中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

海南农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征

丁尚，郭浩浩，程鸣宇，宋晨阳，刁晓平，赵洪伟

引用本文:
丁尚, 郭浩浩, 程鸣宇, 等. 海南农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 246–256.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180629

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省农牧生产体系磷流动空间变异特征

Spatial characteristics of phosphorus flow in crop–livestock production systems in Shanxi, China

中国生态农业学报. 2016, 24(5): 553–562 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151278

中国食物链养分流动与管理研究

Nutrient flow and management in the food chain in China

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1494–1500 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180668

长春地区食物链磷素养分流动历史变化特征分析

Analysis of historical characteristics of phosphorus nutrient flow in food chain in Changchun area

中国生态农业学报. 2017, 25(8): 1099–1105 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170125

北京"土壤–饲料–奶牛"系统氮磷流动及环境损失时空特征

Temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus cycling and environmental losses in the "soil–feed–dairy" production system in Beijing

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 316–327 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160970

基于物质流分析的农业土地利用系统氮素效应分析*——以湖南省桃江县为例

SFA–based analysis of nitrogen effect on agricultural land use systems in Taojiang County, Hunan Province

中国生态农业学报. 2016, 24(10): 1371–1381 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160327

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 2 月 第 27 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2019, 27(2): 246−256

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180629

丁尚, 郭浩浩, 程鸣宇, 宋晨阳, 刁晓平, 赵洪伟. 海南农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 246−256

DING S, GUO H H, CHENG M Y, SONG C Y, DIAO X P, ZHAO H W. Spatial and temporal characteristics of nitrogen flows in farming and animal production system in Hainan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 246−256

海南农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征*

丁 尚[1], 郭浩浩[1], 程鸣宇[1], 宋晨阳[1], 刁晓平[2,3], 赵洪伟[1,2**]

(1. 海南大学热带农林学院 海口 570228; 2. 海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室 海口 570228; 3. 海南师范大学生命科学学院 海口 571158)

摘 要: 氮素是生命活动必须的元素之一, 然而一定区域内过多的氮素输入可能会造成严重的环境污染。本研究以热带地区的海南岛为研究对象, 明确其农牧生产体系氮素流动过程和特征, 分析氮素输入和输出量变化关系及其利用效率的时空变化, 以期优化农牧体系养分管理, 为制定海南省农牧业发展政策提供科学依据。通过运用食物链养分流动模型(NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use, NUFER)并结合 Origin 和 ArcGIS 等软件分析海南地区 1987—2016 年间农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征, 同时首次对海南省农牧生产体系内部氮素流动在理想与实际情况下的时空变化做出了相关性分析。结果显示海南地区 30 年间农牧生产体系氮素总输入量由 134.15 Gg 增长到 406.39 Gg, 总输出氮素由 84.75 Gg 增长到 307.77 Gg。30 年来, 农田生产子系统氮素利用效率由 12.39%增长到 20.54%, 动物生产子系统氮素利用率由 6.10%增长到 13.88%, 农牧结合体系氮素利用效率整体呈现上升趋势, 由 1987 年的 12.84%增加到 2016 年的 21.63%。空间上, 农田生产子系统中, 氮素总输入与总输出项中增幅最高的分别是澄迈县和琼海市, 五指山市两项增长均最低; 动物生产子系统中, 氮素总输入与总输出项增幅最高的分别是文昌市和儋州市, 五指山市两项增长均最低。1987—2016 年海南岛农牧生产体系氮素投入持续增长, 氮素利用率低下, 空间差异较大, 土壤氮素盈余量较高。相关性分析表明, 农田生产子系统与动物生产子系统出现较严重的脱节。因而, 为提高海南地区氮素流动效率和促进可持续发展, 应注重提高本地饲料产量、合理使用肥料、循环利用畜禽粪尿, 进一步优化农牧业发展布局, 建立农牧结合的高效生产体系。

关键词: 农牧生产体系; 氮素流动; 氮素利用效率; NUFER 模型; 海南

中图分类号: X2; X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)02-0246-11

Spatial and temporal characteristics of nitrogen flows in farming and animal production system in Hainan Province*

DING Shang[1], GUO Haohao[1], CHENG Mingyu[1], SONG Chenyang[1], DIAO Xiaoping[2,3], ZHAO Hongwei[1,2**]

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. College of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

* 海南省重大科技项目(ZDKJ2017002)和海南省自然科学基金项目(417053, 317302)资助

** 通信作者: 赵洪伟, 研究方向为养分管理与农业面源污染防治。E-mail: hwzhao@hainu.edu.cn

丁尚, 研究方向为养分资源管理。E-mail: Dshainu@163.com

收稿日期: 2018-07-04 接受日期: 2018-09-20

* This study was supported by the Key Science and Technology Program of Hainan Province (ZDKJ2017002) and Hainan Provincial Natural Science Foundation (417053, 317302).

** Corresponding author, E-mail: hwzhao@hainu.edu.cn

Received Jul. 4, 2018; accepted Sep. 20, 2018

Abstract: Though nitrogen is one of the necessary elements for life activities, its' excessive input in a region may cause serious environmental pollution. Hainan Island, a province in the tropics, was taken as the research object to investigate the process and characteristics of nitrogen flows in farming and animal production system. To optimize the nutrient management of this system, the relationships of nitrogen input and output changes and the temporal and spatial characteristics of nitrogen utilization efficiency were analyzed, which would provide scientific basis for the policy setting of agriculture and animal husbandry development in Hainan province. The model of NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use (NUFER) combining with Origin and ArcGIS software were used to analyze the temporal and spatial changes of nitrogen flows in farming and animal production system in Hainan Province from 1987 to 2016, meanwhile for the first time, the correlation of spatial and temporal variations of nitrogen flows in the farming and animal production system was analyzed under ideal and actual conditions. The results showed that the total nitrogen input increased from 134.15 Gg to 406.39 Gg, the total nitrogen output increased from 84.75 Gg to 307.77 Gg in the past 30 years. The nitrogen utilization efficiency of the farming production subsystem increased from 12.39% to 20.54%, and that of the animal production subsystem increased from 6.10% to 13%. The nitrogen utilization efficiency of the integrated system of farming and animal production increased from 12.84% in 1987 to 21.63% in 2016. In spatial distribution, the increase of total nitrogen input and output was the highest in Chengmai County and Qionghai City, respectively, while being the lowest in Wuzhishan City. In the animal production subsystem, the increase of total nitrogen input and output was the highest in Wenchang City and Danzhou City, respectively, while being the lowest in Wuzhishan City. The results show that the nitrogen input of farming and animal production system in Hainan Island increased continuously from 1987 to 2016, with the low nitrogen utilization efficiency, the big spatial difference, and the high soil nitrogen surplus. The correlation analysis showed that the farming production subsystem and the animal production subsystem were disjointed seriously. Therefore, in order to improve the efficiency of nitrogen flows and promote the sustainable development in Hainan Province, it is necessary to increase the yield of local feedstuff, make rational use of fertilizer, recycle livestock and poultry manure, further optimize the layout of agriculture and animal husbandry development, and establish a highly efficient production system for farming and animal husbandry.

