0	20	80
水牛及黄牛 Buffalo and cattle	0.17	4.20	0	20	80
驴Donkey	2.83	—	0	5	95
马Horses	2.83	—	0	5	95
骡Mules	2.83	—	0	5	95
羊Goats	0.16	5.60	2.2	64	36
蛋鸡Laying hen	0.23	0	0	55	45

注: 主要参考相关研究^[17, 21-22]及调研。Note: Referenced to the relevant studies^[17, 21-22] and survey.

表 4 人类消费系统食品含磷量及人均消费量

Tab. 4 Phosphorus content and per capita consumption of foods in the household consumption subsystem

作物 Crop	食品含磷量/% Phosphorus content of food/%	农村人均年消费量/kg Annual per capita rural consumption/kg	城市人均年消费量/kg Annual per capita urban consumption/kg
小麦Wheat	0.260	6.84	6.67
玉米Maize	0.270	3.76	3.49
水稻Rice	0.120	98.10	54.96
谷物Cereal	0.220	1.00	1.00
高粱Sorghum	0.320	1.00	1.00
豆类Beans	0.480	13.07	5.05
薯类Potatoes	0.140	7.46	9.12
花生Peanuts	0.310	5.00	1.00
甘蔗Sucrose	0.003	5.00	1.00
蔬菜Vegetables	0.050	98.00	97.71
水果Fruits	0.030	16.73	39.35
椰子Coconut	0.090	10.00	1.00
槟榔Areca nut	2.700	1.00	1.00
胡椒Peppers	0.010	1.00	1.00

注: 主要参考相关研究^[17, 23]及调研。Note: Referenced to the relevant studies^[17, 23] and survey.

中产生的排泄物及生活厨余垃圾等的磷素养分, 其计算公式为:

$$\text{磷素累积量} = \text{磷素总输入量} - \text{磷素总输出量} \quad (3)$$

土壤磷素盈余量 = 农田输入磷素量 - 农田输出磷素量 (4)

式(4)中, 农田输入磷素量 = 磷肥投入量 + 秸秆

表 5 渔业生产系统磷含量及饲料含磷量、可食用比例

Tab. 5 Phosphorus levels in fisheries production subsystem, phosphorus content of feeds, and edible proportions %

种类 Types	主产品含磷量 Phosphorus content of main products	副产品含磷量 Phosphorus content of by-products	饲料含磷量 Feed phosphorus content	可食用比例 Edible proportion
淡水鱼Freshwater fish	0.170	0.27	0.26	50.1
淡水虾蟹Freshwater shrimps and crabs	0.220	0.10	0.30	41.2
淡水贝类Freshwater shellfish	0.001	0	0.31	39.0
淡水藻类Freshwater algae	0.300	0	0.29	98.0
淡水其他Freshwater other	0.270	—	0.30	98.0
海水鱼Marine fish	0.160	0.01	0.91	57.0
海水虾蟹Seawater shrimps and crabs	0.290	0.77	0.27	58.8
海水贝类Marine shellfish	0.100	0.17	0.32	41.0
海水藻类Marine algae	0.170	1.32	0.34	98.0
海水其他Seawater others	0.140	—	0.30	98.0

注: 表格中来自相关研究^[24-25]及调研。

Note: Referenced to the relevant studies^[24-25] and survey.

还田量+有机肥还田量。

食物链系统磷素利用效率公式^[27]:

$$\text{作物生产系统磷素利用效率(PUEc)(\%)} = (\text{主要农产品输出}/\text{作物生产输入}) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{畜禽生产系统磷素利用效率(PUEa)(\%)} = (\text{畜禽产品输出}/\text{畜禽生产输入}) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{家庭消费系统磷素利用效率(PUEh)(\%)} = (\text{农村、城市人食品磷素输出}/\text{农村、城市人食品生产输入}) \times 100 \quad (7)$$

$$\text{食物链磷素利用效率(PUEf)(\%)} = (\text{食品磷素输出}/\text{磷素生产总输入}) \times 100 \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 海南岛食物链系统中磷元素的输入与输出变化趋势

