



1985—2015 年福建省农牧系统磷素流动特征及影响因素

刘东晖^{1,2}, 张世昌³, 杨静^{1,2}, 黄梦元^{1,2}, 吴良泉^{1,2}

(¹ 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; ² 福建农林大学国际镁营养研究所, 福州 350002; ³ 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350003)

摘要:【目的】探明福建省农牧系统磷素流动时间变化特征及其影响因素, 为实施农牧系统养分资源综合管理和推进农业绿色发展提供科学依据。【方法】通过整理福建省 1985—2015 年统计年鉴中农牧业产品活动数据和补充文献中农牧业产品养分参数, 结合实地调研, 使用 NUFER (nutrient flows in food chain, environment and resources use) 模型, 定量估算 1985—2015 年福建省种植业和养殖业磷素流动账户平衡、利用率与损失变化特征, 明确影响农牧生产系统磷素流动的主要因素。【结果】1985—2015 年, 福建省农牧生产系统磷素输入总量由 63.1 Gg 升至 196.2 Gg, 主要输入项为化肥投入及饲料进口, 其中种植业单位面积化肥磷投入量由 27.8 kg·hm⁻² 逐渐上升并稳定于 60.4 kg·hm⁻², 受福建省种植业及养殖业规模和结构变化影响, 本地饲料磷供应量由 3.33 Gg 降至 1.65 Gg, 饲料磷进口数量由 20.7 Gg 增至 70.2 Gg; 农牧系统输出端, 磷素输出总量由 45.0 Gg 增至 90.9 Gg, 主要输出项为作物主产品和粪尿损失, 其中作物主产品变化较小, 由 24.3 Gg 增至 26.7 Gg, 粪尿损失磷增加较多, 由 1.44 Gg 增至 25.8 Gg; 在农牧系统内部, 磷素的主要去向为土壤累积, 且逐年上升, 由 18.1 Gg 升至 106 Gg, 种植业磷素利用率 (PUE_c) 由 36.1% 降至 16.6%, 农牧系统的磷素利用率 (PUE_{cta}) 变化趋势与 PUE_c 相仿, 逐渐下降并最终维持于 15.0%, 同时单位农牧产品磷损失由 0.3 kg P·kg⁻¹ 逐渐上升并稳定于 1.3 kg P·kg⁻¹。在经济发展和种植结构方面, 当人均生产总值 (GDP) < 1.1 万元时, GDP 与化肥磷投入数量呈显著正相关, 当 GDP < 1.5 万元时, 与单位农牧产品磷损失之间呈显著正相关, 人均 GDP < 1.3 万元时, 与 PUE_c 呈显著负相关; 经济作物播种面积占比与单位农牧产品磷损失、化肥磷投入之间呈极显著正相关, 与 PUE_c 之间呈极显著负相关。【结论】当前福建省种植业结构特征为经济作物播种面积占比较高, 同时单位面积化肥磷投入量较大, 养殖业畜禽粪尿循环不充分, 导致单位农牧产品磷损失较多, 同时磷素利用率偏低。因此, 控制磷肥的施用量、增强农牧业废弃物资源化利用程度, 将是提高福建省农牧系统磷素利用率, 促进农牧业可持续绿色发展的保障。

关键词: 磷素; NUFER 模型; 磷素利用率; 农牧系统; 经济作物占比

Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Flows in the Crop-Livestock System of Fujian Province from 1985 to 2015

LIU DongHui^{1,2}, ZHANG ShiChang³, YANG Jing^{1,2}, HUANG MengYuan^{1,2}, WU LiangQuan^{1,2}

(¹ College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; ² International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; ³ Farmland Construction and Soil Fertilizer Technology Station of Fujian Province, Fuzhou 350003)

Abstract: 【Objective】The objective of this study is to determine the temporal changes and influencing factors of phosphorus

收稿日期: 2019-09-05; 接受日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200200, 2017YFD0200207)

联系方式: 刘东晖, E-mail: liudonghui01@foxmail.com. 通信作者吴良泉, E-mail: liangquan01@163.com

(P) flows in the crop-livestock system of Fujian Province, and to provide a scientific reference for integrated nutrient management and green development of agriculture. 【Method】 Using a coupled NUFER (nutrient flows in food chain, environment and resources use) model, data were collected and sorted from statistical yearbooks, literatures, and field investigations from 1985 to 2015 to quantitatively estimate the balance, use efficiency and loss characteristics of P flow in the crop-livestock system of Fujian Province.

【Result】 The total P input in crop-livestock production system increased from 63.1 to 196.2 Gg in Fujian Province from 1985 to 2015. The main P format inputs were fertilizer and feed import. The amount of per unit area of P fertilizer input in crop system increased gradually from 27.8 to 60.4 kg·hm⁻². Due to the influence of scale and structure change of crop-livestock system in Fujian Province, local feed supply decreased from 3.33 to 1.65 Gg, while the feed import increased from 20.7 to 70.2 Gg. From the output perspective, total P increased from 45.0 to 90.9 Gg, mainly including crop main product and animal manure loss. P uptake of crop main products changed slightly (only from 24.3 to 26.7 Gg), while the P loss in animal manure increased significantly from 1.44 to 25.8 Gg. Soil accumulation is the main loss pathway of P in crop-livestock system, which increased year by year from 18.1 to 106 Gg. P use efficiency in crop production system (PUE_c) decreased from 36.1% to 16.6%, and the change trend of P use efficiency in crop-livestock system (PUE_{c+a}) was similar to that of PUE_c, which gradually decreased and eventually remained at 15.0%. In the same time, the unit P loss of crop-livestock products increased gradually from 0.3 to 1.3 kg P·kg⁻¹. In terms of economic development and planting structure, there was a significant positive correlation between per capita GDP and fertilizer input when the per capita GDP was less than 11 000 yuan. When per capita GDP was less than 15 000 yuan, there was a significant positive correlation between per capita GDP and unit P loss of crop-livestock products, but there was a significantly negative correlation between per capita GDP and PUE_c when per capita GDP was less than 13 000 yuan. The proportion of cash crops planting area was significantly and positively correlated with the unit P loss of crop-livestock products and P input of fertilizer, and it was significantly negatively correlated with PUE_c. 【Conclusion】 At present, the cash crops planting area is relatively high, which is one of the structural characteristics of crop system in Fujian Province. At the same time, the unit area quantity of P input by fertilizer is large, circulation of animal manure is inadequate, which probably lead to more unit P loss in crop-livestock products, and low P use efficiency. Therefore, controlling the application amount of phosphate fertilizer and enhancing the utilization level in crop-livestock waste resources will be the guarantee in improving P use efficiency and promoting agriculture sustainable green development in Fujian Province.