Keywords: Farming and animal production system; Nitrogen flows; Nitrogen utilization efficiency; NUFER model; Hainan

氮素是满足生物生长和繁育所必需的营养元素。在农牧业发展过程中, 氮素的投入量不断增加。但是由于氮肥的不合理施用, 未被作物吸收的氮素养分或累积在土壤中, 或通过径流、氨挥发等途径损失到环境中, 造成了土壤酸化[1]、地下水硝酸盐含量过高[2]、地表水富营养化[3]等环境问题。自海南 1988 年建省办经济特区以来, 海南农业已取得长足发展, 尤其是发展热带特色农业生产在特区经济建设中受到高度重视。与此同时, 由于畜牧业正处于由传统家庭养殖模式向现代集约化养殖模式转型的阶段, 农牧分离问题凸显, 畜禽粪尿还田利用率降低且环境排放比例不断增加[4]。

国内外学者在氮磷流动和养分平衡管理问题上已有相关研究。Senthilkumar 等[5]利用物质流分析的方法在区域尺度上对养分循环利用及管理提出了评价和建议。Smith 等[6]通过氮素养分平衡建立了氮素排放的估算方法, 计算出畜禽系统氮素排放量, 同时针对地表和水体氮素损失的控制提出相关策略。Ma 等[7]构建了中国食物链系统养分流动模型(NUtrient Flow in Food chain, Environment and Resources use, NUFER), 用于分析评价区域氮磷养分在生产和消费环节的利用率和损失状况。佟丙辛等[8]分析了华北平原典型区域农牧系统氮素流动及其环境效应, 分别定量 1980—2015 年河北省农田体系、畜牧体系和农牧系统的各个氮素输入和输出项, 同时利用氮素利用率、氮素盈余量和氮素回田率等指标分析氮素流动特征与环境效应。张建杰等[9]使用 NUFER 模型与 ArcGIS 相结合, 研究了 2011 年山西省 11 个地市农牧生产体系磷元素流动, 从时空维度评价了山西畜禽资源量及其环境风险, 提出应进一步加强农牧耦合程度、提高有机废弃物的循环利用效率以实现区域间养分的高效利用。但是在国家或区域尺度上, 对于热带地区农牧生产体系养分资源流动特征尚缺乏研究。海南省是我国唯一的热带岛屿省份, 区域位置优越, 农牧业发展处于上升期, 为推动热带地区农牧业高效发展, 需明确其养分流动特征。基于此, 本研究以海南地区氮素流动时间变化和空间差异为切入点, 通过数据分析与实地调研, 重点分析氮素流动及其利用效率, 揭示近 30 年间海南热带特色农牧生产体系养分流动特征。借助 NUFER 模型, 运用物质流分析法, 对海南省农牧生产体系内部氮素流动的时空变化做出了相关性分析, 以期为海南农牧业生产乃至热带地区氮素流动管理提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

海南岛属于热带季风气候, 全年气候温和, 典型土壤为砖红壤, 是我国发展热带特色高效农业的宝地, 1987 年到 2016 年, 热带经济作物产量由 23.96 万 t 增至 85.02 万 t, 瓜果蔬菜产量由 55.30 万 t 增至 794.39 万 t。

到 2016 年, 本地耕地面积约 4 273 km^2, 复种指数高达 192.6%。由于四面环海, 形成天然的防疫屏障, 海南岛畜牧业发展优势突出, 产量连续 5 年保持两位数增长。截至 2016 年底, 牧业总产值达 267.10 亿元, 牲畜年出栏量达 638 万头, 家禽年出栏量为 15 315 万只, 其中肉蛋奶类总产量达 81.41 万 t, 较 1987 年增长 6 倍左右[10]。

1.2 研究方法

NUFER 模型是中国国家和区域尺度食物链系统氮磷流动模型, 可以模拟"土壤-作物生产-畜禽生产-家庭消费"系统氮磷流动和利用效率以及含氮气体的挥发、土壤径流、淋溶、侵蚀等[11]。本研究以"土壤-作物-畜禽"为研究对象, 利用 NUFER 模型, 定量分析海南地区各市县氮素流动时空变化特征(图 1)。同时利用 Origin 分析海南岛农牧生产体系氮素输入输出项、氮素利用率及农牧相关性关系, 利用 ArcGIS 软件分析区域土壤氮盈余量以及体系氮流动量情况。

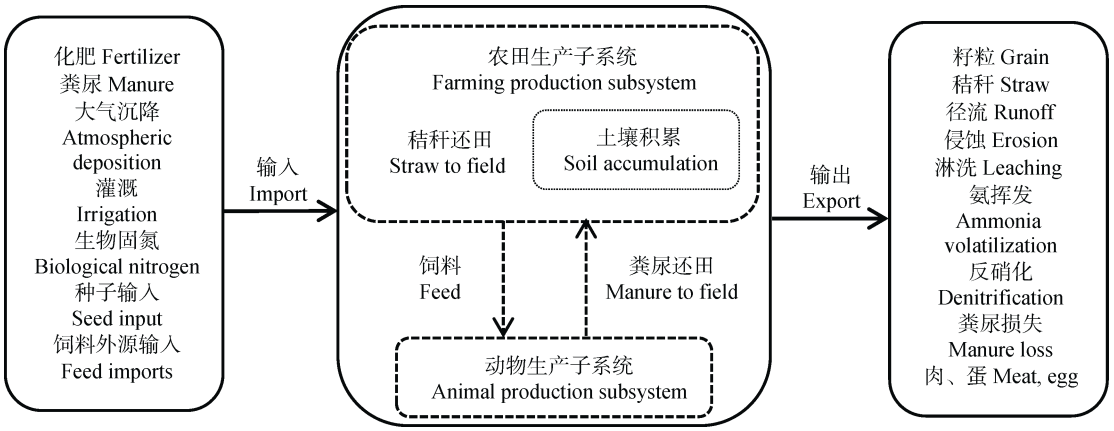

图 1 农牧生产体系氮流动模型

Fig. 1 Schematic diagram of nitrogen flows model in farming and animal production system

1.3 数据来源及统计分析

农牧生产体系中, 农田生产子系统氮素输入项包括化肥投入、粪尿和秸秆还田、农田灌溉、生物固氮、干湿沉降和作物种子输入等; 输出项包括作物主副产品输出、农田系统氨挥发、反硝化作用以及土壤淋洗及径流侵蚀作用。动物生产子系统氮素输入项包括饲料投入(本地饲料投入及外源饲料投入), 输出项包括动物主副产品输出, 以及粪尿损失等。体系内循环包括秸秆还田、粪尿还田和本地饲料输入。

本研究所需数据包括近 30 年海南省各市县耕地数量、主要农作物播种面积及产量、畜牧业生产情况等, 主要来源于海南省统计年鉴[10]。动物生产子系统相关项目见表 1, 作物生产子系统相关数据见表 2, 环境损失相关参数见表 3。

1.3.1 农田生产子系统

1)输入项计算方法

化肥氮素投入量(I_{Nfer}): 来源于海南统计年鉴, 复合肥中氮含量比来源于 Ma 等[12]研究结果, 氮肥实际投入比例参考李勇等[13]研究的结果。

$$有机肥氮素投入量(I_{Narm})=I_{Nam}+I_{Nst}+I_{Nhm} \quad (1)$$

式中: I_{Nam} 为动物粪尿氮还田量; I_{Nst} 为作物秸秆氮还田量; I_{Nhm} 为人粪尿氮还田量, 人粪尿收集率为 45%, 其中的 50%还田[14]。

$$作物副产品氮素还田(I_{Ndischarge})=Y_g\times R_{gs}\times N_{sc}\times R_{st} \quad (2)$$