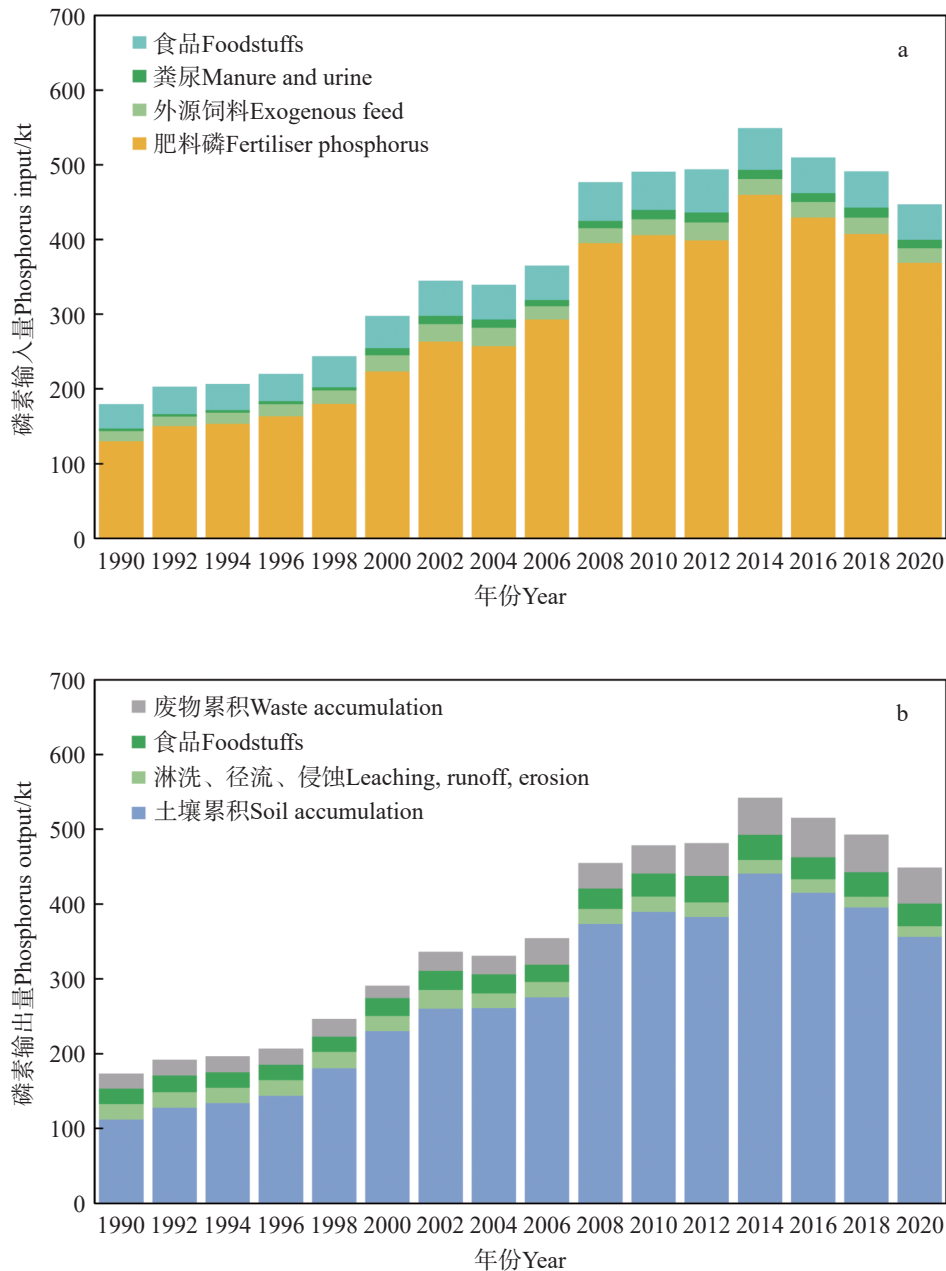
海南正处于建设“自由贸易港”的关键时期,需确保经济协调发展,农业与生态并重。自建省以来,海南农业水平虽快速提高,但仍存在诸多矛盾。一方面,要突出生态文明建设,同时发展高质量农业;另一方面,要保障农业产量有效提升,确保化肥减施得以贯彻落实^[14]。1990—2020年,随着经济作物种植面积的持续扩大,磷肥输入量也随之增加,从输入项来看,主要包括食品、外源饲料、粪尿及肥料磷输入。海南岛食物链系统中食品磷素输入量由1990年的32.46 kt增加至2020

年的47.43 kt,增长了46%;外源饲料磷素输入量由1990年的13.70 kt增加至2020年的19.23 kt,增长了40%;粪尿磷素输入量由1990年的3.39 kt增加至2020年的11.55 kt,增长了2.40倍;肥料磷素输入量由1990年的129.99 kt增加至2020年的369.06 kt,增长了1.80倍(图2-a)。

1990—2020年,海南人口急剧增长,产业结构优化升级,海南作为著名旅游胜地,每年接待的游客数量众多,这不仅使得对食物的需求大幅增加,而且也导致了磷素输入、输出量的增加。居民饮食结构的改变加剧了这一趋势,对蔬果和畜禽类产品的需求持续增加,动物性食品消费的快速增加进一步影响了磷素的流动^[28]。从输出项来看,主要包括废物累积、食品、淋洗、径流、侵蚀及土壤累积输出。海南岛食物链系统中废物累积磷素输出量由1990年的6.20 kt增加至2020年的48.23 kt,增长了6.77倍;海南岛食物链系统中食品磷素输出量由1990年的13.52 kt增加至2020年的30.13 kt,增长了1.22倍;海南岛食物链系统中淋洗、径流、侵蚀磷素输出量由1990年的3.16 kt增加至2020年的10.06 kt,增长了2.18倍;海南岛食物链系统中土壤累积磷素输出量由1990年的112.00 kt增加至2020年的356.42 kt,增长了2.18倍(图2-b)。