Key words: phosphorus; NUFER model; phosphorus use efficiency; crop-livestock system; proportion of cash crops

0 引言

【研究意义】磷(P)是构成生命机体的重要元素之一,在生命循环中起到重要作用^[1]。为满足日益增长的社会需求,人为开采和使用加速了磷资源的耗竭速率。尤其是在农牧生产环节中,化肥的过度使用以及畜禽粪污的不合理排放,导致额外的磷素累积于土壤之中或是进入水体,引起磷资源耗竭的同时带来水体富营养化等环境问题^[2]。研究表明,按照现有的发展模式,磷资源将在22世纪耗竭,但若改变磷素利用方式可将磷资源耗竭时间延长至23世纪以后^[3]。因此,量化研究农牧系统磷素流动特征,探讨磷素管理优化策略,是可持续发展的关键,对促进农牧业的绿色发展意义重大。【前人研究进展】目前,国内外众多学者已在不同地区开展研究,结果显示区域间磷素流动特征各不相同。BOUWMAN等^[4]研究表明,亚洲的部分发展中国家对磷的需求量将会持续增加,未来这些区域农田的化肥磷投入和土壤磷盈余将持续增

加,从而加剧环境污染风险;SUH等^[5]研究表明,在美国地区,人类从自然界中提取用于提供食物的总磷中只有15%最终被人体利用,大部分损失于肉蛋奶等畜牧产品的生产过程和农作物的种植阶段;OTT等^[6]研究表明,在欧盟15国的磷素流动平衡中,输入项主要为磷进口数量,输出项主要为土壤、垃圾填埋场和水圈累积;张晓萌等^[7]对东北三省农牧系统养分流动特征的研究表明,东北三省磷素利用率差异显著,需要针对不同地区养分流动特征提出针对性建议;张华芳^[8]对河北省农牧系统磷素流动研究结果表明,河北省磷素流动呈现外源投入大、利用率低、环境排放高、农牧结合不紧密等特点;张建杰等^[9]对山西省农牧系统研究结果表明,山西省农田生产系统的磷素利用率高于全国平均水平,但农牧生产系统的磷素利用率较低。可见,不同地区农牧系统磷素流动特征各不相同。然而,已有的研究区域主要集中于国外或我国北方,针对以种植茶果等经济作物为主的南方丘陵区磷素流动研究较少。同时,区域间磷素流动差异的驱动因

素各不相同,如化肥施用程度、畜禽粪污养分管理水平及经济发展状态等。SMIL^[10]对全球磷循环研究结果表明化肥施用、废水排放、土壤侵蚀与流失以及作物秸秆和粪便排放是致使全球磷素流动程度增加的驱动因素; SENTHILKUMAR 等^[11]对法国境内的磷素流动预算结果显示,驱动农牧系统中养分流动的关键因素为动物粪便; MA 等^[12]对中国食物链磷平衡、损失和利用率的概述表明,作物和动物生产中的营养物质损失不断增加的主要原因是返回农田的粪肥比例下降,提高磷素利用率和减少磷损失的关键在于平衡施肥,以及改善粪便养分管理;魏莎等^[13]研究表明,农牧系统磷素流动特征与其种养结构、养殖规模以及环保政策密切相关; BAI 等^[14]通过分析新中国成立 60 年以来磷素流动特征,表明肥料磷的使用与蔬菜和水果生产面积占比呈正相关,磷肥的使用在某一阶段与 GDP 呈正相关,但随着经济的发展将会逐渐脱钩。可见,影响磷素流动的因素众多,同时关于以经济作物为主的南方丘陵区磷素流动特征研究还比较缺乏。【本研究切入点】福建省以丘陵山地为主,素有“八山一水一分田”之称,耕地资源非常有限,1985 年以来该区域农牧系统结构发生变化,经济作物和养殖业快速发展,化肥及外源饲料投入数量增长较快,磷素作为参与农牧业物质转换的重要营养元素之一,其流动特征也深受影响。然而,目前针对福建省农牧系统磷素流动特征研究较少。【拟解决的关键问题】利用 NUFER 模型,探明 1985—2015 年福建省种植业和养殖业的磷素流动特征及总量差异、磷素利用率与损失变化特征,明确对农牧生产系统产生影响的因素,为福建省乃至亚热带地区农牧生产系统磷素管理提供科学依据,同时为推进农业绿色发展、建设生态农业提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

福建省位于我国东南沿海,总面积 $12.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,地处 $23^\circ 33' - 28^\circ 20' \text{N}$, $115^\circ 50' - 120^\circ 40' \text{E}$,属亚热带海洋性季风气候,年均温 $14.6 - 21.3^\circ \text{C}$,积温高达 $5\,000 - 7\,800^\circ \text{C}$,年均降水量 $1\,037 - 2\,051 \text{ mm}$ 。地形以山地丘陵为主,总体呈东南低,西北高,境内水热条件垂直分带较明显^[15]。改革开放以来,福建省生产力得到提升,经济快速发展,人均 GDP 由 0.07 万元增至 6.79 万元,农业产业结构也发生变化,在 1985—2015 年期间,福建省种植业总播种面积呈先上升后下降的趋势,同时种植结构发生改变。其中,粮食作物播种

面积降幅达到 40%。经济作物播种面积占比逐步增加,由 20.1% 逐渐增至 56.3%,其中蔬菜、茶叶种植面积分别约增长 6 倍和 2 倍,水果种植面积增长约 3 倍。同时,福建省种植业中化肥用量及养殖业中的养殖密度也持续上升,至 2015 年,福建省化肥用量及养殖密度分别约为 1985 年的 4 倍和 3 倍,其中养殖密度达到 6.5 LU/hm^2 ^[16]。

1.2 NUFER 模型和系统边界介绍

NUFER 模型是一个研究国家和区域尺度食物链系统氮磷流动的模型,可以定量分析“农田-畜牧-食品加工-家庭消费”系统氮磷流动、利用率和损失途径^[12]。本研究以福建省“农田-畜牧”生产系统作为研究边界,系统间的磷素流动作为研究对象,量化研究农牧系统磷素流动、利用率及损失变化特征。农牧系统包括作物生产系统和畜禽生产系统。磷素在系统中的流动情况如图 1 所示:磷素通过(1)化肥投入、(2)饲料进口的方式进入到农牧系统,在内部以(3)粪尿还田、(4)秸秆还田、(5)本地饲料喂养的形式进行流动,同时以(6)土壤累积的形式累积于作物生产系统内,最后以(7)作物主产品、(8)作物副产品、(9)径流、侵蚀、(10)淋溶、(11)畜禽主产品、(12)畜禽副产品、(13)粪尿损失的方式离开研究系统。由雨水带来的磷含量较少,畜禽的生物累积磷数量年际间差值不大,因此不作为考虑对象。

1.3 模型流程图及其计算方法注释

模型流程示意图见图 1。文中主要采用 NUFER 模型来计算磷素流动、利用率以及环境排放等结果,其中种植业、畜牧业和农牧系统的计算公式^[17]如下:

$$\text{PI}_{\text{crop}} = \text{PI}_{\text{fer}} + \text{PI}_{\text{am}} + \text{PI}_{\text{st}} \quad (1)$$

式中, PI_{crop} 表示种植业磷总输入量, PI_{fer} 表示化肥磷输入量, PI_{am} 表示畜禽粪尿磷还田量, PI_{st} 表示作物秸秆磷还田量。

$$\text{PUE}_{\text{c}} = \text{PO}_{\text{crop}} / \text{PI}_{\text{crop}} \quad (2)$$

式中, PUE_{c} 表示种植业磷素利用率, PO_{crop} 表示作物产品磷输出量, PI_{crop} 表示种植业磷总输入量。

$$\text{PUE}_{\text{a}} = \text{PO}_{\text{animal}} / (\text{PI}_{\text{fi}} + \text{PI}_{\text{lr}}) \quad (3)$$

式中, PUE_{a} 表示畜牧业磷素利用率, $\text{PO}_{\text{animal}}$ 表示畜禽产品磷输出量, PI_{fi} 表示饲料磷进口量, PI_{lr} 表示本地饲料磷输入量。

$$\text{PUE}_{\text{c+a}} = (\text{PO}_{\text{c}} + \text{PO}_{\text{a}}) / (\text{PI}_{\text{fer}} + \text{PI}_{\text{fi}}) \quad (4)$$

式中, $\text{PUE}_{\text{c+a}}$ 表示农牧系统的磷素利用率, PO_{c} 表示农牧体系作物产品磷输出量, PO_{a} 表示农牧体系畜禽产品磷输出量, PI_{fer} 表示化肥磷输入量。

