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

海南岛农业绿色发展指标时空变化特征

宋晨阳，张建杰，刘玲，马文奇，马林，丁尚，赵洪伟

引用本文:
宋晨阳, 张建杰, 刘玲, 等. 海南岛农业绿色发展指标时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1156–1167.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200011

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征

Spatiotemporal characteristics of green development indicators in the whole dairy industry chain in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1181–1199 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200471

中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征

Spatiotemporal variation of nitrogen indicators related to agricultural green development in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1141–1155 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200159

中国农业绿色发展指标体系的构建与例证

Construction of a green development index system for agriculture in China and examples

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1113–1126 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200069

河北省县域农业绿色发展指标时空变化特征

Temporal and spatial characteristics of agricultural green development indica–tors in counties of Hebei Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1168–1180 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200483

海南农牧生产体系氮素养分流动时空变化特征

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

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 246–256 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180629

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 8 月 第 28 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2020, 28(8): 1156−1167

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200011

宋晨阳, 张建杰, 刘玲, 马文奇, 马林, 丁尚, 赵洪伟. 海南岛农业绿色发展指标时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1156−1167

SONG C Y, ZHANG J J, LIU L, MA W Q, MA L, DING S, ZHAO H W. Spatial and temporal characteristics of agricultural green development indicators in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1156−1167

海南岛农业绿色发展指标时空变化特征*

宋晨阳[1,2], 张建杰[3], 刘 玲[4], 马文奇[3], 马 林[4], 丁 尚[2], 赵洪伟[2**]

(1. 海南大学林学院 海口 570228; 2. 海南大学生态与环境学院/海南省农林环境过程与生态调控重点实验室 海口 570228; 3. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071001; 4. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要: 海南自建省以来农业生产规模、结构及生产方式均发生了很大改变, 影响了其农业绿色发展程度。本文借助中国农业绿色发展指标体系, 利用 NUFER 模型(NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use), 选取并定量计算 1988—2017 年海南岛 20 项农业绿色发展指标, 研究其时空变化特征, 探究制约海南岛农业绿色发展的影响因素。研究表明: 30 年间海南省农业绿色发展水平总体呈下降趋势, 较低级别(Ⅲ、Ⅳ级)指标数量由 12 个增加至 15 个, 较高级别(Ⅰ、Ⅱ级)指标数量由 8 个减少至 5 个。随着蔬菜、水果等经济作物种植比例增加, 畜禽养殖规模扩大与集约化程度提高, 海南农业产值与社会发展水平不断升高, 农业产值和农业机械化投入分别从 0.62×10^4 ¥·hm^{-2} 和 3 kW·hm^{-2} 增加至 16.1×10^4 ¥·hm^{-2} 和 13 kW·hm^{-2}。30 年来农业资源(氮素、磷素、农药和农膜)过量投入, 其中农药和农膜的使用强度增幅最大, 分别从 8.0 kg·hm^{-2} 和 0 kg·hm^{-2} 增加至 41.9 kg·hm^{-2} 和 34.7 kg·hm^{-2}; 由于生产力水平较低, 导致养分(农田氮素盈余量、农田氮素径流量、农业源氨挥发等)环境排放量大幅增加, 农业源氨挥发和单位播种面积农田氮素盈余增幅最大, 分别从 61.0 kg·hm^{-2} 和 152.1 kg·hm^{-2} 增加至 131.4 kg·hm^{-2} 和 297.9 kg·hm^{-2}。农业资源投入过量、农牧分离导致的环境污染是制约海南岛农业绿色发展的主要原因。在空间上, 由于中部为山地林区, 是国家重点生态功能保护区, 开发力度较小, 因此沿海平原的资源投入增长更快、养分环境损失量更多, 经济增长、社会发展和农业生产 3 类指标提升更为迅速。今后海南岛应合理优化沿海地区种植结构, 提高生产管理水平, 加强农牧结合减少资源损失, 实现海南岛农业绿色发展。