2.2 海南岛食物链系统中磷元素的损失情况

1990—2020年,海南岛食物链系统各个子系统磷



a. 磷素输入; b. 磷素输出

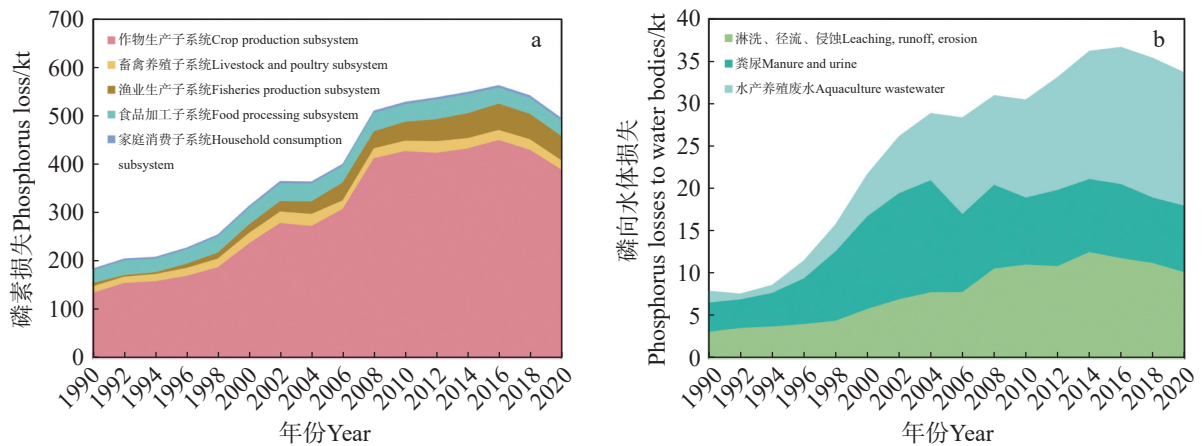
a. Phosphorus input; b. Phosphorus output

图 2 海南岛食物链系统磷流变化

Fig. 2 Changes in phosphorus flow in the food chain system of Hainan Island

素损失情况差异较大,其中作物生产子系统磷素损失占比较大,由1990年的135.92 kt增至2020年的390.63 kt,增长了1.86倍;畜禽养殖子系统磷素损失由1990年的13.70 kt增至2020年的19.23 kt,增长了0.46倍;水产养殖子系统磷素损失由1990年的6.32 kt增至2020年的49.75 kt,增长了7.16倍;食品加工子系统磷素损失由1990年的26.14 kt增至2020年的31.87 kt,增长了19%;人类消费子系统磷素损失由1990年的3.78 kt增至2020年的5.54 kt,增长了0.46倍(图3-a)。径流、

侵蚀、淋洗磷素向水体的损失由1990年的3.17 kt增至2020年的10.17 kt,增长了2.20倍;粪尿磷素向水体的损失由1990年的3.43 kt增至2020年的7.82 kt,增长了1.27倍;渔业养殖废水磷素向水体的损失由1990年的1.38 kt增至2020年的15.66 kt,增长了10.34倍(图3-b)。随着海南岛人口不断增长,为了满足不断增长的人口对食物的需求,植物性、动物性食品消费不断扩大,大量的磷通过淋滤、径流或直接排放进入土壤和水体,导致了藻类过度生长、水质恶化、水生生物多样性丧



a. 各子系统磷素损失; b. 磷素向水体的损失
a. Phosphorus loss from each subsystem; b. Phosphorus loss to the water column
图 3 海南岛食物链系统磷损失

Fig. 3 Phosphorus loss from the food chain system in Hainan Island

失等一系列生态环境问题,造成大量经济损失^[29]。

2.3 海南岛食物链系统中磷元素的利用效率分析

随着全面深化改革开放,海南岛经济快速发展,海南自由贸易港建设蓬勃兴起,人口数量也随之增加,对食品需求的增加导致磷素的大量投入。从海南岛食物链系统来看(图 4),1990—2020 年,食物链系统磷利用效率从 12.36% 降至 5.21%,一方面人口和粮食需求在持续增长,导致磷肥投入量持续增加,另一方面多余磷肥无法被有效利用,导致一系列环境问题^[30]。农田磷综合利用效率从 12.44% 降至 5.53%,土壤对磷素吸附能力较强,导致磷在土壤中难以移动,加上对农田的磷肥投入量大于作物的需求量,导致大量磷素在土壤中堆积,降低了农田磷素利用效率^[31]。畜禽生产子系统中,畜禽磷综合利用效率从 4.33% 提高至 6.04%,虽然利用效率有所提高,但仍远低于全国的平均水平(17%),随着畜禽养殖的规模化、集约化发展,畜禽粪尿大量产生,但由于养殖体系的不完善,畜禽粪尿未能及时处理和利用,多余磷素流入各个子系统,造成磷素的损失^[32]。Bai 等^[33]利用 NUFER 模型,对 1950—2010 年中国磷利用变化及磷损失进行了综合评估,研究结果显示食物链中的磷利用效率从 1950 年的 35% 下降到 2010 年的 6%。该结果与海南岛食物链系统磷养分利用效率较低且持续下降、磷损失高且持续增加的历史演变规律相似,揭示了海南岛食物生产和消费的资源环境代价增速很快^[34-35]。