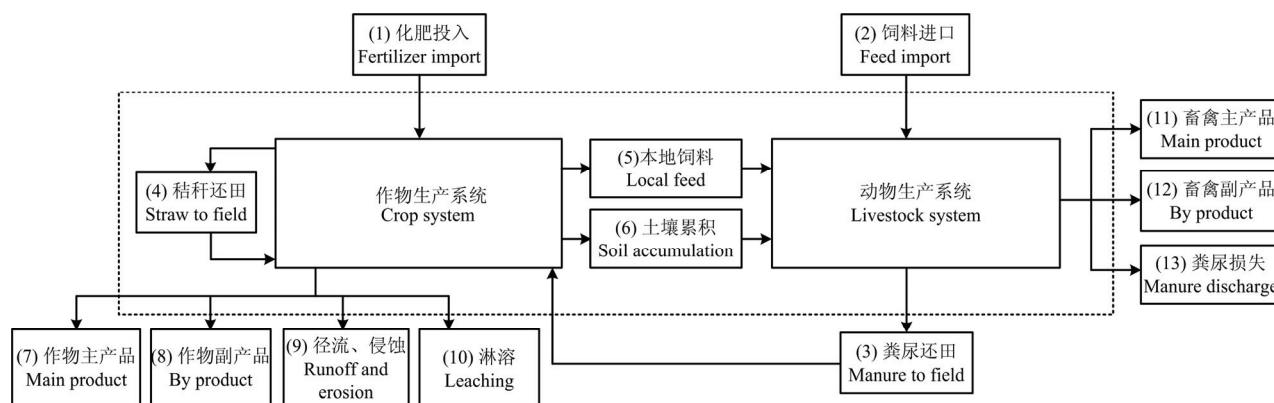


图 1 农牧生产体系磷流动模型

Fig. 1 Schematic diagram of phosphorus flows model in crop-livestock production system

$$P_{\text{accumulate}} = PI_{\text{crop}} - PO_{\text{crop}} - PO_{\text{st}} - PO_{\text{rf}} - PO_{\text{le}} \quad (5)$$

式中, $P_{\text{accumulate}}$ 表示土壤磷积累量, PI_{crop} 表示种植业磷总输入量, PO_{crop} 表示作物主产品磷输出量, PO_{st} 表示作物秸秆磷输出量, PO_{rf} 表示种植业径流、侵蚀损失量, PO_{le} 表示种植业淋溶损失量。

$$PPL_{\text{c+a}} = (PO_{\text{rf}} + PO_{\text{le}} + PO_{\text{discharge}}) / (PO_{\text{crop}} + PO_{\text{animal}} - PI_{\text{lf}}) \quad (6)$$

式中, $PPL_{\text{c+a}}$ 表示每生产 1 kg 农牧产品的磷损失, $PO_{\text{discharge}}$ 表示养殖业磷直接排放量。

$$PI_{\text{am}} = (PO_{\text{manure}} - PO_{\text{discharge}}) \times P_{\text{MR}} \quad (7)$$

式中, PO_{manure} 表示养殖业粪尿磷总产量, P_{MR} 表示粪尿还田比例。

$$PI_{\text{lf}} = PO_{\text{animal}} + PO_{\text{ANB}} + PO_{\text{manure}} - PI_{\text{lf}} \quad (8)$$

式中, PO_{ANB} 表示畜禽副产品磷素输出量。

1.4 研究数据来源

本研究中所使用数据分为 3 类: 统计数据、调研数据、文献数据。其中统计数据: 包括福建省作物种植面积 (根据福建省种植业特点, 将作物分为稻谷、小麦、油料、薯类、甘蔗、烟叶、茶、水果、蔬菜、绿肥、青饲料 11 种)、耕地面积、化肥投入量 (按磷肥及复合肥折纯量计算)、畜禽养殖数量 (其中, 猪、肉牛、羊、肉禽、兔为年末出栏数量, 奶牛、蛋禽为年末存栏数量), 为方便对比, 将畜禽养殖数量单位统一为 LU (livestock unit), 表示标准牛当量 (折合 500 kg 奶牛), 不同畜禽的折换比例分别为奶牛, 1 : 1; 肉牛, 0.5 : 1; 猪, 0.35 : 1; 羊, 0.1 : 1; 蛋禽, 0.012 : 1; 肉禽, 0.007 : 1; 兔, 0.01 : 1^[18]。农产品生产数量等数据主要取自《福建经济与社会统计年鉴农村篇》^[19]、《福建统计年鉴》^[16]、《中国环境

统计年鉴》^[20]。调研数据: 主要包括福建省农作物生产消费、农业资源废弃物处置情况, 主要根据访问农业厅等相关部门, 由上及下的方式了解全省总体状况。文献数据: 包括作物、畜禽各部分磷素分配比例及其含磷量, 径流、侵蚀和淋洗参数等, 主要取自 NUFER 模型及相关文献补充数据。其中, 作物收获可 (食) 用部分和不可 (食) 用部分占比及其磷含量内容见表 1, 主要畜禽饲养周期、粪尿日排泄量和粪尿磷含量内容见表 2, 主要畜禽活体产品含磷量内容见表 3, 环境损失参数内容见表 4。通过对数据的整理, 使用模型模拟 1985—2015 年福建省农牧系统磷素流动状况, 对比磷素流动时间变化特征、磷素利用率和损失差异, 为今后实现磷素资源管理调控提供依据, 并为福建农牧生产系统的可持续发展研究提供支撑。

2 结果

2.1 福建省种植业和养殖业磷素流动特征及历史变化

在种植业中, 磷素输入端包括化肥、粪尿还田以及秸秆还田。化肥是主要的输入源, 1985 年福建省单位面积化肥磷投入为 $27.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 1985—2000 年逐渐增至 $60.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 之后长期保持在这一水平。1985—2005 年粪尿还田磷的输入呈逐渐上升趋势, 由 $12.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2005 年后呈下降趋势, 至 2015 年, 单位面积畜禽粪尿磷投入为 $13.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。秸秆还田磷在输入端占比最小, 且在数值上呈现逐年下降的趋势, 1985—2015 年, 单位面积秸秆还田磷由 $4.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 降至 $2.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。磷素输出端包括作物收获、作物秸秆、淋洗、径流、侵蚀以及土壤累积。其中,

表 1 作物收获可（食）用部分和不可（食）用部分占比及其磷含量^[21-25]

Table 1 Proportion of edible part and non-edible part of different crops and their phosphorus content

作物种类 Crop	收获可（食）用部分 Harvest edible parts		收获不可（食）用部分 Harvest non-edible parts	
	百分比 Percent (%)	磷含量 P content (%)	百分比 Percent (%)	磷含量 P content (%)
（干）稻谷 Rice	53	0.300	47	0.130
（干）小麦 Wheat	48	0.370	52	0.080
（干）油料 Oil plant	56	0.305	44	0.163
（鲜）薯类 Tuber crop	67	0.020	33	0.045
（鲜）甘蔗 Sugarcane	77	0.014	23	0.046
（干）烟叶 Tobacco	38	0.184	62	0.169
（干）茶 Tea	100	0.222	—	—
（鲜）水果 Fruit	100	0.020	—	—
（鲜）蔬菜 Vegetable	100	0.039	—	—
（鲜）青饲料 Forage	100	0.080	—	—
（鲜）绿肥 Green manure	—	—	100	0.057

表 2 主要畜禽饲养周期、粪尿日排泄量和粪尿磷含量（鲜基）^[17,26-29]

Table 2 Livestock feeding period, daily excrement/urine and P content (based on fresh)

畜禽种类 Livestock	饲养周期 Feeding period (d)	粪便日排泄量及其磷含量 Daily excrement and P content		尿液日排泄量及磷含量 Daily urine and P content	
		排泄量 Excretion (kg·d ⁻¹)	磷含量 P content (%)	排泄量 Excretion (kg·d ⁻¹)	磷含量 P content (%)
肉牛 Beef	>365	18.00	0.095	9.0	0.017
奶牛 Cattle	>365	18.00	0.095	9.0	0.017
羊 Sheep	243	1.50	0.216	0.5	0.021
猪 Pig	198	2.00	0.245	3.0	0.022
兔 Rabbit	180	0.08	0.296	—	—
肉鸡 Broiler	55	0.09	0.413	—	—
蛋鸡 Layer	>365	0.15	0.413	—	—
鸭、鹅 Duck, Goose	60	0.17	0.289	—	—