关键词: 农业绿色发展; NUFER 模型; 种植业结构变化; 农牧系统; 热带农业

中图分类号: S19; S158.5 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Spatial and temporal characteristics of agricultural green development indicators in Hainan Island*

SONG Chenyang[1,2], ZHANG Jianjie[3], LIU Ling[4], MA Wenqi[3], MA Lin[4], DING Shang[2], ZHAO Hongwei[2**]

(1. College of Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Ecology and Environment, Hainan University / Key Laboratory of A&F Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province, Haikou 570228, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 4. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

* 海南省重大科技项目(ZDKJ2017002)资助

** 通信作者: 赵洪伟, 研究方向为污染生态学。E-mail: hwzhao@hainu.edu.cn
宋晨阳, 研究方向为区域养分资源管理。E-mail: Cysong1995@163.com

收稿日期: 2020-01-06 接受日期: 2020-05-15

* This study was supported by the Major Science and Technology Program of Hainan Province (ZDKJ2017002).

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

Received Jan. 6, 2020; accepted May 15, 2020

Abstract: Since the establishment of Hainan Province, the scale, structure, and methods of agricultural production have undergone significant changes, which are critical with respect to the progress of agricultural green development (AGD). In this study we adopted China's AGD indicator system with 20 indicators, and using the NUFER (NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use) model, we quantitatively calculated the spatial and temporal changes in Hainan Island AGD indicators from 1988 to 2017. Moreover, we discussed the factors restricting AGD in Hainan Island. The results revealed that the overall level of Hainan Island's AGD had shown a declining trend over the past 30 years. The numbers of indicators at lower levels (Ⅲ and Ⅳ) had increased from 12 to 15, whereas those at higher levels (Ⅰ and Ⅱ) had decreased from 8 to 5. With increase in the proportion of economic crops such as vegetables and fruits, the scale of livestock and poultry farming and the degree of intensification, Hainan's agricultural output value and social development level had continued to increase. Furthermore, the agricultural output value per unit cultivated land area and level of agricultural mechanization had increased from 6 200 ¥·hm^{-2} and 3 kW·hm^{-2} to 161 000 ¥·hm^{-2} and 13 kW·hm^{-2}, respectively. Over the past 30 years, there had been an increasingly excessive input of agricultural resources (nitrogen, phosphorus, pesticides, and agricultural film), among which, the intensities of pesticide and agricultural film usage had shown the highest increases, rising from 8.0 kg·hm^{-2} and 0 kg·hm^{-2} to 41.9 kg·hm^{-2} and 34.7 kg·hm^{-2}, respectively. As a consequence of the low productivity levels, the environmental emissions of applied nutrients (e.g., nitrogen surplus in farmland, nitrogen runoff in farmland, and NH_3 volatilization from agricultural system) had increased significantly, with NH_3 volatilization and nitrogen surplus per unit sown area showing the largest increases, rising from 61.0 kg·hm^{-2} and 152.1 kg·hm^{-2} to 131.4 kg·hm^{-2} and 297.9 kg·hm^{-2}, respectively. Environmental pollution caused by an excessive input of agricultural resources and the separation of agriculture and animal husbandry had been the main factors contributing to the restriction of AGD in Hainan Island. Given that the central part of the island is covered in montane forest and has been designated as a national key ecological function protection area, the scale of development in this region had been relatively limited. Consequently, the coastal plains had experience more rapid growth in resource input. Although this had a detrimental impact on the environment, the economy growth, social development, and agricultural productivity indicators for these areas had improved to a greater extent than those for mountain forest area. In the future, Hainan Island should rationally optimize the planting structure in coastal areas, improve the level of production management, and strengthen the combination of agriculture and animal husbandry to reduce resource losses and achieve the island's requisite AGD goals.