目前磷素利用效率整体水平仍有待提高,缺乏一套完善的、针对不同土壤和作物类型的磷素高效利用技术体系,农民在施肥过程中难以做到

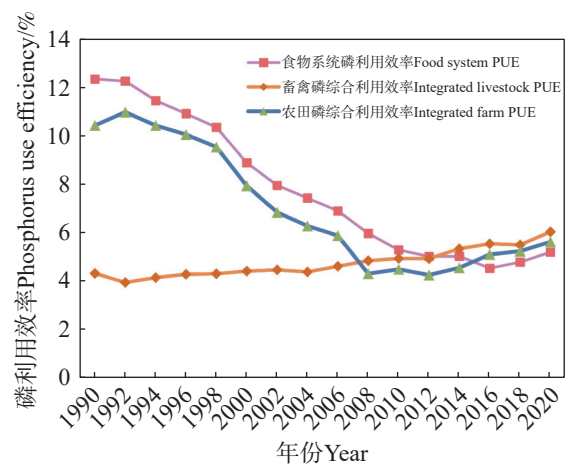


图 4 海南岛食物链系统磷利用效率
Fig. 4 Phosphorus utilization efficiency of the food chain system in Hainan Island

精准施肥,不同作物对磷的需求量和吸收能力存在明显差异,一些对磷需求较高但吸收能力较弱的作物,其磷素利用效率较低,影响整体的磷素利用效率提升^[36]。过量施用磷肥,磷素会通过地表径流、土壤侵蚀等途径流失到水体中,造成水体富营养化,影响水质和生态系统健康^[37]。磷矿石是生产磷肥的主要原料,全球磷矿资源分布不均且储量有限,一些国家和地区高度依赖进口,面临供应短缺风险^[38]。随着科技的不断进步,研究者研发出了一系列提高磷素利用效率的新技术,这些技术能够减少磷在土壤中的固定,提高作物对磷的吸收利用率^[39]。

3 讨论

3.1 海南岛食物链系统磷素环境损失变化

1990 至 2020 年间,海南岛食物链系统中的磷素环境损

失显著增加。在总输入量中,磷肥的占比超过 89.08%。1990—2016 年,海南岛农业发展迅速,为追求高产,磷肥施用量不断增加,大量磷肥的投入超出了作物实际需求,土壤中磷素大量累积,随着城市化和农业开发进程加快,大量自然土地被开垦,这种土地利用方式的转变破坏了土壤结构和生态平衡,使土壤的磷固定能力下降^[40],同时增加了土壤侵蚀的风险,导致磷流失加剧。2016—2020 年,农业管理措施的优化及对生态环境保护与修复的加强,使植被可以有效地减少土壤侵蚀,降低地表径流速度,从而减少磷的淋溶和径流损失^[41]。同时加强了对红树林湿地等重要湿地生态系统的保护和恢复工作。湿地具有强大的净化水质和截留营养物质的功能,能够吸附和沉淀水体中的磷,减少磷向海洋的输出^[42]。

1990—2020 年,海南人口急剧增长,产业结构优化升级,海南积极推动产业转型,重点发展旅游业、现代服务业、高新技术产业和热带特色高效农业等四大主导产业,吸引了大量的高学历、高技能人才来到海南。除此之外,海南作为著名旅游胜地,每年接待的游客数量众多,这不仅使得对食物的需求大幅增加,而且也导致了磷素投入量的增加。居民饮食结构的改变加剧了这一趋势,对蔬果和畜禽类产品的需求持续增加,动物性食品消费的快速增加进一步影响了磷素的流动。由于海南岛畜禽养殖的规模化程度低,且粪尿处理技术落后,海南岛畜禽粪尿损失比例一直在 30% 以上^[14],所以,需要科学的管理措施来提高海南岛食物链系统中磷素利用效率。

3.2 海南岛食物链系统磷素流动驱动力分析 为了量化海南岛食物链系统中的磷素输入、输出、利用效率和损失途径,并探索磷素可持续利用方式,需要深入分析其驱动力因素。1990—2020 年间,海南岛的人均 GDP 从 1562.49 元增加至 5.56 万元,人均 GDP 与单位面积蔬果产量呈正相关,肥料磷投入与淋洗、径流、侵蚀损失呈正相关(图 5)。由于经济的快速发展,人民生活水平的提高,饮食结构也发生了显著变化,对蔬果类、畜禽类需求急剧增加^[43]。但是种植方式的不科学,以及过量施用磷肥导致多余的磷素通过淋洗、径流、侵蚀损失排放到环境与水体中,造成环境污染及水体污染^[44]。