式中: Y_g 为作物主产品产量, R_{gs} 为草谷比, N_{sc} 为作物副产品含氮量, R_{st} 为还田比。

$$灌溉水氮素输入量(I_{NHw})=C_a\times I_{NIwa} \quad (3)$$

式中: C_a 为作物种植面积, I_{NIwa} 为单位面积灌溉量[15]。

$$生物固氮量(I_{NBf})=C_{aNF}\times I_{Nfpua} \quad (4)$$

式中: C_{aNF} 为固氮作物种植面积, I_{Nfpua} 为单位面积固氮量。

$$大气沉降量(I_{NDep})=C_a\times N_{Ad} \quad (5)$$

式中: C_a 为作物种植面积, N_{Ad} 为单位面积氮大气沉降量。

$$作物种子输入氮量(I_{SInp})=C_{Sow}\times N_{SCon} \quad (6)$$

式中: C_{Sow} 为播种量; N_{SCon} 为种子含氮量。

2)输出项计算方法

$$作物主产品收获氮素量(Y_{Nm})=Y_g\times N_{TNc} \quad (7)$$

式中: Y_g 为主产品产量, N_{TNc} 为主产品含氮素量。

$$作物副产品收获氮素量(Y_{Nb})=Y_g\times R_{gs}\times N_{sc} \quad (8)$$

式中: N_{sc} 为副产品含氮素量。

1.3.2 动物生产子系统

1)输入项计算方法

$$本地饲料投入氮素量(I_{NLc})=(Y_{Nm}+Y_{Nb})\times N_{Rf} \quad (9)$$

式中: N_{Rf} 为饲用比例。

$$外源饲料投入氮素量(I_{NEc})=I_{NAm}-I_{NLc} \quad (10)$$

$$I_{NAm}=O_{NMep}+O_{NAbpn}+O_{NManure}+O_{Nsa} \quad (11)$$

式中: I_{NAm} 为动物体系氮素需求量, O_{NMep} 为肉蛋产

品含氮量, O_{NAbpn} 为动物副产品氮素量, $O_{NManure}$ 为动物粪尿含氮量, O_{Nsa} 为动物活体储存氮量。

表 1　主要畜禽各部分含氮比例、粪尿排泄量和还田系数

Table 1　Nitrogen content ratio, excretion of manure and farmland returning coefficient of major livestock and poultry

项目 Project	粪尿 Manure				食用部分 Edible part[20]		骨头部分 Bone part[20]		其他 Other[20]	
	挥发[16-17] Volatilization[16-17] (%)	排泄量[18-19] Excretion[18-19] ($t \cdot a^{-1}$)	含氮比例[18] Nitrogen ratio[18] (%)	还田比例[20] Return ratio[20] (%)	占比 Proportion (%)	氮含量 Nitrogen content ($g \cdot kg^{-1}$)	占比 Proportion (%)	氮含量 Nitrogen content ($g \cdot kg^{-1}$)	占比 Proportion (%)	氮含量 Nitrogen content ($g \cdot kg^{-1}$)
猪 Pig	26.20	1.90	0.24	50	50	0.15	13	0.19	37	0.22
役用牛 Draft cattle	12.30	10.10	0.35	54	45	0.28	20	0.18	35	0.22
肉牛 Beef	12.30	7.70	0.35	65	45	0.28	20	0.18	35	0.22
奶牛 Dairy cattle	12.30	19.40	0.35	72	45	0.28	20	0.18	35	0.22
羊 Sheep	16.70	0.90	1.01	23	55	0.21	24	0.19	21	0.22
鸡 Chicken	50.90	0.05	1.03	22	65	0.27	20	0.26	15	0.15
鸭 Duck	25.70	0.05	0.60	45	65	0.27	20	0.26	15	0.15
鹅 Goose	25.70	0.20	0.60	45	65	0.27	20	0.26	15	0.15

动物生产子系统中，由于各研究对象存在不同年龄段、不同区域的差异，即相关参数在一定区间变动，所以本研究中部分项目所选数值在王方浩等[18]和马林[20]研究成果上取其平均值，猪牛羊等按规模化养殖与散养比例核算还田比例等参数。In the animal production subsystem, due to differences among different age groups and regions, the relevant parameters vary within a certain range. Therefore, the average values selected in some projects of this study were taken by referring to the research results of Wang, et al[18] and Ma[20]. The parameters of manure returning ratios such as swine, bovine, sheep were calculated according to the proportions of large-scale breeding and free breeding.

表 2　主要农作物种子及主副产品含量、还田率、饲用比例

Table 2　Nitrogen contents, returning rates, feed ratios of main crop seeds and main by-products

作物 Crop	作物籽粒氮产量[20-27] Grain nitrogen yield[20-27] ($g \cdot kg^{-1}$)	草谷比[28] Grass/valley ratio[28]	秸秆含氮量[15,29] Straw nitrogen content[15,29] ($g \cdot kg^{-1}$)	播种量[14] Seed quantity[14] ($kg \cdot hm^{-2}$)	种子含氮量[14] Seed nitrogen content[14] ($g \cdot kg^{-1}$)	秸秆还田率[14] Straw return rate[14] (%)	饲用比例[20] Feed ratio[20] (%)
水稻 Paddy	12	0.9	8.0	10	14	41.7	37.5
大豆 Soybean	56	1.6	16.0	68	53	16.8	0
薯类 Potato	3	0.5	3.0	1 313	3	50.0	40
花生 Peanut	47	0.8	17.0	180	44	26.0	0
芝麻 Sesame	25	2.2	0.3	5	29	34.0	0
甘蔗 Sugarcane	23	0.3	10.0	—	—	10.0	0
蔬菜 Vegetables	3	0.1	24.0	—	—	—	—
水果 Fruits	4	—	—	—	—	—	—
胡椒 Black pepper	27	—	—	—	—	—	—
槟榔 Areca catechu	28	—	—	—	—	—	—
椰子 Coco nut	40	—	—	—	—	—	—
油棕 Oil palm	65	—	—	—	—	—	—
橡胶 Rubber	33	—	—	—	—	—	—
剑麻 Sisal hemp	10	—	—	—	—	—	—
咖啡 Coffee	32(小粒种 Small seed) 24(中粒种 Medium seed)	—	—	—	—	—	—
茶叶 Tea	50	—	—	—	—	—	—

农田生产子系统中，主产品含氮量等参数在参考马林等学者[14-15,20-29]的研究成果基础上取平均值。“—”表示无数据来源或者基于本研究不予考虑。In the farming production subsystem, the average values of nitrogen contents and other parameters of the main products are averages of data in the reports of Ma, et al[14-15,20-29]. “—” means no data source or not considered in this study.

表 3 自然条件下农田生产子系统输入输出项基本参数

Table 3 Basic parameters of input and output items of farming production subsystem under natural conditions

项目 Project	参数 Parameter
生物固氮 Biological nitrogen fixation	150 kg(N)·km^{-2}·a^{-1}[30]
氮沉降 Nitrogen deposition	33 kg(N)·km^{-2}·a^{-1}[30]
氨挥发 Ammonia volatilization	11.7%[31]
反硝化 Denitrification	10.0%[14]
淋溶 Leaching	25.5%[32]
径流侵蚀 Runoff erosion	270 kg(N)·km^{-2}·a^{-1}[33]

氨挥发、反硝化为施肥量按一定比例的损失，淋溶为土壤表面氮素盈余按一定比例的损失。Ammonia volatilization and denitrification are the losses according to a certain proportion of fertilizer amount, and leaching is the loss with a certain proportion from soil surface nitrogen surplus.