Keywords: Agricultural green development; NUFER model; Change in planting structure; Agriculture and animal husbandry system; Tropical agriculture

中国农业的快速发展取得了巨大成就，满足了人们日益增长的粮食需求[1]。但农业资源消耗过高，带来了土壤酸化[2]、水体富营养化[3]、地下水硝酸盐含量超标[4]和生物多样性退化[5]等一系列环境问题。我国农业发展迫切需要提高生产效率、减少环境浪费，协调其与环境保护之间的关系[6]。为了保证粮食安全、保护生态环境，我国政府提出了农业绿色发展道路[7]。不同学者对农业绿色发展做出了不同的解读，但对其科学内涵的解读尚未达成共识。李谷成[8]将农业绿色发展定义为农业投入与产品生产、加工、流通及其消费全链条的绿色化。金书秦等[9]认为农业绿色发展有去污、提质、增效 3 个阶段，是不以环境污染为代价，通过绿色投入(包括资源、科技和经济的投入)、绿色消费带动经济增长，形成具有内在驱动力的良性循环。Shen 等[10]提出农业绿色发展是协调“绿色”与“发展”的关系，把当前资源消耗高、环境成本高的生产方式转变为高生产效率、低环境排放的绿色农业总体目标。

农业绿色发展是未来农业的发展方向，实现绿色发展，首先需要评价当前农业发展水平，剖析制约农业绿色发展的关键问题。联合国 2015 年可持续发展议程通过了 17 项可持续发展指标，其中 8 项与农业密切相关[11]。欧盟提出的农业环境指数应用也较为广泛，该体系可权衡农业、经济、政策与环境等因素之间的相互关系[12]。魏琦等[13]以资源节约、环境友好、生态保育和质量高效为侧重点，构建我国农业绿色发展指数，指出完善数据监测将利于未来农业评价体系的建立，环境污染和质量高效是我国农业绿色发展的突出短板。袁久和[14]从经济、资源环境、农村社会发展和政策支持等方面，评价了我国农业发展状况，并指出加强监测，完善政策支持是实现农业绿色发展的有效举措。杨世琦[15]基于欧氏距离法构建了农业可持续发展模型， 分析影响宁夏吴忠市可持续发展的主要原因是农业资源利用不合理、保护性农作技术推广不够、土壤养分含量较低且农村人均收入偏低等。Liu 等[16]利用层次分析法构建评估模型，评价了我国 1978—2017 年

的农业绿色生产水平，指出我国农业绿色生产水平增长趋势明显，但西部内陆地区与东部地区存在较大差距，并提出加强数据监测，构建更合理完善的农业绿色生产指标体系将有助于我国农业现代化建设。

这些研究通过不同方法、从不同尺度分析了农业发展状况并提出了相应的科学建议，但更多的是对不同地区或不同环节发展水平的评价，缺乏从“资源-生产-食品加工-消费”整个农业生产和食物系统层面的综合考量，缺少对指标间关联的探究及其动态响应的定量分析。我国不同省份农业发展特征不同，海南岛是我国唯一的“热带特色农业基地”，2018 年国家确立了海南建设“全面深化改革开放试验区、国家生态文明试验区、国家重大战略服务保障区、国际旅游消费中心[17]”的战略定位，这决定了海南岛未来不但要保证热带特色食品供应，同时也要发展经济和保护生态环境。本文利用张建杰等[18]构建的农业绿色发展指标体系，研究海南岛农业绿色发展时空变化特征，找出制约海南岛农业绿色发展的影响因素及限制因子，以海南岛为例探讨大型热带岛屿农业绿色发展的实现途径。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

海南 1988 年建省，共有 4 个地级市和 15 个县区，全省面积 3.54 万 km^2。本研究以海南岛为研究对象，岛屿面积 3.39 万 km^2，地势中间高四周低，以五指山、鹦哥岭为核心向外由山地、丘陵、台地、平原构成环状圈层地貌；属于热带海洋性季风气候，年均气温 22~26 ℃，年光照达 1 750~2 650 h，年均降水量 1 639 mm。2017 年耕地面积 43.9 万 hm^2，典型土壤为赤红壤，复种指数 200%左右。截至 2017 年总人口 910.4 万，地区生产总值 4 462.5 亿元，2017 年农林牧渔产值占地区生产总值比为 33.4%[19]。