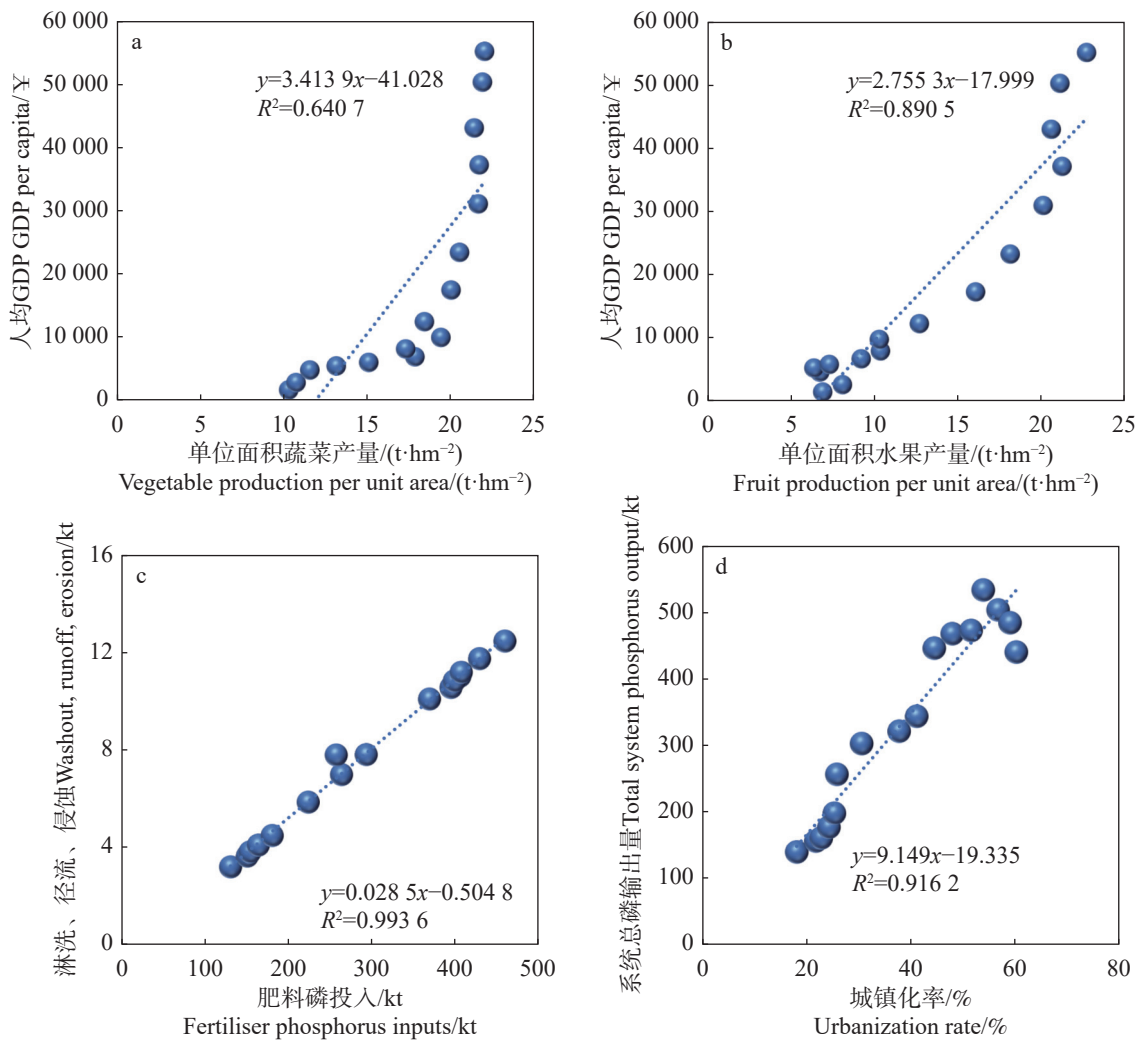
1990—2020 年海南岛单位面积蔬果产量呈现

上升趋势,海南岛种植业发展迅速,繁荣的经济及政府对磷肥生产和运输的支持促进了中国磷肥的使用^[45]。且多项研究表明,畜禽粪尿排放是中国地表水中磷素的主要来源^[46]。研究表明总磷损失与 GDP 及人类饮食的组成相关,城镇化率是城市化的度量指标,一般采用人口统计学指标,即城镇人口占总人口(包括农业与非农业)的比重,1990—2020 年,海南岛城镇化率与系统总磷输出量也呈现正相关(图 5),这二者的增加表明人类经济水平的提高,同时也对海南岛食物链系统磷素流动产生一定影响。

3.3 2050 年情景分析 本研究共设置 5 个情景,探索 2050 年海南岛食物链系统可能的变化,情景设置如下:1)基准情景,在一切照旧的情况下(S0);2)降低肥料磷投入,提高磷肥利用效率(S1);3)精确动物饲养,降低动物生产中的磷输入及改进动物粪便管理技术,降低动物粪便中的磷损失(S2);4)遵守“健康饮食”,减少动物生产中的磷损失(S3);5)S1—S4 的综合情景(S4),情景 S1—S4 都建立在基准情景 S0 的基础上。