2)输出项计算方法

$$动物主产品含氮量(O_{NAMMP})=O_{NAMMeat}+O_{NAMEgg} \quad (12)$$

式中: $O_{NAMMeat}$ 为肉类含氮量, O_{NAMEgg} 为蛋类含氮量。

$$动物副产品含氮量(O_{NAMSP})=Q_{AM}\times W_{AMA}\times(R_{AMRB}\times O_{NAMNCB}+R_{AMRO}\times O_{NAMNCO}) \quad (13)$$

式中: Q_{AM} 为动物数量, W_{AMA} 为单个动物活体重[9], R_{AMRB} 为骨等所占比例, O_{NAMNCB} 为骨等含氮量, R_{AMRO} 为其他副产品所占比例, O_{NAMNCO} 为其他副产品含氮量。

$$粪尿氮量(O_{NManure})=Q_{AM}\times O_{NSAEON} \quad (14)$$

式中: O_{NSAEON} 为单个动物排泄氮量。

$$粪尿还田量(O_{NRe})=O_{NManure}\times N_f \quad (15)$$

式中: N_f 为粪尿还田比。

$$粪尿氨挥发(O_{NAvol})=O_{NManure}\times N_{vol} \quad (16)$$

式中: N_{vol} 为粪尿氨挥发系数

1.3.3 农牧体系氮素利用效率

$$农田系统氮利用效率(NUEc)=作物主产品氮素量/农田子系统氮素总投入\times 100\% \quad (17)$$

$$畜牧系统氮利用效率(NUEa)=动物主产品氮素量/畜牧子系统氮素总投入\times 100\% \quad (18)$$

$$农牧系统氮素综合利用效率(NUEc+a)=(作物主产品氮素量+动物主产品氮素量-作物主产品饲用量)/牧系统氮素总投入\times 100\% \quad (19)$$

本研究中，畜禽饲养过程中氮素挥发包括在损失项目内，作物副产品还田选取典型还田作物为计算项，还田中未细分青饲料、绿肥和饼肥等。植物蒸发作用等氮素损失不考虑。

1.4 农牧生产体系相关性研究方法

农牧生产体系氮素循环包括秸秆还田、粪尿还田和作物产品饲用。假定在理想农牧生产体系中, 3 个环节的氮素全面利用，即作物副产品所含氮素全部流向农田(包括秸秆还田及产品饲料的输入)，主产品按饲用比例输入农田，动物生产子系统所产生的粪便氮素含量去除氨挥发部分全部用于还田。为了解农牧结合情况，首先建立一条理想体系内氮素流动趋势线，同时建立另一条体系内实际氮素流动趋势线，两者间差值部分定义为分离阈，以此直观地表现海南省农牧生产体系结合程度。

$$理想农牧生产体系氮循环量(N_{CYideal})=Y_{Nb}+Y_{Nm}\times N_{Rf}+(O_{NManure}-O_{NAvol}) \quad (20)$$

式中: Y_{Nb} 为作物副产品收获氮量, Y_{Nm} 为主产品收获氮量, N_{Rf} 为主产品饲用比例, $O_{NManure}$ 为粪尿含氮量, O_{NAvol} 为粪尿氨挥发量。

$$实际农牧生产体系氮循环量(N_{CYreality})=I_{Nam}+I_{Ndischarge}+L_{NLc} \quad (21)$$

式中: I_{Nam} 为粪尿还田量, $I_{Ndischarge}$ 为秸秆还田量, L_{NLc} 为本地饲料量。

2 结果与分析

2.1 农田生产子系统的氮素平衡时空变化

1987—2016 年，海南农田生产子系统氮素总输入呈现明显的增长趋势(图 2A)，从 109.93 Gg 到 326.29 Gg，增长 196.82%。澄迈县 30 年内增长最多(图 2B)，增长了 27.26 Gg，五指山市呈现负增长，由

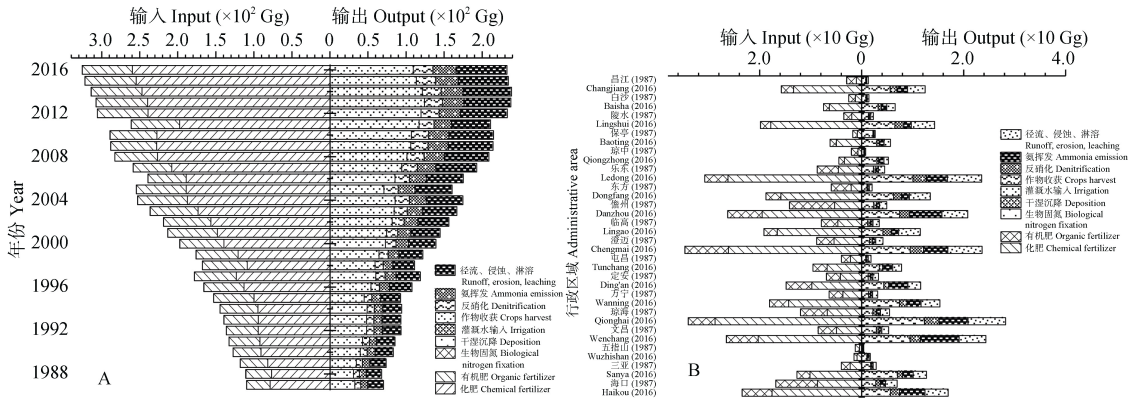

图 2 1987—2016 年海南省农田生产子系统氮素流动时空变化(A: 1987—2016 年农田生产子系统氮素平衡; B: 1987 年和 2016 年不同区域农田生产子系统氮素平衡)

Fig. 2 Spatial and temporal variations of nitrogen flows of farming production subsystem in Hainan Province from 1987 to 2016 (A: nitrogen balance of farming production subsystem from 1987 to 2016; B: nitrogen balance of farming production subsystem in different administrative areas of Hainan Province in 1987 and 2016)

1.52 Gg 降至 0.85 Gg。化肥作为农田氮素的主要来源, 输入量从 78.60 Gg 增长到 259.81 Gg, 在氮素总输入项中比例也从 71.50%增长到 79.63%, 呈现较大增幅。除五指山市从 1987 年的 0.44 Gg 增至 2016 年的 0.91 Gg 外, 区域氮肥输入量均有较大增长, 其中增长量最大的是琼海市, 增长了 21.99 Gg。对于有机肥料的投入, 1987—2016 年总体呈现增长趋势。其中来源于作物副产品的量维持在 6 Gg 左右, 而动物粪尿还田量在 2001 年前有较大增长, 近十多年来增长缓慢, 且在 2006 年有较大波动。对比化肥输入量, 有机肥的输入占肥料总输入(化肥+有机肥)比从 28.14%降至 20.19%。从氮素总输出来看, 总体趋势与总输入量一致, 总量上看略低于总输入项, 且前期较为平稳, 近十多年有较大增幅。琼海市增量最大, 增长 20.49 Gg, 五指山市增量最小, 增长 1.43 Gg。作物主产品收获氮素量从 13.73 Gg 增至 67.11 Gg, 区域作物主产品收获氮素以琼海市增速最快, 由 1.15 Gg 增至 9.46 Gg, 增长 8 倍左右, 五指山市增长最慢, 仅增长 0.65 Gg。土壤氮素盈余量由 39.17 Gg 增长到 93.03 Gg, 其中五指山市由 0.45 Gg 降至 0.08 Gg, 澄迈县增长最快, 由 3.25 Gg 增至 12.77 Gg。

2.2　动物生产子系统的氮素平衡时空变化

动物生产子系统中氮素总输入趋势大致分为两个阶段(图 3A), 第 1 阶段为 1987—2001 年, 投入量由 59.27 Gg 增长到 144.96 Gg, 与 1987 年相比增长了 2.45 倍。第 2 阶段为 2001 年以后, 增长趋势较缓, 由 144.96 Gg 增长到 150.45 Gg。文昌市增长最快(图 3B), 2016 年输入量约为 1987 年的 4.64 倍, 五指山市增长最慢, 仅增长了 0.57 Gg。近 30 年来, 本地来源的饲料投入维持在 4~7 Gg 之间, 各年份之间略有波动。2016 年, 本地饲料供应量最多的是儋州市, 为 0.70 Gg, 最少的是五指山市, 约为 0.03 Gg。相比之下, 系统外源饲料的投入 30 多年来维持较高的投入水平, 由 55.01 Gg 增至 145.85 Gg, 增幅在 165%左右。对比可知, 动物生产子系统主要氮素来源为外源饲料。地方上, 对外源饲料依赖量增长最快的是文昌市, 由 3.20 Gg 增长到 15.22 Gg, 五指山市对外源饲料需求一直较小, 需求量保持在 0.60~1.22 Gg 左右。30 年来, 动物氮素总输出亦快速增长, 由 51.28 Gg 增长到 145.35 Gg。其中动物产品输出项由占总输出的 10.44%增至 20.98%, 而粪尿还田、粪尿氨挥发在动物生产子系统总输出中均占较大比例。1987 年, 两者分别占总输出量的 49.10%和 15.99%。到 2016 年, 两者占总输出量的 31.72%与 26.02%。