表 3 主要畜禽身体各部分含磷量^[17,30-31]

Table 3 P content of production in animal body

	鲜重 Fresh weight (kg)	畜禽身体划分 Partitioning of animal body (%)			磷含量 P content (%)		
		可食用部分 Edible part	骨头 Bone	其他部分 Other parts	可食用部分 Edible part	骨头 Bone	其他部分 Other parts
猪 Pig	90.00	50	13	37	0.18	3.3	0.07
牛 Cattle	477.30	45	20	35	0.17	4.2	0.01
羊 Sheep	35.00	55	24	21	0.17	5.6	0.15
禽 Poultry	2.04	65	20	15	0.16	2.0	0.01
兔 Rabbit	1.75	50	7.5	42.5	0.17	4.0	0.21
蛋 Egg	—	90	—	10	0.21	—	0.20
奶 Milk	—	100	—	—	0.09	—	—

表 4 环境损失参数^[32]

项目 Item	参数 Parameter (%)
淋洗参数 Leaching parameter	0.6
径流参数 Runoff parameter	1.5
侵蚀参数 Erosion parameter	7.2

磷素的去向为土壤累积，1985 年福建省单位面积土壤累积磷为 18.1 kg·hm⁻²，后逐年增加，至 2004 年抵达峰值（59.8 kg·hm⁻²），之后保持稳定。作物收获和作物秸秆带走磷量在 1985—2015 年间趋势为逐渐减少，其中作物收获带走磷量由 15.9 kg·hm⁻² 逐渐降至 12.5 kg·hm⁻²，作物秸秆带走磷量由 6.2 kg·hm⁻² 降至 3.2 kg·hm⁻²。径流、侵蚀和淋洗带走磷

量在 1985—2015 年期间由 3.9 kg·hm⁻² 升至 6.9 kg·hm⁻²（图 2-A）。

在养殖业中，磷素输入端包括本地饲料和饲料进口。饲料进口是最主要部分，1985—2015 年期间，单位饲料进口数量保持在 6.0 kg/LU 左右。本地饲料在 30 年间呈现逐渐下降趋势，由 1985 年的 0.9 kg/LU 降至 2015 年的 0.1 kg/LU。磷素输出端包括动物产品、输出粪尿以及废水排放。输出粪尿为最主要输出部分，1985—2005 年期间稳定于 5.0 kg/LU，2006—2015 年出现下降趋势，至 2015 年，输出粪尿为 3.9 kg/LU。废水排放和动物产品在输出端占比较小，且在 1985—2015 年间呈小幅上升趋势，废水排放由 0.8 kg/LU 升至 1.0 kg/LU，动物产品由 0.2 kg/LU 升至 0.3 kg/LU（图 2-B）。

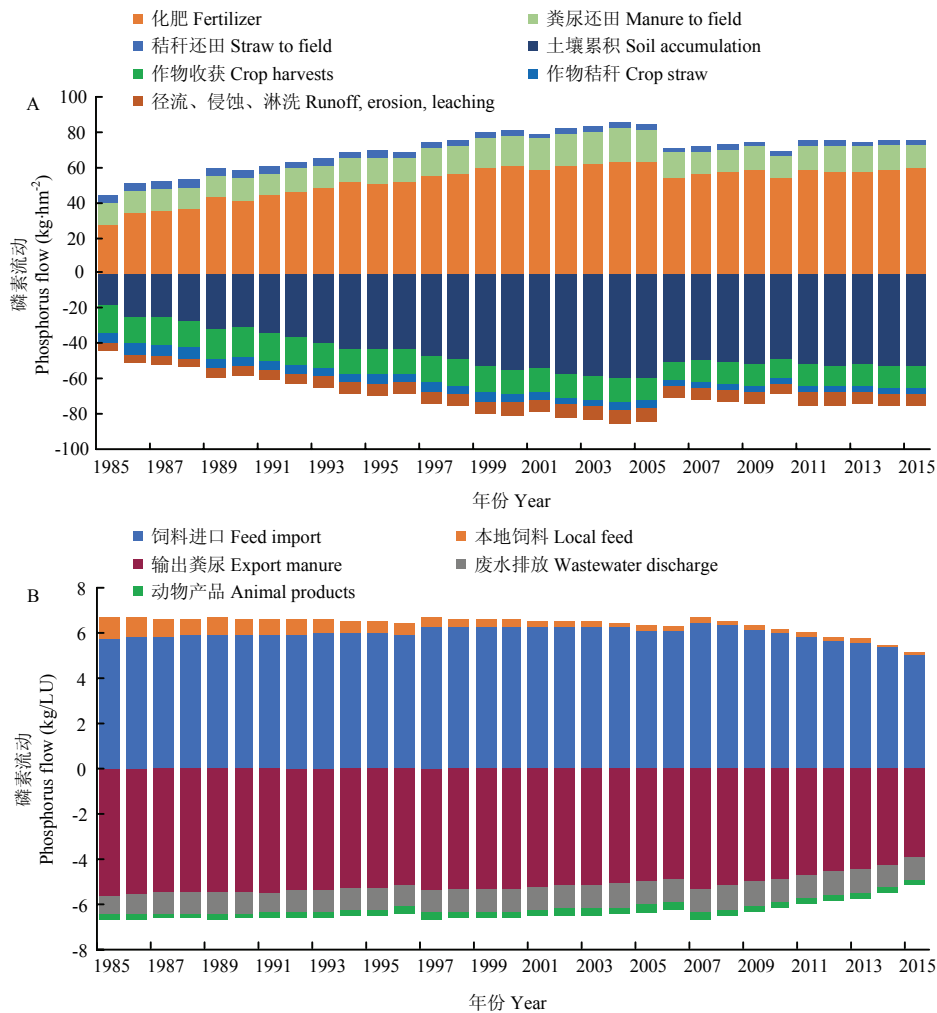


图 2 福建省种植业（A）和畜牧业（B）生产系统磷素流动

Fig. 2 Phosphorus flow in crop (A) and livestock (B) production systems in Fujian Province

2.2 福建省农牧系统磷素流动特征及年际差异

1985 年福建省农牧系统磷输入总量为 63.1 Gg (Gg=10⁹g)，2015 年为 196.2 Gg。在输入端，1985 化肥磷投入量为 42.4 Gg，占输入端 67.2%，饲料磷进口量为 20.7 Gg，占输入端 32.8%，至 2015 年，输入端化肥磷投入为 126 Gg，占比 64.2%，饲料磷进口为 70.2 Gg，占比 35.8%。磷素输出端，相较于 1985 年，2015 年福建省农牧系统磷输出总量增至 90.9 Gg，增

幅达到 102%，其中粪尿损失磷增加数量最多，由 1.44 Gg 增至 25.8 Gg。畜禽主产品和畜禽副产品磷分别增至 3.36 和 13.5 Gg，增幅分别为 315%和 337%。作物主产品磷只出现小幅度增长，增加 2.4 Gg，增幅为 9.9%。作物副产品磷出现降低，由 9.40 Gg 降至 6.86 Gg，降幅为 27.0%。在福建省农牧系统内部，磷素的主要去向为土壤累积，其中 1985 年和 2015 年土壤累积总量分别为 18.1 和 106 Gg，增幅为 486%（图 3）。