以 2020 年的情况为参考,预测 2050 年磷素损失情况。这是由于联合国预计到 2050 年,世界人口总数将达到 91.5 亿^[47]。预计未来 40 年全球人口增长率将下降(低于 1963—2007 年期间的 1.7%),如果农业用地数量保持在 2010 年的水平,那么农业人口与土地的比例将达到每公顷 1.96 人(大约是 1800 年的两倍)FAO 粮农组织预计。关于食品消费的商品构成,虽然发展中国家预计将转向更多的畜禽产品,但与发达国家的肉类和牛奶消费水平的差异仍然很大。到 2050 年,世界谷物产量预计将以每年 0.9% 的速率增长,预计在今后 44 年将再增加 9.4 亿 t,到 2050 年将达到 30 亿 t^[48]。基于《海南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》的要求,海南经济要保持稳步增长,地区生产总值年均增长 5.9%,粮食播种面积稳定在 410 万亩、产量稳定在 29 亿斤以上,常住人口城镇化率达 59.7%,化学农药和化肥单位面积施用量较 2020 年减少 10% 以上。

S0—S4 的情景分析(图 6)表明,单个情景的减排效果较小,单个情景无法同时有效降低磷素损失,S1 和 S3 情景都可以将磷肥投入量减少



a, b.单位面积蔬菜、水果产量; c.肥料磷投入与淋洗、径流、侵蚀; d. 城镇化率与系统总磷输出量。

a, b. vegetable and fruit production per unit area; c. fertilizer phosphorus inputs and leaching, runoff and erosion; d. urbanization rate and total system phosphorus output .

图 5 1990—2020 年食物链系统人均 GDP 与驱动力因素之间的关系

Fig. 5 Relationships between GDP per capita and in the food chain system during 1990—2020

25%左右,但是在综合情景(S4,即S1—S3措施联合实施),所有措施综合在一起,径流、侵蚀、淋洗、粪尿、水产养殖废水及厨余垃圾等磷素损失可以得到有效控制,可以有效减少磷肥投入及磷素向食物链系统的损失。

3.4 不确定性分析 与其他建模研究相似,本研究在一定程度上存在不确定性。情景分析中的不确定性主要来源于模型输入和参数的假设。例如,在基准情景(S0)中,假设2020至2050年海南省的作物产量将依据政府文件中的预测值稳步增长。然而,未来数十年内,作物产量的增长可能因不可抗力因素而有所波动^[49],尽管该假设可能影响研究结果,但其对研究核心结论的影响有限。宏观统计数据的潜在不准确性也可能对研究结论造成一定程度的影响。为尽量确保数据精确性,研

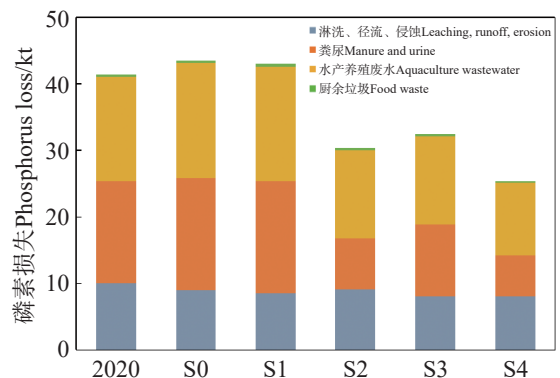


图 6 2050 年各情景下(S0—S4)磷素损失

Fig. 6 Phosphorus loss under scenarios(S0-S4) in 2050

究中参照了1990—2020年的《海南统计年鉴》及海南省各地统计公报,尽可能完善数据采集。本研究使用的食物链系统模型参数参考了Ma等^[39]的研究成果,并根据海南实际情况做出部分调整,

尽量减少结果偏差。随着研究深入以及国家未来对肥料使用控制的加强,基于国家与区域层面的养分估算将成为研究热点^[50]。因此,未来需要建立更为精准的参数与评价标准,以进一步提高研究结果的准确性。

3.5 海南岛食物链系统磷流动存在的问题及建议

当前,海南岛食物链系统磷素损失较为严重,磷素输入量持续增加,但利用效率较低,各子系统的磷素流失情况不一。肥料磷素输入量由1990年的129.99 kt增加至2020年的369.06 kt,增长了1.80倍,食品磷素输入量由1990年的32.46 kt增加至2020年的47.43 kt,增长了46%。由于人口增长、旅游业发展及畜禽粪尿资源化利用效率较低,为了减少过量磷肥带来的生态风险并提升磷素利用效率,建议海南岛未来在磷素管理方面应采取以下措施:1)合理施肥,科学调控磷肥使用量,采取精确施肥、合理灌溉、农田防护带等土壤保护措施;2)加强宣传教育,减少秸秆焚烧,提高秸秆还田量,推动可持续农业发展;3)优化畜禽和人类粪尿的管理,提升其利用效率,减少各环节的磷素损失;4)规范化养殖,减少养殖过程中的磷素损失,减少外源饲料粮的投入;5)减少食品浪费,基于区域食品消费特点,减少系统性厨余垃圾与水体排放损失^[17,28]。通过提升食物链系统的磷素利用效率,加强各子系统间的养分协调管理,以实现海南岛食物链系统的可持续发展目标。