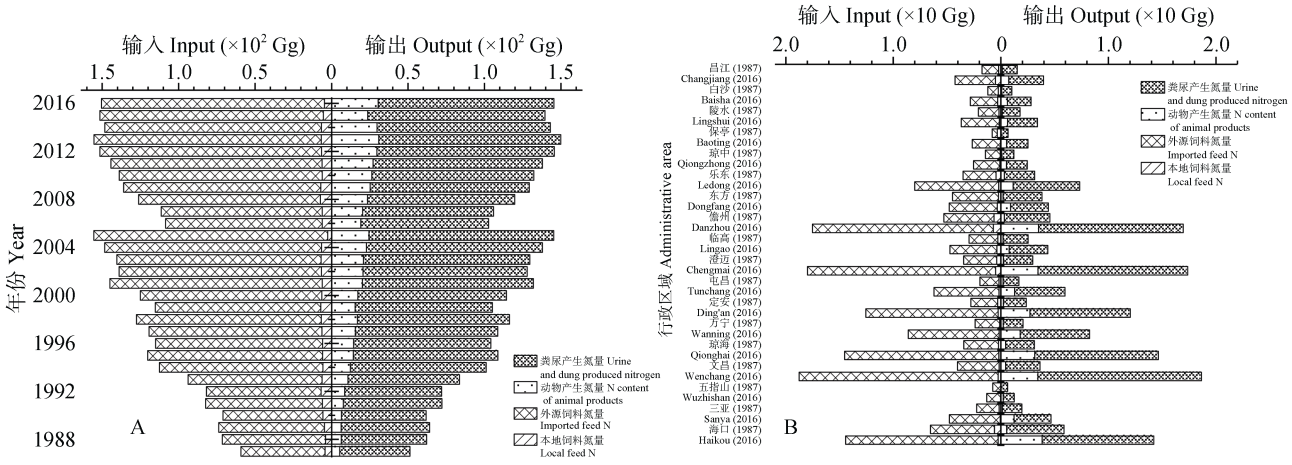

图 3　1987—2016 年海南省动物生产子系统氮素流动时空变化(A: 1987—2016 年动物生产子系统氮素平衡; B: 1987 年和 2016 年不同区域动物生产子系统氮素平衡)

Fig. 3　Spatial and temporal variations of nitrogen flows of animal production subsystem in Hainan Province from 1987 to 2016 (A: nitrogen balance of animal production subsystem from 1987 to 2016; B: nitrogen balance of animal production subsystem in different administrative areas of Hainan Province in 1987 and 2016)

2.3　海南岛农牧生产体系的氮素流动及利用效率

1987 年和 2016 年(图 4A), 海南省农牧生产体系氮素总输入量分别为 134.15 Gg 和 406.39 Gg, 体系总输出氮素分别为 84.75 Gg 和 307.77 Gg, 体系氮素循环量分别为 35.04 Gg 和 70.31 Gg。从输入项构成来看, 1987 年到 2016 年, 化肥投入比例由 58.59%增至 63.93%, 外源饲料投入比例由 41.01%降至 35.89%。从输出项构成看, 动物与作物产品的总输出量占体系总输出比例由 30.99%增长到 37.60%。土壤径流侵蚀、淋溶等作用以及氨挥发和反硝化始终在土壤输出项中占有很大比例。30 年间, 损失量由 37.76 Gg 增至 123.28 Gg, 占总输出项的比例由 44.55%变化至 40.06%。从 1987—2016 年, 本地饲料投入量在饲料总输入中始终占据较小比例, 1987 年和 2016 年分别

是 7.2%和 3.1%，农牧生产体系严重依赖外源饲料投入。同时动物粪尿还田和秸秆还田比重有所降低，在农田生产子系统总输入量的占比由 23.22%降至 14.28%。30 年来，农田生产子系统氮素利用效率由 12.39%增长到 20.54%，动物生产子系统氮素利用率由 6.10%增长到 13.88%，农牧结合体系氮素利用效率整体呈现上升趋势，由 1987 年的 12.84%增加到 2016 年的 21.63%(图 4B)。从 1987 年至 2016 年海南省各市县农牧生产体系氮素流动情况发生了显著的变化(图 5)，1987 年氮素流动量较高的有海口、儋州。到 2016 年，澄迈、琼海等地氮素流动量较高。1987 年，土壤盈余量最大的前 3 个市县依次是海口、儋州和澄迈(图 5A)。而 2016 年，土壤盈余量最大的前 3 个市县依次是澄迈、儋州和乐东(图 5B)。

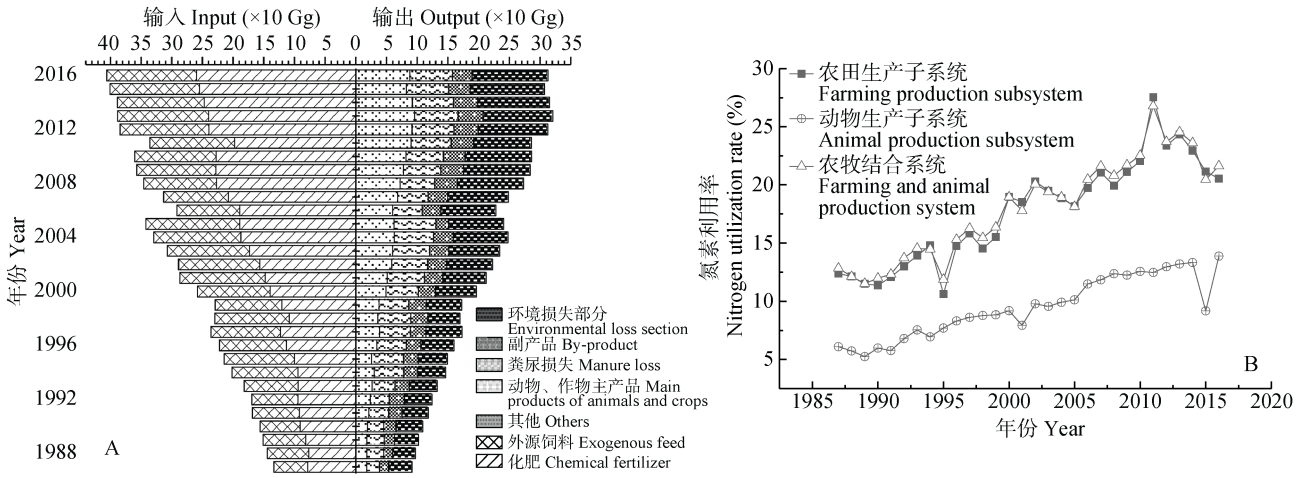

图 4 1987—2016 年海南农牧生产体系氮素流动(A)及利用率(B)的变化

Fig. 4 Changes of nitrogen flow (A) and utilization rate (B) of farming and animal production system of Hainan Province from 1987 to 2016