海南岛不同区域农业功能划分不同(图 1)：山区林业经济区发展橡胶(*Hevea brasiliensis*)、特色水果和南药等经济作物及特色养殖，丘陵经作养殖区发展经济作物、畜禽养殖综合农业，平原种养农业区发展高效种养产业，另外中部山区热带雨林生态功能区是国家重点生态功能区，开发受限。海南省是正在创建的国家农业绿色发展先行区(整省创建)，并于三亚市、乐东县、陵水县建立了集科研、生产、销售、科技交流、成果转化为一体的“南繁育种基地”。1988—2017 年海南岛总播种面积增加了 0.6 倍，水稻(*Oryza sativa*)播种面积减少了 22%，热带水果、蔬菜和特色经济作物[橡胶、椰子(*Cocos nucifera*)、槟榔(*Areca catechu*)、胡椒(*Piper nigrum*)等]的播种面积分别增加了 2.7 倍、4.8 倍和 2.0 倍，截至 2017 年海南岛水果、蔬菜经济作物总产量增加了 8.3 倍，达 756 万 t；畜禽养殖总数增加了 5.8 倍，2017 年达 325 万 LU(折 500 kg 奶牛)[19]。

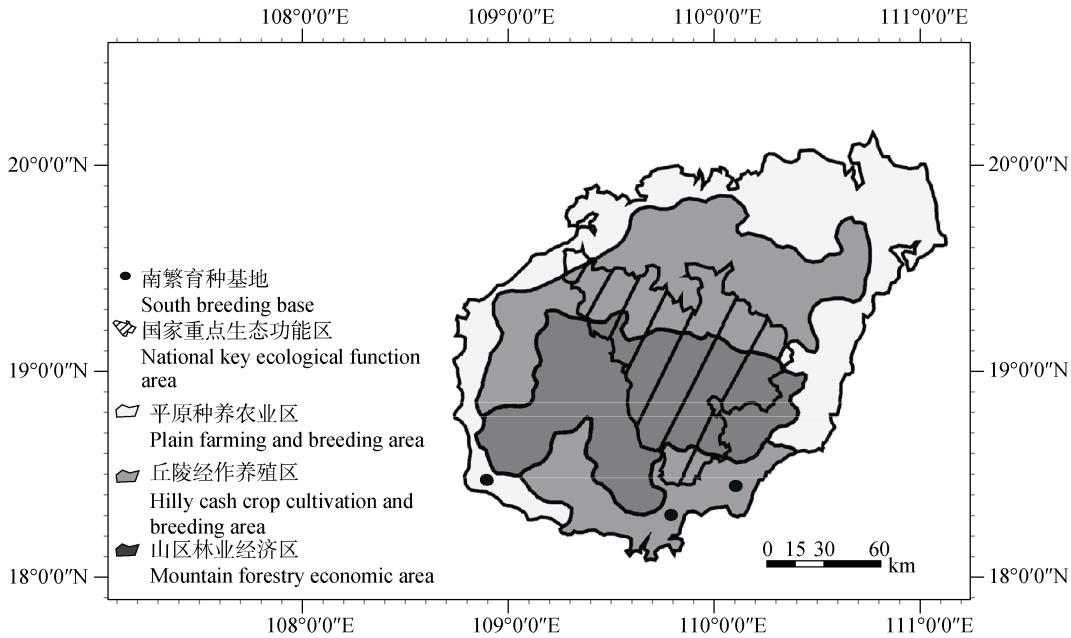

图 1 海南岛功能分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of functional division in Hainan Island