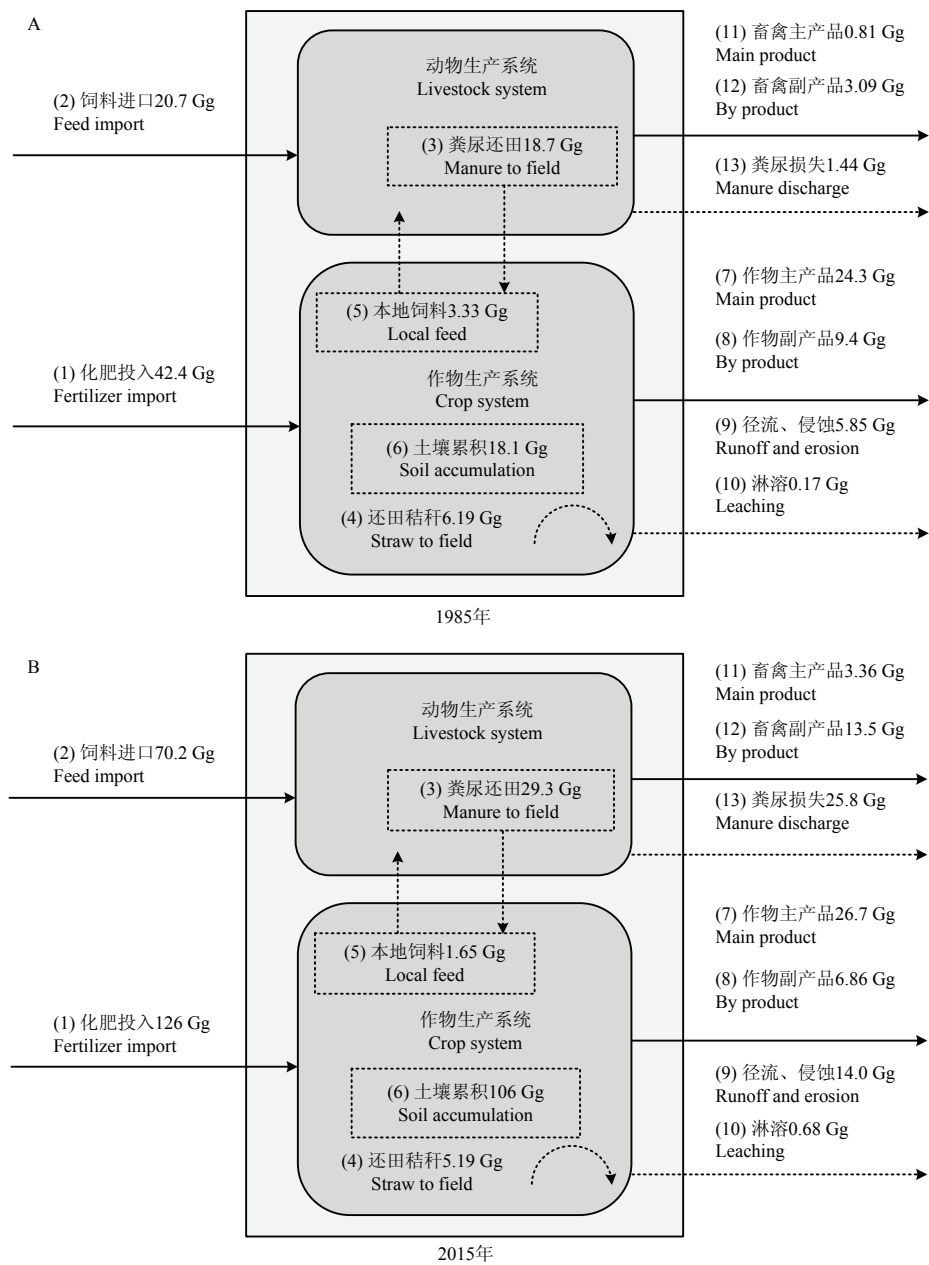


图 3 1985 年（A）和 2015 年（B）福建省农牧系统磷素养分流动特征及年际差异
Fig. 3 Changes of phosphorus flows of crop-livestock system of 1985 (A) and 2015 (B) in Fujian Province

2.3 福建省磷素利用率及单位农牧产品磷损失变化趋势

1985—2015 年期间, 福建省种植业中磷素利用率 (PUE_c) 显著降低, 由 1985 年的 36.1% 降至 2015 年的 16.6%。养殖业中, 畜牧业磷素利用率 (PUE_a) 变化不大, 停留于较低水平, 2015 年为 4.7%。农牧系统的磷素利用率 (PUE_{c+a}) 变化趋势与 PUE_c 相仿, 在 1985 年时最高, 之后呈下降趋势, 至 2005 年之后趋于平稳, 维持在 15.0% 左右。单位农牧产品磷损失由 1985 年的 $0.3 \text{ kg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ 开始逐渐上升, 在 2004 年达到 $1.3 \text{ kg P} \cdot \text{kg}^{-1}$, 之后稳定于此 (图 4)。

2.4 福建省农牧生产系统影响因素

1985—2015 年间, 当福建省人均 GDP < 1.1 万元时, 人均 GDP 与化肥磷投入之间呈显著正相关关系, 当人均 GDP > 1.1 万元时, 二者关系逐渐脱钩。当福建省人均 GDP < 1.5 万元时, 人均 GDP 与单位农牧产品磷损失之间呈显著正相关关系, 当人均 GDP > 1.5 万元时, 二者之间亦逐渐脱钩。当福建省人均 GDP < 1.3 万元时, 人均 GDP 与 PUE_c 则呈显著负相关关系, 当人均 GDP > 1.3 万元时, 二者之间同样逐渐脱钩 (图 5)。

1985—2015 年间, 经济作物播种面积占比与单位农牧产品磷损失、化肥磷 (纯 P) 投入呈极显著正相

关, 与 PUE_c 呈极显著负相关 (图 6)。

3 讨论

3.1 福建省农牧生产系统磷素流动变化特征

福建省种植业单位面积磷素投入与输出总量变化特征为先增后保持平稳, 这与福建省种植业规模及结构变化特征有关。一方面, 1985—2000 年福建省种植业播种面积增加明显, 这是导致磷素投入和输出总量增加的直接原因; 另一方面作物种植结构发生改变, 粮食作物种植面积下降, 经济作物种植面积逐渐增加, 导致单位面积施肥量持续增加。以蜜柚种植为例, 福建省平和县蜜柚农户年均常规施肥量为 $701 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ [33], 高于粮食作物的施肥用量 (福建稻谷年均施肥量为 $98 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$) [34]。同时, 在 2015 年福建省化肥磷素施用水平为 $58.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (纯 P), 高于全国平均值 $46.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [20]。较高的磷肥投入是造成土壤磷素累积过多的直接原因, 2015 年福建省磷素土壤累积量达到 $48.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 约为 1985 年的 3 倍。过量的磷素投入也导致土壤速效磷含量上升迅速, LI 等 [35] 研究表明, 1980—2007 年, 我国南方地区土壤 Olsen-P 平均从 $7.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $25.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 部分区域具有较高的磷淋洗风险。因此, 量化化肥磷素合理投入量, 加强作物养分管理, 是减少磷素损失的关键。