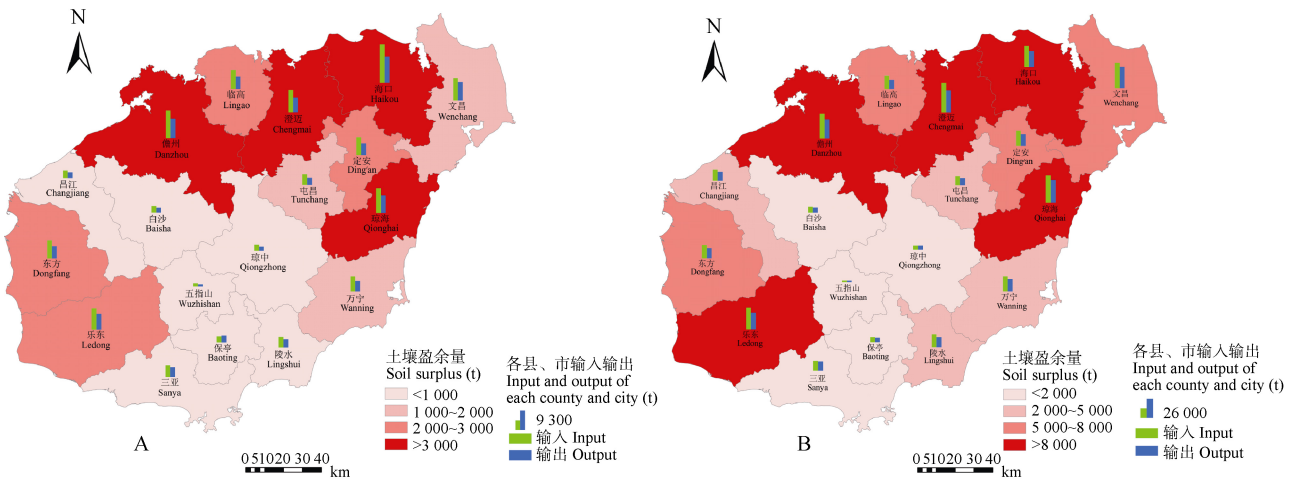

图 5 海南省 1987 年(A)和 2016 年(B)各市县农牧生产体系氮素输入输出

Fig. 5 Nitrogen input and output of farming and animal production system of Hainan Province in 1987 (A) and 2016 (B)

2.4 海南岛农牧生产体系环境损失变化

农牧体系生产过程中，对环境影响的因素表现在含氮气体挥发、反硝化、土壤的径流侵蚀、淋溶和粪尿损失等，由于氮素流动能力较强，通过向大气和水体中流动，造成大气污染、水体富营养化等较严重的环境问题。1987 年，农田生产子系统各项目排放总和为 37.75 Gg，动物生产子系统向环境排放量为 21.08 Gg；到 2016 年，农田和动物生产系统环境排放量分别为 123.28 Gg 和 69.28 Gg。1987 年和 2016 年氮素总损失量在体系总输出项所占比例分别为 69.42%和 62.57%，土壤盈余量由 39.17 Gg 增长到 93.03 Gg。

2.5 农牧生产体系线性相关性结果

由图 6A 可知，体系内氮素流动在 2004 年之前呈现较快增长趋势，2004—2005 年开始下降，之后缓慢上升，实际趋势线与理想趋势线间差距逐渐增大。近年虽然差距有所减小，但就分离阈上来看，仍是 1987 年的 2 倍。从空间上看(图 6B)，2016 年各市县体系内部氮素流动区域差异较大且流动量普遍较

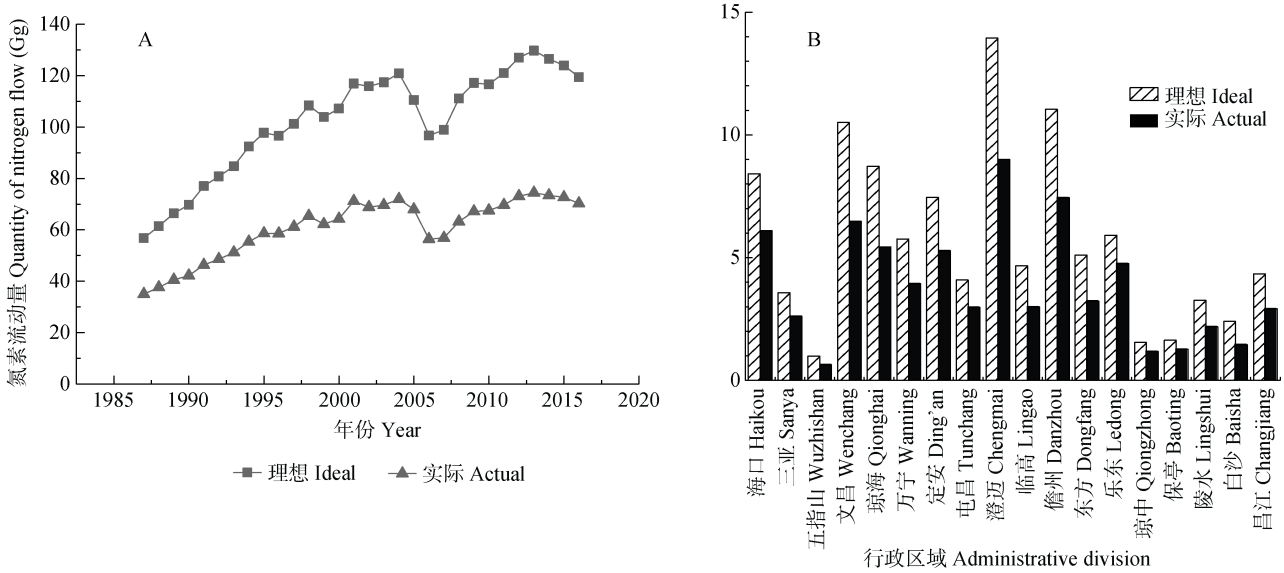

图 6　海南省农牧生产体系氮素流动相关性分析(A: 1987—2016 年农牧生产体系相关性关系; B: 2016 年各市县农牧生产体系相关性关系)

Fig. 6　Correlation analysis of nitrogen flow in farming and animal production system in Hainan Province (A: correlation trend analysis of farming and animal production system in Hainan Province from 1987 to 2016; B: correlation trend of farming and animal production system in different administrative areas of Hainan Province in 2016)

低, 超过 10 Gg 的仅有文昌、澄迈和儋州。研究表明这些农牧业较发达的地区氮素实际输入量与理想输入量差值较大, 而不发达的地区如五指山、琼中和保亭, 两者流动量接近。

3　讨论

3.1　海南省农牧生产体系氮素流动特征

农牧结合是推动农业可持续和集约化发展的必然出路[34], 因而对农牧生产体系的整体性研究意义重大。海南地区由于其独特的区位特点, 农牧生产体系氮素流动呈现如下特征: 1)增长较快但总量较低。体系中农田生产子系统与动物生产子系统中氮素的输入项与输出项 30 年间均增长了 3 倍左右。但从总量上看, 全省氮素流动仅达到某些地市水平。以长春地区为例[35], 2013 年长春地区农田生产子系统总输入、输出分别为 405 Gg 和 280 Gg, 动物生产子系统总输入、输出分别为 118 Gg 和 101 Gg, 与海南省 2016 年相近。2)区域间农牧发展极不平衡。2016 年各市县农牧生产体系总输入量最高的澄迈县, 输入总量为 43.65 Gg, 输入量最低的是五指山市, 仅为 2.20 Gg。体系输出项中, 琼海市年总输出量为 35.14 Gg, 而五指山市仅为 2.04 Gg。3)化肥投入比例大且利用率低。2016 年海南省农牧生产体系化肥氮素投入量占体系氮素总投入量的比例为 63.93%, 而国内一些研究结果显示, 化肥氮素投入占农田氮素投入的比例为 47.40%(全国尺度)[36]。相比之下, 海南省化肥投入所占比例偏高。鲁如坤等[37]认为氮肥投入的利用率为 60%; 而杨林章等[38]指出, 氮肥只有 50%被吸收利用; 而阮云泽[39]通过研究得出, 热带地区旱地砖红壤上氮肥利用率为 22.50%~43.84%(平均利用率为 33.32%), 可见热带地区氮肥损失严重。4)体系主产品输出率低且外源饲料依赖严重。1987 年和 2016 年主产品输出量占比分别为 20.01%和 28.54%。外源饲料投入方面, 河北省外源饲料氮素依赖率从 1980 年的 60.5%增至 2005 年的 85.6%[8]; 重庆市 1996 年外源饲料投入比例为 78.0%, 且到 2015 年均未产生较大变化[40]。海南省外源饲料投入占总饲料输入比例从 1987 年 92.87%增至 2016 年的 96.95%, 30 年来饲料输入严重依靠外来进口, 因而不利于农牧生产体系高效发展, 同时降低了农民收益。5)环境损失量较大, 面源污染较严重。海南省土壤盈余量 30 年间增长 3 倍左右, 2016 年达 93 Gg。各市县总量多在 2 Gg 以上, 呈现北多南少的特点。反映了近 30 年来农田生产子系统氮素输入过量、农牧生产布局和管理不合理等问题。土壤中盈余的氮素既造成了资源的浪费, 又会经挥发、淋溶和径流等途径进入环境中, 进而对环境造成压力。而农牧生产体系又是氮素排放主要来源[35], 因而加大对体系内氮素环境排放的跟踪和控制意义重大。