1.2 数据来源

研究所需数据主要包括统计数据、文献资料及模型原有参数[20]。统计数据是模型分析的基础, 而文献资料主要为校正模型参数提供依据。

1)统计数据: 海南岛历年农业生产总值、人口数量、农作物播种面积及产量、化肥、农药、农膜投入量、畜禽养殖数量及产量、城市与农村食物人均消费水平来自于海南统计年鉴[19]; 由于统计数据中无年末蛋禽存栏量, 故通过禽蛋产量与 FAO 中国历年蛋禽平均产蛋量反推蛋禽养殖数量。

2)文献数据: 1988—2017 年海南岛种植业不同作物养分含量、灌溉水氮素量[21]及氨挥发系数[22]来自文献, 秸秆、畜禽粪污回收利用情况来自政府报告[23-24], 生物固氮、氮沉降、径流排放系数、动物粪便氨挥发、N_2O 挥发和反硝化排放系数参考 NUFER 模型参数[20]。

1.3 研究方法

中国农业绿色发展指标体系是张建杰等[18]利用 NUFER 模型[20]构建的可定量计算中国及其各省农业发展水平的指标体系。该指标体系从农业生产、资源与环境 3 方面出发, 研究农产品“生产-加工-消费”全链条, 经济增长、社会发展程度、资源投入情况、农业生产水平以及生态环境排放损失量 5 类指标的优劣程度。每个类型分为直接指标(direct)、间接指标(indirect)和自选指标(optional)3 类, 每项指标均分为Ⅰ~Ⅳ 4 个等级, 从Ⅰ到Ⅳ依次表示农业绿色发展程度由好到差。本研究依据系统性、完整性、代表性和重点性原则(即具体地从中国农业绿色发展指标体系中选出可有效解释海南岛农业特征、突出其生产特色的指标), 选取 20 项指标定量研究海南岛农业绿色发展的时空变化特征。

经济增长类指标(economy growth): 包括单位面积农业产值、人均 GDP、农业产值占 GDP 比例 3 个指标, 反映海南岛农业经济效益、农业对经济的贡献以及农业发展对人均生活水平的影响。

社会发展类指标(social development): 包括人均耕地占有水平、农田灌溉水平、农业机械化水平 3 个指标, 表现海南岛农业生产条件。

资源投入类指标(resources input): 包括氮素、磷素以及农药、农膜使用强度 4 个指标, 衡量海南岛当前农业生产要素投入水平。

生态环境类指标(ecological environment): 包括农田氮素盈余及径流、农业系统氨挥发、农业源温室气体(GHG)排放强度、畜禽承载量 5 个指标, 反映海南岛种养生产对水、土、气的环境影响。

农业生产类指标(agricultural production): 包括农田系统氮素利用效率、畜牧系统氮素利用效率、蔬菜单产水平、水果单产水平以及单位动物蛋白产量 5 个指标, 反映海南岛农业生产效率及主要作物生产水平。

各指标计算方法与分级标准与中国农业绿色发展指标体系[18]相同。

使用 EXCEL 2010 绘制 1988—2017 年海南岛农业绿色发展所有指标结果的时间变化图。使用 ArcGIS 10.2.2 绘制 1988 年、2017 年重要指标结果的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 农业绿色发展指标变化情况

海南岛 1988 年和 2017 年农业绿色发展指标变化情况如表 1 所示。30 年间绿色发展水平整体呈下降趋势, 较低级别(Ⅲ、Ⅳ级)指标数量由 12 个增加至 15 个, 较高级别(Ⅰ、Ⅱ级)指标数量由 8 个减少至 5 个。经济增长指标中单位面积农业产值由Ⅳ级上升至Ⅱ级水平, 农业产值占 GDP 比例从Ⅰ级水平降低至Ⅱ级水平, 人均 GDP 由Ⅳ级水平变为Ⅱ级水平。社会发展指标中人均耕地占有水平与农田灌溉水平指标分别处于Ⅳ、Ⅱ级别不变, 仅农业机械化水平由Ⅲ级提高至Ⅰ级水平。资源投入所有指标均降低至Ⅳ级水平。生态环境指标中, 农田氮素盈余及畜禽承载量指标由Ⅱ级下降至Ⅳ级水平, 农田氮素径流指标由Ⅰ级水平降低至Ⅲ级水平, 农业源 GHG 排放强度指标 30 年间均处于Ⅳ级水平, 农业系统氨挥发指标由Ⅲ级降低至Ⅳ级水平。农业生产指标中水果单产水平、蔬菜单产水平和单位动物蛋白产量自Ⅳ级提高至Ⅲ级水平, 氮素利用效率始终处于Ⅳ级水平。