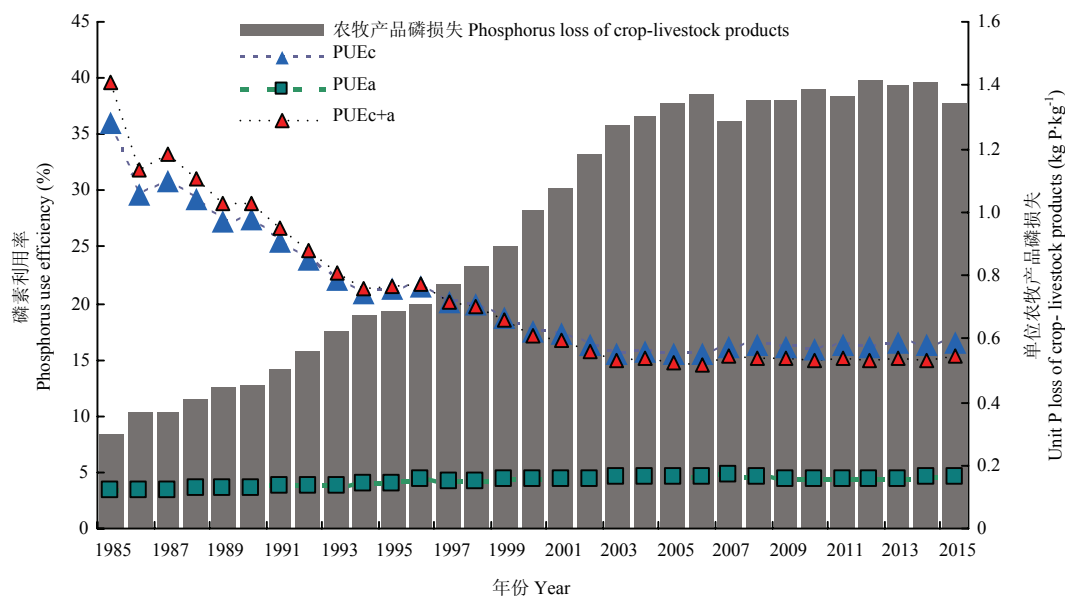


图 4 福建省磷素利用率及单位农牧产品磷损失变化

Fig. 4 Changes in phosphorus use efficiency and unit phosphorus loss of crop-livestock products in Fujian Province

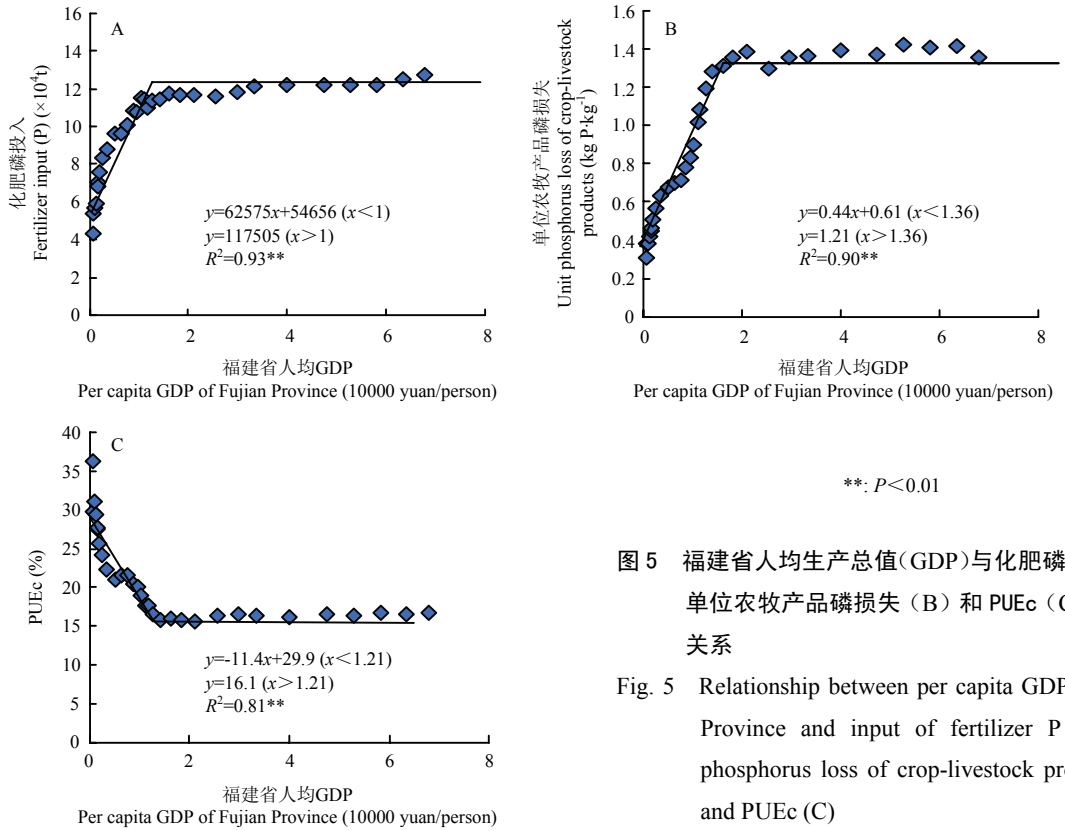


图5 福建省人均生产总值(GDP)与化肥磷投入(A)、单位农牧产品磷损失(B)和 PUEc (C) 之间的关系

Fig. 5 Relationship between per capita GDP of Fujian Province and input of fertilizer P (A), unit phosphorus loss of crop-livestock products (B) and PUEc (C)

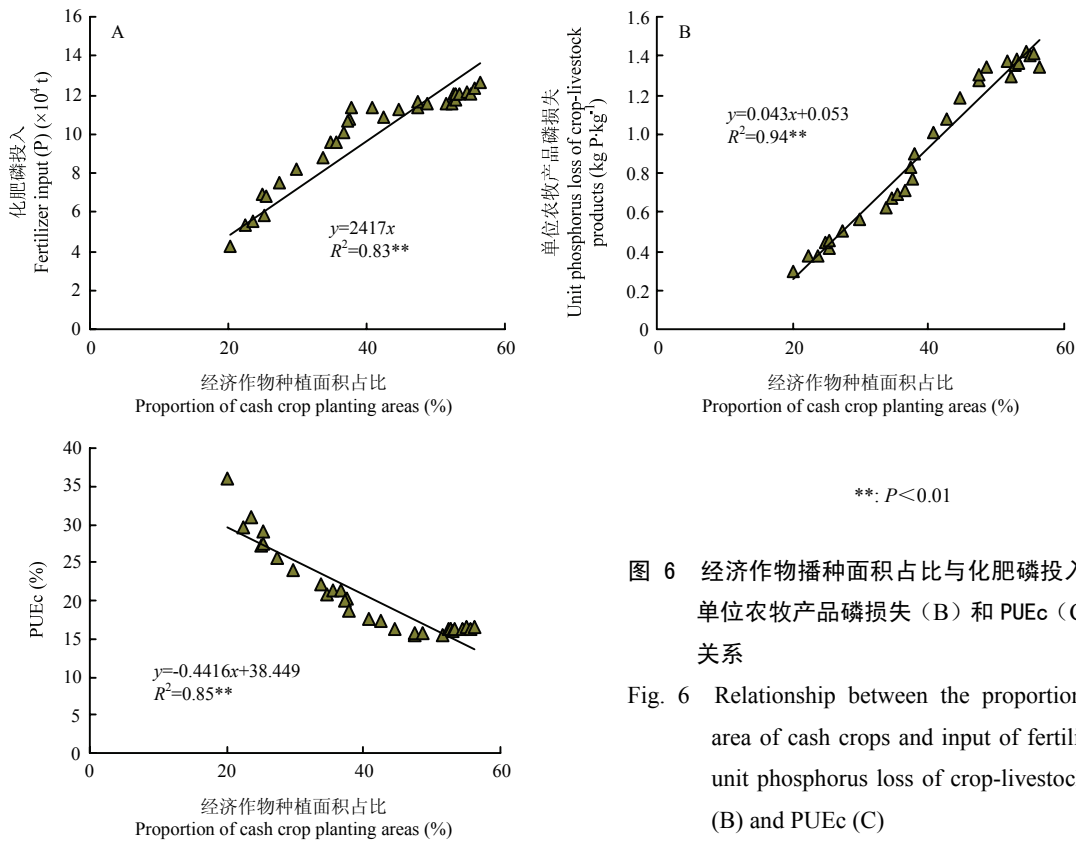


图6 经济作物播种面积占比与化肥磷投入(A)、单位农牧产品磷损失(B)和 PUEc (C) 之间的关系

Fig. 6 Relationship between the proportion of sown area of cash crops and input of fertilizer P (A), unit phosphorus loss of crop-livestock products (B) and PUEc (C)