3.2　海南省农牧生产体系氮素流动区域变化分析及变化预测

海南省农牧生产体系氮素流动区域变化差异明

显，大致归为以下因素：1)现代化和城市化进程造成部分市县农牧生产体系规模减少。以海口市为例，30 年间施肥量与本地饲料投入量减少，农牧产品输出量增长缓慢。耕地面积由 1987 年的 56 915 hm^2(含琼山县，今琼山区)降至 47 880 hm^2。主要因为其城市化进程不断加快，占用大量耕地面积。2)由地理因素导致农业布局差异。以五指山市为例，30 年里农牧生产体系内各项指标均低于省内其他市县，主要由于五指山市位于海南岛中部，群山环抱，森林覆盖率高，耕地面积较小，30 年间保持在 2 000 hm^2 左右，因而农业发展水平较低。且由于地形原因，农业发展主要以热带花卉、高山蔬菜、灵芝、茶叶等特色农产品为主。3)区域经济发展导致农业现代化程度不同。研究结果显示，动物产品输出量较高的地区主要有儋州市、琼海市、定安县、澄迈县和文昌市，作物产品输出量较高的地区有琼海市、澄迈县、儋州市、乐东县和昌江县。这些市县主要分布在海南岛东西部沿海区域，发展较中部地区快。如定安、澄迈等区域加工业比较发达，农业信息化程度较高；乐东、保亭等区域为南繁育种科研基地，科研力量较强；儋州、昌江等区域属半干旱区，农业基础较好[41]。

根据海南现代农业“十三五”发展规划[41]，对海南省 2020 年农牧生产体系相关项目作出预测。农田生产子系统中，氮素输入、输出总量分别为 320.62 Gg 和 238.52 Gg，较 2016 年输入量减少 25.67 Gg，输出量增加 5.81 Gg，化肥施用量为 246.82 Gg，较 2016 年减少 12.99 Gg，作物主产品由 67.11 Gg 增至 73.63 Gg。动物生产子系统中，氮素输入、输出总量分别为 168.73 Gg 和 160.12 Gg，输入量增加 18.28 Gg，输出量增加 16.77 Gg。本地饲料投入量为 3.47 Gg，外源饲料输入量为 163.96 Gg，增加 18.11 Gg，动物主产品输出量为 22.27 Gg，较 2016 年增加 1.39 Gg。由此可知，随着海南生态建设的推进，在保证较高氮素输出量的前提下，输入量投入有所降低，一定程度上可提高资源利用率，减少养分的浪费。但外源饲料投入量仍然增加，说明海南在加强农牧生产体系结合和提高本地饲料产量方面还未引起足够的重视。

3.3 海南省未来农牧生产体系发展的建议

针对海南省农牧生产体系氮素流动利用率低下、总产出量不足、肥料损失严重、高环境排放量以及高外源饲料依赖等问题，提出以下优化途径：1)农牧生产体系由分散式家庭养殖模式到可持续集约化管理。通过规模化管理，从农牧业布局到优化选种，提高作物和动物产品产量和质量。并结合区域发展，建立农业生产与畜牧生产综合基地，便于作物副产品与动物粪尿在农牧结合体系内循环利用，提高利用效率。2)发展经济作物的同时兼顾粮食作物。大多经济作物副产品无法直接用于还田和作为动物饲料，因而加重了农牧生产体系对化肥和外源饲料的依赖，不利于经济发展与资源利用。3)改善畜禽粪尿管理。农牧结合的核心目的是通过改善畜禽粪尿管理，减少养分损失和提高其循环利用率[42]。改造完善规模化畜禽养殖场基础条件，建设固液分离、雨污分流、粪便储存及输送管网设施[41]。4)减少化肥的使用，同时提高氮肥利用效率。氮肥使用过程中，含氮量仅为 46.7%，大量使用造成较严重的资源浪费，所以要以减施化肥为目标，深化测土配方施肥、水肥一体化、增施有机肥等综合措施，建立海南省肥料指标体系；根据气候、地貌、土壤类型、作物品种、耕作制度等差异，合理划分施肥类型区，推广测土施肥技术，建设测土配方施肥体系[41]。研究表明，不同的施肥深度氮素淋溶损失量不同，越深损失量越低[32]，因而，根据作物种植深度进行化肥施用不仅可以减少使用量亦可以提高利用效率，同时减少氮肥氨挥发。5)应加强管理并出台相关政策。需从源头减少氮素的投入，同时加强投入的供给侧管理，产品输出的资源化利用，寻求更高效的技术手段。政策上则要求把握全局，点面结合。加大针对农业面源污染防治的财政投入，使之与排放占比相匹配[42]。

4 结论

本文采用 NUFER 模型详细分析了近 30 年海南岛农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征，对系统内氮素利用效率和环境损失情况进行了定量化研究。研究表明 30 年来海南岛农牧生产体系氮素的输入依赖高额的氮肥和外源饲料，本地饲料产量低，利用少。在畜禽管理上，当前动物粪尿处理方式简单，多为无序排放，造成资源浪费的同时增加了环境压力。由于区域原因，海南岛氮素经氨挥发，地表径流、侵蚀和淋溶比例也高于我国其他地区。从空间上看，受地理位置、政策支持和区域发展的影响，沿海地区和南繁地区，系统氮素流动和循环量较高，呈现四周高，中间低的特点。

总体来说，海南农牧生产体系发展较为落后，区域分布不合理，体系分离较严重。由此引发了高环境排放量、高氮素施用量、高外源饲料依赖量、低氮素利用效率等一系列问题，这些弊端都将制约海南国际旅游岛和自由贸易区(港)建设步伐中对生

态文明建设的高标准要求。因此, 未来海南农牧系统养分管理应包括: 1)进一步明确农牧生产体系氮素流向和跟踪其引发的环境效应; 2)加大有机肥的投入量及肥料的合理调控; 3)加强畜禽粪尿养分循环利用和绿色高效的区域农牧生产体系布局。

参考文献 References

[1] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[2] ZHOU J Y, GU B J, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25088

[3] GIORDANO J C P, BRUSH M J, ANDERSON I C. Quantifying annual nitrogen loads to Virginia's Coastal Lagoons: Sources and water quality response[J]. Estuaries and Coasts, 2011, 34(2): 297–309

[4] WIEDEMANN S, MCGAHAN E, MURPHY C, et al. Resource use and environmental impacts from beef production in eastern Australia investigated using life cycle assessment[J]. Animal Production Science, 2016, 56(5): 882–894

[5] SENTHILKUMAR K, NESME T, MOLLIER A, et al. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: The importance of agricultural production systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 92(2): 145–159

[6] SMITH K A, FROST J P. Nitrogen excretion by farm livestock with respect to land spreading requirements and controlling nitrogen losses to ground and surface waters. Part 1: Cattle and sheep[J]. Bioresource Technology, 2000, 71(2): 173–181