2.2 经济增长指标时空变化特征

1988—2017 年海南岛经济快速增长, 农业对经济产值的贡献显著降低(图 2a), 单位耕地面积农业产值由 0.62×10^4 ¥·hm^{-2} 增加到 16.1×10^4 ¥·hm^{-2}, 提高了 25.0 倍; 农业产值占 GDP 比重由 74.8%降低至 33.4%, 人均 GDP 从 0.12×10^4 ¥·cap.$^{-1}$ 增长至 4.8×10^4 ¥·cap.$^{-1}$。单位耕地面积农业产值普遍性与代表性最强, 因此绘制其 1988 年、2017 年的空间分布图(图 2b)。1988 年海南岛单位耕地面积农业产值较低, 所有地区均处Ⅲ、Ⅳ级水平, 其中三亚市最高(1.9×10^4 ¥·hm^{-2}), 东方市最低(0.8×10^4 ¥·hm^{-2}); 由于南部沿

表 1 1988 年和 2017 年海南岛农业绿色发展指标变化

Table 1 Changes of agricultural green development indicators of Hainan Island from 1988 to 2017

指标类别 Category	指标 Indicator	1988 值 Value	1988 等级 Grade	2017 值 Value	2017 等级 Grade
经济增长 Economy growth	单位面积农业产值 Agricultural output value per unit cultivated land ($\times10^4$ ¥·hm^{-2})	0.6	Ⅳ	16.1	Ⅱ
	人均 GDP Per capita GDP ($\times10^4$ ¥·cap.$^{-1}$)	0.1	Ⅳ	4.8	Ⅱ
	农业产值占 GDP 比例 Percentage of agricultural output value in GDP (%)	74.8	Ⅰ	33.4	Ⅱ
社会发展 Social development	人均耕地占有水平 Per capita cultivated land (hm^2·cap.$^{-1}$)	0.08	Ⅳ	0.11	Ⅳ
	农田灌溉水平 Irrigation level of farmland (%)	31.1	Ⅱ	44.1	Ⅱ
	农业机械化水平 Agricultural mechanization level ($\times10^4$ kW·hm^{-2}·a^{-1})	3.0	Ⅲ	13.0	Ⅰ
资源投入 Resources inputs	氮素使用强度 N use intensity (kg·hm^{-2})	217.0	Ⅱ	411.7	Ⅳ
	磷素使用强度 P use intensity (kg·hm^{-2})	13.9	Ⅰ	66.2	Ⅳ
	农药使用强度 Pesticides use intensity (kg·hm^{-2})	8.0	Ⅳ	41.9	Ⅳ
	农膜使用强度 Agricultural film use intensity (kg·hm^{-2})	0	Ⅰ	34.7	Ⅳ
生态环境 Ecological environment	农田氮素盈余 N surplus in farmland (kg·hm^{-2})	152.1	Ⅱ	297.9	Ⅳ
	农田氮素径流 N runoff in farmland (kg·hm^{-2})	6.5	Ⅰ	12.4	Ⅲ
	农业系统氨挥发 NH_3 volatilization in agricultural system (kg·hm^{-2})	61.0	Ⅲ	131.4	Ⅳ
	农业源温室气体排放强度 Greenhouse gases emission intensity per unit cultivated land (kg·hm^{-2})	5 327.3	Ⅳ	5 061.3	Ⅳ
	畜禽承载量 Livestock capacity per unit cultivated land (LU·hm^{-2})	3.4	Ⅱ	7.4	Ⅳ
农业生产 Agricultural production	农田系统氮素利用效率 N use efficiency in crop production (%)	15.9	Ⅳ	20.0	Ⅳ
	畜牧系统氮素利用效率 N use efficiency in animal production (%)	4.0	Ⅳ	8.3	Ⅳ
	单位动物蛋白产量 Protein production per livestock unit (kg·LU^{-1})	11.0	Ⅳ	20.6	Ⅲ
	蔬菜单产水平 Vegetable yield (t·hm^{-2})	10.0	Ⅳ	22.9	Ⅲ
	水果单产水平 Fruit yield (t·hm^{-2})	9.7	Ⅳ	20.5	Ⅲ