福建省畜牧业规模从 358×10^4 LU 发展至 $1\,455 \times 10^4$ LU^[16], 导致饲料需求总量增加。然而, 由于种植结构发生改变, 粮食作物种植面积下降, 本地饲料产能不足, 所以外源饲料需求总量增加迅速, 至 2015 年畜牧业中饲料磷进口数量增加至 70.2 Gg, 约为 1985 年的 3 倍 (图 3), 也使进口饲料成为福建省主要的磷来源之一。这与栾城县城等郊养殖型地区研究结果一致^[17]。然而, 集约化畜牧业发展的过程中, 粪尿还田比例逐渐减少, 从 92.8% 降至 53.0%, 农牧结合程度持续降低导致畜禽粪尿的损失从 1.44 Gg 增至 25.8 Gg (图 3), 加剧磷污染风险。因此, 加强区域间农牧结合程度, 加强粪尿养分管理, 对提高磷素利用率具有重要作用。

3.2 福建省农牧生产系统磷素利用率变化特征

福建省 PUE_c 在 1985—2000 出现较急剧的下滑, 于 2000 年之后趋于平稳维持在 17.5% (图 4), 与东北三省相似, 但数值低于东北三省 (均值约为 35%)^[36], 这与 GDP 的发展和经济作物播种面积占比有关 (图 5、图 6)。随着福建省人均 GDP 的增加, 农户有能力向农田中投入更多的化肥磷, 导致 PUE_c 的降低, 这与 BAI 等^[14]研究结果一致。随着茶树、果树等经济作物播种面积占比的增加, 在经济利益驱动下, 农户习惯在单位面积土壤中投入更多化肥磷, 这导致 PUE_c 逐年下降, 这与马怡斐等^[17]对栾城城郊型农牧系统养分流动的研究结果相一致。

福建省 PUE_a 呈现小幅度上升, 这与黑龙江省的研究结果类似, 主要原因可能是畜牧业规模化程度增加, 相较于传统的家庭散养方式, 规模化的养殖场具备更系统的养分管理措施, 同时选择的饲料磷含量更高, 使得 PUE_a 提升^[36]。福建省 PUE_{c+a} 出现下降, 其趋势基本与 PUE_c 相一致 (图 4), 表明农牧系统磷素利用率降低主要受到种植业影响较大; 此外, 由于 1985—2015 年期间, 农牧系统由混合作物-牲畜生产系统向无土地动物生产系统转变, 使得动物粪肥向农业循环利用的机会减少, 这是导致 PUE_{c+a} 下降的另一原因, 与 MA 等^[37]研究结果一致。综上, 提高农牧系统磷素利用率的关键在于加强经济作物养分管理和畜牧业中的废弃物在农业中的循环利用。

3.3 关于提高福建省农牧生产系统磷素利用率的建议

根据 1985—2015 年福建省农牧系统磷素流动变化特征研究结果可知, 福建省农牧生产系统磷素利

率持续降低的主要原因是外源磷素投入较高和农牧系统结合不紧密, 据此提出以下优化建议:

种植业中应加强作物养分管理, 控制磷肥的施用量。福建省经济作物播种面积占比较高, 更应根据作物养分需求, 控制化肥用量, 进而减少磷素地表径流及土壤累积损失。研究表明, 通过土壤-作物系统综合管理方法, 在保持玉米相同产量的同时能够有效减少磷肥施用量 50% 以上^[38]。通过多点的田间试验结果表明, 福建平和琯溪蜜柚在减少农户常规施磷量 45% 的条件下, 并没有使蜜柚减产^[39]。

畜牧业中应提高废弃物资源化利用程度。一方面, 通过加强农牧系统的耦合程度, 提高养分利用率。在区域间, 应加强农牧结合程度, 如通过“绿色循环农业模式”“果-林-畜-沼”模式, 不仅能达到污水废渣零排放, 还能促进农户增收^[40]; 在农场内, 应注重饲料养分管理, 如荷兰的 DeMarke 农场, 通过核算场内养分投入与产出账户平衡, 使养分在农牧体系尽可能循环利用, 达到减少外源养分投入和环境排放^[41]。另一方面, 还应减少畜牧生产环节过程中养分的损失。如在饲料中添加微生物植酸酶^[42], 粪便堆肥加污水处理技术、异位发酵床技术等^[40], 研究表明, 通过加强高负荷区域的堆肥生产可以有效促进有机废弃物的循环利用率同时减少环境排放^[43-44]。

4 结论

1985—2015 年, 福建省农牧生产体系发展迅速, 种植业端, 化肥磷投入显著增加, 土壤磷累积逐年递增, 磷素利用率下降, 主要受到经济作物种植占比增加及农户用肥习惯的影响; 养殖业端, 饲料进口磷增加显著, 畜禽粪尿磷损失加剧, 磷素利用率增加不明显, 主要由于作物种植结构改变导致本地饲料磷供应不足, 以及农牧系统分离程度加剧的影响。综上, 加强农牧系统作物养分管理, 控制磷肥的施用量, 提高畜禽粪便循环利用率, 将是提高福建省农牧系统磷素利用率, 减少环境排放, 促进农牧业可持续绿色发展的重要保障。

References

- [1] SCHACHTMAN D P, REID R J, AYLING S M. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology*, 1998, 116(2): 447-453.
- [2] CORDELL D, NESET T S S. Phosphorus vulnerability: A qualitative

- framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. *Global Environmental Change*, 2014, 24(1): 108-122.
- [3] KOPPELAAR R H E M, WEIKARD H P. Assessing phosphate rock depletion and phosphorus recycling options. *Global Environmental Change*, 2013, 23(6): 1454-1466.
- [4] BOUWMAN L, GOLDEWIJK K K, VAN DER HOEK K W, BEUSEN A H W, VAN VUUREN D P, WILLEMS J, RUFINO M C, STEHFEST E. 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.
- [5] SUH S, YEE S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 806-813.
- [6] OTT C, RECHBERGER H. The European phosphorus balance. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 60(3): 159-172.
- [7] 张晓萌. 东北地区食物链氮磷养分流动特征研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017: 22-34.
- ZHANG X M. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus nutrient flow in food chain in northeast China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017: 22-34. (in Chinese)
- [8] 张华芳. 河北省农牧生产体系氮磷养分流动特征及调控途径[D]. 保定: 河北农业大学, 2013: 15-30.
- ZHANG H F. Nitrogen and phosphorus flow in agro-livestock system and strategies of optimization in Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013: 15-30. (in Chinese)
- [9] 张建杰, 郭彩霞, 张一弓, 张强. 山西省农牧生产体系磷流动空间变异特征. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 553-562.
- ZHANG J J, GUO C X, ZHANG Y G, ZHANG Q. Spatial characteristics of phosphorus flow in crop-livestock production systems in Shanxi, China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(5): 553-562. (in Chinese)
- [10] SMIL V. Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25: 53-88.
- [11] SENTHILKUMAR K, MOLLIER A, PELLERIN S. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: The importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(2): 145-159.
- [12] MA L, MA W Q, VELTHOF G L, WANG F H, QIN W, ZHANG F S, OENEMA O. Modeling nutrient flows in the food chain of China. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1279-1289.
- [13] 魏莎, 柏兆海, 吴迪梅, 夏立江, 江荣凤, 马林. 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. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 430-441.
- WEI S, BAI Z H, WU D M, XIA L J, JIANG R F, MA L. Nutrient flow and environmental effects of “soil-feed-livestock” system in metropolis: A case study in Beijing. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 430-441. (in Chinese)
- [14] BAI Z H, MA L, MA W Q, QIN W, VELTHOF G L, OENEMA O, ZHANG F S. 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.
- [15] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 周碧青, 毛艳玲, 邱龙霞, 邢世和. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究. *土壤学报*, 2014, 51(6): 1270-1281.
- LONG J, ZHANG L M, SHEN J Q, ZHOU B Q, MAO Y L, QIU L X, XING S H. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(6): 1270-1281. (in Chinese)
- [16] 福建省统计局. 福建统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1986-2016.
- Statistical Bureau of Fujian Province. *Fujian Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 1986-2016. (in Chinese)
- [17] 马怡斐, 柏兆海, 马林, 聂永强, 江荣凤. 栾城城郊型农牧系统养分流动与环境排放时空特征. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 493-506.
- MA Y F, BAI Z H, MA L, NIE Y Q, JIANG R F. Temporal and spatial changes of nutrient flows and losses in the peri-urban crop-livestock system in Luancheng. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 493-506. (in Chinese)
- [18] BAI Z H, MA W Q, MA L, VELTHOF G L, WEI Z B, HAVLIK P, OENEMA O, LEE M R F, ZHANG F S. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaar8534.
- [19] 福建省统计局. 福建经济与社会统计年鉴. 福州: 福建人民出版社, 1986-2016.
- Statistical Bureau of Fujian Province. *Fujian Economic and Social Statistical Yearbook*. Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 1986-2016. (in Chinese)
- [20] 国家统计局环境保护部. 中国环境统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1986-2016.
- Ministry of Environmental Protection of the National Bureau of