4 结论

基于1990—2020年的统计数据,本研究深入分析了海南岛食物链系统磷素流动的特征及其来源。研究表明,1990—2020年,海南岛食物链系统的磷素输入与输出持续增长,受地理环境、人类消费结构及发展规划的影响,各子系统间的磷素损失及流动情况存在较大差异。由于海南岛农业发达,热带特色高效农业是其支柱产业之一,农业生产中磷肥的大量使用,会使土壤中磷含量增加,而植物对磷的吸收利用率有限,剩余的磷易通过径流、淋洗等方式损失^[51]。海南岛属于热带季风海洋性气候,降雨量大且集中,强降雨会导致土壤侵蚀加剧,使得土壤中的磷随径流流失进入水体,造成磷损失。同时,畜禽养殖的不规范导致多余畜禽粪尿流失到环境中,也加速了磷损失^[52]。海

南岛河流众多,水系发达,且四周环海,磷随地表径流汇入河流后,更容易进入海洋,造成近海水体富营养化^[53]。结果显示,作物生产子系统的磷素投入主要依赖磷肥,随着投入量的增加,农田磷素盈余显著上升,导致环境污染加剧并引发水体富营养化。海南岛经济的快速发展与居民生活水平的提升带动了水产品需求增长,使水产养殖规模不断扩大。同时,食品浪费现象普遍,大量磷素流入其他子系统,造成磷素的流失。因此,建议针对海南岛食物链系统中各子系统的磷素流动特征采取合理的管理措施,如减少肥料磷的输入;精准动物饲喂,降低畜禽生产中的磷输入;改进畜禽粪便管理技术,从而降低畜禽粪便中磷的含量和畜禽生产中的磷损失;减少人类消费系统中的食品浪费^[54],以促进养分循环、提升磷素利用效率,从而推动海南岛的绿色可持续发展。

参考文献:

- [1] CHEN M, GRAEDEL T E. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 36: 139 – 152.
- [2] JIN X, BAI Z, OENEMA O, et al. Spatial planning needed to drastically reduce nitrogen and phosphorus surpluses in China's agriculture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19): 11894 – 11904.
- [3] LI M, GUO Z, ZHANG W. Balancing food security and environmental sustainability by optimizing seasonal-spatial crop production in Bangladesh[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(7): 74046.
- [4] BAI Z, LIU L, OBERSTEINER M, et al. Agricultural trade impacts global phosphorus use and partial productivity[J]. *Nature Food*, 2023, 4(9): 762 – 773.
- [5] LI B, LI P, ZENG X C, et al. Assessing the sustainability of phosphorus use in China: Flow patterns from 1980 to 2015[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 704: 135305.
- [6] HUANG C, KANG W, XU S, et al. Growing phosphorus dilemma: The opportunity from aquatic systems' secondary phosphorus retention capacity[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 796: 148938.
- [7] WHITE S, CORDELL D. Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security[J]. *Sustainability*, 2011, 3(10): 2027 – 2049.
- [8] CORDELL D, WHITE S. Sustainable phosphorus measures: Strategies and technologies for achieving phosphorus security[J]. *Agronomy*, 2013, 3(1): 86 – 116.
- [9] ANTIKAINEN R, LEMOLA R, NOUSIAINEN J I, et al. Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2/3):