[7] 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

[8] 佟丙辛, 张华芳, 高肖贤, 等. 华北平原典型区域农牧系统氮素流动及其环境效应——以河北省为例[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 442–455
TONG B X, ZHANG H F, GAO X X, et al. Nitrogen flow and environmental effects of crop-livestock system in typical area of North China Plain-a case study in Hebei Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 442–455

[9] 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
ZHANG J J, GUO C X, ZHANG Y G, et al. Spatial characteristics of phosphorus flow in crop-livestock production systems in Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 553–562

[10] 海南省统计局. 海南统计年鉴(1988—2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1988–2017
Hainan Bureau of Statistics. Hainan Statistical Yearbook (1988–2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 1988–2017

[11] 魏莎, 柏兆海, 吴迪梅, 等. 北京"土壤-饲料-奶牛"系统氮磷流动及环境损失时空特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 316–327
WEI S, BAI Z H, WU D M, et al. Temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus cycling and environmental losses in the "soil-feed-dairy" production system in Beijing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 316−327

[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] 李勇, 靳伟, 安琼, 等. 我国东南丘陵区化肥和农药污染状况分析[J]. 农村生态环境, 1998, 14(1): 24–30
LI Y, JIN W, AN Q, et al. Analyses on the status quo of chemical fertilizer and pesticide non-point pollution in hilly red soil region of Southeast China[J]. Rural Eco-Environment, 1998, 14(1): 24–30

[14] 刘晓利. 我国"农田-畜牧-营养-环境"体系氮素养分循环与平衡[D]. 保定: 河北农业大学, 2005
LIU X L. Nitrogen cycling and balance in "agriculture-livestock-nutrition-environment" system of China[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2005

[15] 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
LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207–4229

[16] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 我国农田养分再循环——潜力和问题[J]. 中国农业科学, 1993, 26(5): 1–6
LU R K, SHI Z Y, QIAN C L. Potential and problems of farmland nutrient recycling in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1993, 26(5): 1–6

[17] 郝正里. 畜禽营养与标准化饲养[M]. 北京: 金盾出版社, 2004: 808–814
HAO Z L. Nutrition and Standardized Feeding of Livestock and Poultry[M]. Beijing: Golden Shield Press, 2004: 808–814

[18] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614–617
WANG F H, MA W Q, DOU Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. China Environmental Science, 2006, 26(5): 614–617

[19] 刘永丰. 海南省畜禽养殖环境预警研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013
LIU Y F. The research of environmental alarm of livestock and poultry in Hainan Province[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013

[20] 马林. 中国食物链氮素流动规律及调控策略[D]. 保定: 河北农业大学, 2010
MA L. Mechanism and regulatory strategies of nitrogen flow in food chain of China[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010

[21] 张少若, 梁继兴, 余让水, 等. 我国热带作物营养诊断研究工作的进展[J]. 热带农业科学, 1996, (2): 60–70
ZHANG S R, LIANG J X, YU R S, et al. Advances in nutritional diagnosis of tropical crops in China[J]. Tropical Crop Research, 1996, (2): 60–70

[22] 范兴安. 芝麻不同生育时期植株营养吸收与土壤养分的动态变化[J]. 河南农业科学, 1998, (12): 11–12
FAN X A. Dynamic changes of nutrient uptake and soil nutrients in sesame at different growth stages[J]. Henan Agricultural Sci-

ence, 1998, (12): 11–12

[23] 张少若, 招康赛, 杜海群, 等. 槟榔营养特性与营养诊断方法的研究[J]. 热带作物学报, 1990, 11(1): 69–80
ZHANG S R, ZHAO K S, DU H Q, et al. Study on nutritional characteristics and diagnosis of areca catechu[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 1990, 11(1): 69–80

[24] 康尔歌. 椰肉椰水成分及其加工的研究(附年产 3000 吨椰汁工厂设计)[D]. 天津: 天津科技大学, 2003
KANG E G. Study on constituents and processing of coconut meat and water (and design of plant with annual output of 3000 Ton)[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2003

[25] 穆兴民, 樊小林. 土壤氮素矿化的生态模型研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 114–118
MU X M, FAN X L. A review on ecological models of soil N mineralization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 114–118

[26] 陆行正, 何向东. 橡胶树的营养诊断指导施肥[J]. 热带作物学报, 1982, 3(1): 27–39
LU X Z, HE X D. Fertilizer application based on nutrient diagnosis of rubber trees[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 1982, 3(1): 27–39

[27] 马立锋. 茶树氮素吸收利用与氮肥施用技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015
MA L F. Research on tea plant to nitrogen uptake-utilization and fertilization technique in tea garden[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015

[28] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211–217
BI Y Y, GAO C Y, WANG Y J, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 211–217

[29] 秦俊豪, 贺鸿志, 黎华寿, 等. 芝麻、花生和田菁秸秆还田的化感效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1941–1947
QIN J H, HE H Z, LI H S, et al. Allelopathic effect of returning plant residue to field from sesame, peanut and sesbania[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1941–1947

[30] 漆智平. 热带土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 46–48
QI Z P. Tropical Soil Science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007: 46–48

[31] 艾绍英, 姚建武, 刘国坚, 等. 热带—亚热带多雨湿润区旱地土壤尿素氨挥发研究[J]. 中国农学通报, 1999, 15(6): 13–17
AI S Y, YAO J W, LIU G J, et al. Study on ammonia loss by volatilization for urea fertilized to dry land in the tropics and subtropics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1999, 15(6): 13–17

[32] 姚建武, 艾绍英, 周修冲, 等. 热带亚热带多雨湿润区旱地土壤氮肥淋溶损失模拟研究[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4): 314–315
YAO J W, AI S Y, ZHOU X C, et al. Study on nitrogen leaching loss from the soils in dry land in the humid region of tropical and subtropical zones[J]. Soil and Environmental Sciences, 1999, 8(4): 314–315

[33] 肖寒, 欧阳志云, 王效科, 等. GIS 支持下的海南岛土壤侵蚀空间分布特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 75–80
XIAO H, OUYANG Z Y, WANG X K, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion in Hainan Island by GIS[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(4): 75–80

[34] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. Nature, 2002, 418(6898): 671–677

[35] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 等. 长春地区食物链氮素养分流动趋势与特征分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 255–265
ZHANG X M, WANG Y, YAN L, et al. Trend and characteristics of nitrogen flow in food chain in Changchun area[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 255–265

[36] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6
ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1–6

[37] 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 II. 农田养分收入参数[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 151–154
LU R K, LIU H X, WEN D Z, et al. Study on nutrient cycling and balance of farmland ecosystem in typical areas of China. Farmland nutrient income parameter[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 151–154

[38] 杨林章, 孙波. 中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008
YANG L Z, SUN B. Nutrient Cycling and Balance of Farmland Ecosystem and Its Management in China[M]. Beijing: Science Press, 2008

[39] 阮云泽. 热带地区旱地砖红壤上氮肥氮去向及两种叶用蔬菜对氮吸收利用的研究[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2004
RUAN Y Z. Study on the behaviors and absorbing utilization of nitrogen fertilizer in latosol of dryland in tropical zone[D]. Haikou: South China University of Tropical Agriculture, 2004

[40] 陈轩敬, 宫雅慧, 谢军. 近 20 年重庆市农牧生产体系氮素流动特征及驱动力分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 468–480
CHEN X J, GONG Y H, XIE J. Nitrogen flow of crop-livestock production system and its driving forces in Chongqing over the past 20 years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 468–480

[41] 海南省农业厅. 海南省现代农业“十三五”发展规划[R].土流网[EB/OL]. [2016-09-22]. https://www.tuliu.com/read-43543.html
Hainan Provincial Department of Agriculture. The 13th Five-Year Plan for the development of modern agriculture in Hainan Province[R]. https://www.tuliu. com/read-43543.html

[42] 马林, 马文奇, 张福锁. 农牧系统养分管理[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 401–405
MA L, MA W Q, ZHANG F S. Nutrient management in soil-crop-animal production system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 401–405