- Statistics. *China Environmental Statistics Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 1986-2016. (in Chinese)
- [21] 陈代文. 动物营养与饲料学. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2015: 107-304.
- CHEN D W. *Animal Nutrition and Feed Science*. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 107-304. (in Chinese)
- [22] 杨扎根. 主要农作物施肥技术. 北京: 中国农业出版社, 2012: 360-365.
- YANG Z G. *Main Crop Fertilization Technology*. Beijing: China Agriculture Press, 2012: 360-365. (in Chinese)
- [23] 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.
- LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207-4229. (in Chinese)
- [24] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志. 北京: 中国农业出版社, 1999: 5-142
- National Agricultural Technology Extension Service Center. *China Organic Fertilizer Nutrient*. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 5-142. (in Chinese)
- [25] 林赫清, 陈亢川. 福建省食物营养成分表. 福州: 福建科学技术出版社, 1991: 4-40.
- LIN B Q, CHEN K C. *Fujian Food Nutrition Composition Table*. Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 1991: 4-40. (in Chinese)
- [26] 罗文华, 周勤飞, 杨金龙. 适度规模肉兔场高效生产技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015: 12-21.
- LUO W H, ZHOU Q F, YANG J L. *Efficient Production Technology of Moderate-scale Meat Rabbit Farm*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015: 12-21. (in Chinese)
- [27] 黄炎坤, 姜东风. 肉鸡场标准化示范技术. 郑州: 河南科学技术出版社, 2014: 88-112.
- HUANG Y K, JIANG D F. *Broiler Farm Standardization Demonstration Technology*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2014: 88-112. (in Chinese)
- [28] 贾佳. 鸭鹅最佳出栏时间. 农村养殖技术, 2011(19): 49.
- JIA J. Best time for ducks and geese out of the bar. *Rural Breeding Technology*, 2011(19): 49. (in Chinese)
- [29] 中国农业大学. 家畜粪便学. 上海: 上海交通大学出版社, 1997: 265-272.
- China Agricultural University. *Livestock Manure*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1997: 265-272. (in Chinese)
- [30] 朱金凤, 张丁华, 庞歌, 秦彩玲. 黄河湿地野鸭孵化期蛋壳钙、磷含量变化规律的研究. 中国家禽, 2008, 30(6): 24-26.
- ZHU J F, ZHANG D H, PANG G, QIN C L. Change of calcium, phosphorus and potassium contents inside the mallard eggshell in the marsh of the Yellow River during different periods of hatching. *China Poultry*, 2008, 30(6): 24-26. (in Chinese)
- [31] 彭克美. 畜禽解剖学. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 11-277.
- PENG K M. *Livestock and Poultry Anatomy*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2009: 11-277. (in Chinese)
- [32] MA L, VELTHOF G L, WANG F H, QIN W, ZHANG W F, LIU Z, ZHANG Y, WEI J, LESSCHEN J P, MA W Q, OENEMA O, ZHANG F S. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005. *Science of the Total Environment*, 2012, 434(18): 51-61.
- [33] 林瑞坤, 许修柱, 郑朝元, 叶德练, 张世昌, 颜晓军, 刘东晖, 吴良泉. 福建省平和县蜜柚园磷肥使用现状及土壤磷素平衡研究. 福建热作科技, 2018, 43(3): 5-12.
- LIN R K, XU X Z, ZHENG C Y, YE D L, ZHANG S C, YAN X J, LIU D H, WU L Q. Present situation of phosphate fertilizer use and soil phosphorus balance in Pinhe County, Fujian Province. *Fujian Science and Technology of Tropical Crops*, 2018, 43(3): 5-12. (in Chinese)
- [34] 林海柱. 永定县水稻施肥现状、问题与对策. 福建农业科技, 2006(3): 56-57.
- LIN H Z. Present situation, problems and countermeasures of rice fertilization in Yongding County. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2006(3): 56-57. (in Chinese)
- [35] LI H, HUANG G, MENG Q, MA L, YUAN L, WANG F, ZHANG W, CUI Z, SHEN J, CHEN X, JIANG R, ZHANG F. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. *Plant and Soil*, 2011, 349(1/2): 157-167.
- [36] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 冯国忠, 高强. 东北地区农牧系统氮、磷养分流动特征. 中国农业科学, 2018, 51(3): 417-429.
- ZHANG X M, WANG Y, YAN L, FENG G Z, GAO Q. Characteristics of nitrogen and phosphorus nutrient flow in farming and animal husbandry system in northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 417-429. (in Chinese)
- [37] MA L, WANG F H, ZHANG W F, MA W Q, VELTHOF G, QIN W, OENEMA O, ZHANG F S. Environmental assessment of management options for nutrient flows in the food chain in China. *Environmental*

- Science and Technology*, 2013, 47(13): 7260-7268.
- [38] ZHANG F S, CUI Z L, FAN M S, ZHANG W F, CHEN X P, JIANG R F. Integrated soil-crop system management: Reducing environmental risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(4): 1051-1057.
- [39] 许修柱. 琯溪蜜柚生产中的碳排放及优化施肥的综合效应评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 32-46.
- XU X Z. Comprehensive evaluation of carbon emission and optimum fertilization in Guanxi pomelo production[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019: 32-46. (in Chinese)
- [40] 刘源. 东部沿海地区: 福建省福清市畜禽粪污资源化利用整县推进情况. *中国畜牧业*, 2018(20): 24-26.
- LIU Y. Eastern coastal area: The promotion of the utilization of livestock and poultry manure resources in Fuqing City, Fujian Province. *China Animal Industry*, 2018(20): 24-26. (in Chinese)
- [41] 张福锁. 最佳养分管理技术列单. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 92-102.
- ZHANG F S. *List of Best Nutrient Management Technologies*. Beijing: China Agricultural University Press, 2010: 92-102. (in Chinese)
- [42] BOSI P. Feeding strategies to produce high quality pork. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 1999, 12(2): 271-281.
- [43] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 99-111.
- JIA W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 99-111. (in Chinese)
- [44] 王宝英, 邓同炜, 黄炎坤, 向瑞平, 王扬伟. 新编禽病诊疗手册. 郑州: 中原农民出版社, 2006: 21-58.
- WANG B Y, DENG T W, HUANG Y K, XIANG R P, WANG Y W. *New Poultry Diseases Handbook*. Zhengzhou: Zhongyuan Peasant Press, 2006: 21-58. (in Chinese)

(责任编辑 岳梅)