- 287–305.
- [10] LI H, LIU J, LI G, et al. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses[J]. *Ambio*, 2015, 44(2): 274–285.
- [11] BILLEN G, LASSALETTA L, GARNIER J. A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade[J]. *Global Food Security*, 2014, 3(3/4): 209–219.
- [12] 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.
- [13] 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(中英文), 2018, 26(10): 1494–1500.
- [14] 丁尚, 郭浩浩, 宋晨阳, 等. 海南岛农牧生产体系磷元素流动时空变化特征[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(5): 860–873.
- [15] 海南省统计局. 海南统计年鉴(1990—2020)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [16] 国家统计局. 中国渔业统计年鉴(1990—2020)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [17] 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.
- [18] 韩雪, 常瑞雪, 杜鹏祥, 等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(4): 377–382.
- [19] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [20] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [21] 王莹, 梁勤爽, 杨志敏, 等. 淋溶对畜禽粪便释放氮磷面源污染物的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(1): 92–98.
- [22] 王圣伟, 周永馨, 王丽霞, 等. 秸秆还田对畜禽粪污土地承载力的影响[J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(3): 187–193.
- [23] 朱瑶瑶. 我国城乡居民在外就餐消费研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2018.
- [24] 陈东兴. 种养殖池塘水质、污染物排放强度及氮、磷收支[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [25] 刘国锋, 徐跑, 吴霆, 等. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 225–233.
- [26] 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.
- [27] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 等. 长春地区食物链磷素养分流动历史变化特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(8): 1099–1105.
- [28] MA L, WANG F, ZHANG W, 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.
- [29] 侯立恒, 王熊飞, 王汀忠, 等. 海南省耕地有机质和 pH 值变化分析[J]. *农业科技通讯*, 2018(1): 120–123.
- [30] 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*, 2018, 51(3): 535–555.
- [31] 张建杰, 郭彩霞, 张一弓, 等. 山西省农牧生产体系磷流动空间变异特征[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 553–562.
- [32] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数[J]. *土壤通报*, 1996, 27(4): 145–151.
- [33] 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.
- [34] ZHANG F, CUI Z, FAN M, et al. Integrated soil-crop system management: reducing environmental risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(4): 1051–1057.
- [35] ZHENG L, JING X, ZHANG Q, et al. Nitrogen and phosphorus trajectories (1998–2030) under regional development strategy of China Mainland [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 794: 148655.
- [36] SCHNEIDER K D, THIESSEN M J, ZVOMUYA F, et al. Options for improved phosphorus cycling and use in agriculture at the field and regional scales[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(5): 1247–1264.
- [37] SPRINGMANN M, CLARK M, MASON-D'CROZ D, et al. Options for keeping the food system within environmental limits[J]. *Nature*, 2018, 562(7728): 519–525.
- [38] LE C, ZHA Y, LI Y, et al. Eutrophication of lake waters in China: Cost, Causes, and Control[J]. *Environmental Management (New York)*, 2010, 45(4): 662–668.
- [39] 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.
- [40] 张少若, 黄承和, 尹俊梅, 等. 海南热带土壤对磷的吸附特性与施磷量的关系[J]. *热带作物学报*, 1993(1): 53–60.
- [41] YUAN Z, LIU X, WU H, et al. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Lujiang County, Anhui Province, Central China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(8): 1534–1543.
- [42] 陈晓娟. 海南岛海岸带湿地类保护地游憩发展现状及问题研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2024.
- [43] CORDELL D, ROSEMARIN A, SCHRODER J J, et al. Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 747–758.
- [44] LWIN C M, MURAKAMI M, HASHIMOTO S. The implications of allocation scenarios for global phosphorus flow from agriculture and wastewater[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 94–105.
- [45] BAI Z, MA L, JIN S, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(24): 13409–13418.
- [46] 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[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117768.
- [47] CHILDERS D L, CORMAN J, EDWARDS M, et al. Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorus cycle[J]. *BioScience*, 2011, 61(2): 117 – 124.
- [48] SCHOLZ R W, WELLMER F, MEW M, et al. The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 213: 107993.
- [49] XIE J, ZHUGE X, LIU X, et al. Environmental sustainability opportunity and socio-economic cost analyses of phosphorus recovery from sewage sludge[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2023, 16: 100258.
- [50] WANG M, 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.
- [51] HOWE J A, MCDONALD M D, BURKE J, et al. Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review[J]. *Soil Security*, 2024, 16: 100155.
- [52] KERSTI L, ERIK J M, ANNE-MARIE T. Phosphorus flows to and from Swedish agriculture and food chain.[J]. *Ambio*, 2012, 41(8): 883 – 93.
- [53] 马继勇, 王丹丹, 赵洪伟. 海南岛珠溪河流域农业系统氮素流动特征及其环境效应[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(4): 393 – 402.
- [54] 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.

Analysis of historical changes in phosphorus flow within the food chain system in Hainan Island (1990—2020)

WANG Dandan^{1,2#}, LI Zichen^{1,2}, MA Jiyong³, ZHAO Hongwei^{1,2*}

(1. Eco-Environment Restoration Center of Hainan Province, Haikou, Hainan 570228, China; 2. School of Ecology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Haikou Marine Geological Survey Center, Haikou, Hainan 571127, China)

Abstract: The characteristics of the changes in phosphorus flow from 1990 to 2020 were quantified in the food chain system of Hainan Island based on the NUFER model to explore the sustainable use of phosphorus. The results demonstrated that over the 30-year period, the phosphorus input to the crop production subsystem of the Hainan Island food chain system increased from 135.92 kt to 390.63 kt, with fertilizer input representing the primary source of phosphorus in this subsystem. The phosphorus input to the livestock and poultry subsystem exhibited an increase from 13.70 kt to 19.23 kt, while the phosphorus input to the aquaculture subsystem demonstrated an increase from 6.32 kt to 49.75 kt. All these findings demonstrate that the inputs and losses of phosphorus in the food chain system of Hainan Island in 2050 can be reduced through the implementation of comprehensive and optimal management measures. In order to ensure the long-term sustainability of the food chain system on Hainan Island, it is essential to implement measures that will control the excessive inputs of phosphorus nutrients, optimize farming methods and technologies, and strengthen management measures to improve the efficiency of phosphorus utilization. This will help to reduce the loss of phosphorus in the various subsystems. Concurrently, it is imperative to foster a harmonious interdependence between the disparate subsystems that comprise Hainan Island's food chain system. This will ensure the sustainable phosphorus utilization.

Keywords: NUFER; food chain system; phosphorus; historical change characteristics; scenario analysis

(责任编辑:叶 静)