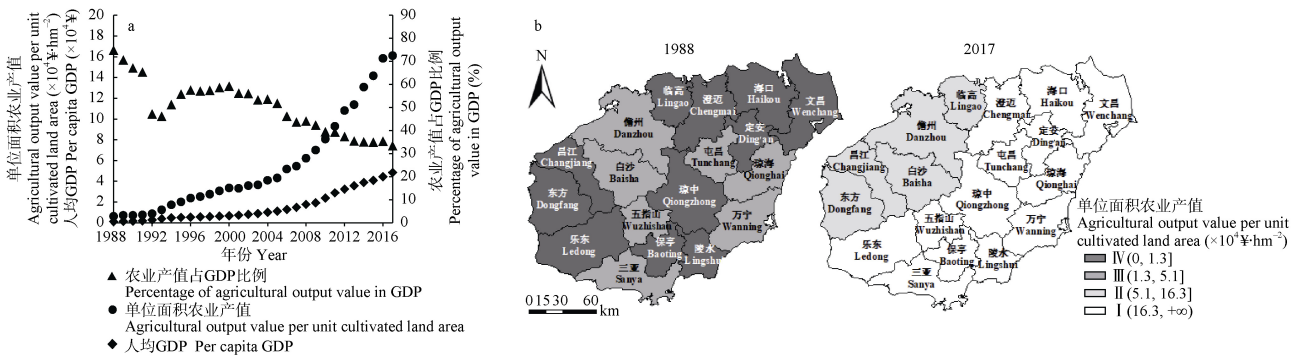

图 2 1988—2017 年海南岛经济增长指标时空变化特征(a: 经济增长指标时间变化趋势; b: 1988 年和 2017 年单位面积农业产值空间差异)

Fig. 2 Spatial and temporal characteristics of economy growth indicators in Hainan Island in 1988–2017 (a: temporal characteristics of economy growth indicators; b: spatial characteristics of agricultural output value per unit cultivated land area in 1988 and 2017)

海丘陵经作养殖区和部分南部平原种养农业区经济作物产量较高，这些地区单位面积农业经济产值显著高于其他地区。2017 年三亚、琼海最高，分别为 44.4×10^4 ¥·hm^{-2} 和 32.3×10^4 ¥·hm^{-2}，临高县最低，为 7.5×10^4 ¥·hm^{-2}。

2.3 社会发展指标时空变化特征

海南岛社会发展指标 1988—2017 年时间变化结果如图 3a 所示，所有指标均呈上升趋势。农田灌溉水平从 31%提高到 44%；人均耕地占有水平从 0.08 hm^2·cap.$^{-1}$ 提高到 0.11 hm^2· cap.$^{-1}$，增加 38%；农业机械化水平从 3 kW·hm^{-2} 增长至 13 kW·hm^{-2}，增长了 3.3 倍。我国普遍耕地不足，海南岛农业机械化水平 30 年间提升较高，但西北地区有热带沙漠气候的倾向，因水利灌溉网络覆盖不全、沟渠堵塞等原因对农作影响较大，因此本文关注海南岛农田灌溉水平的空间变化特征(图 3b)，1988 年海南岛农田灌溉水平仅保亭

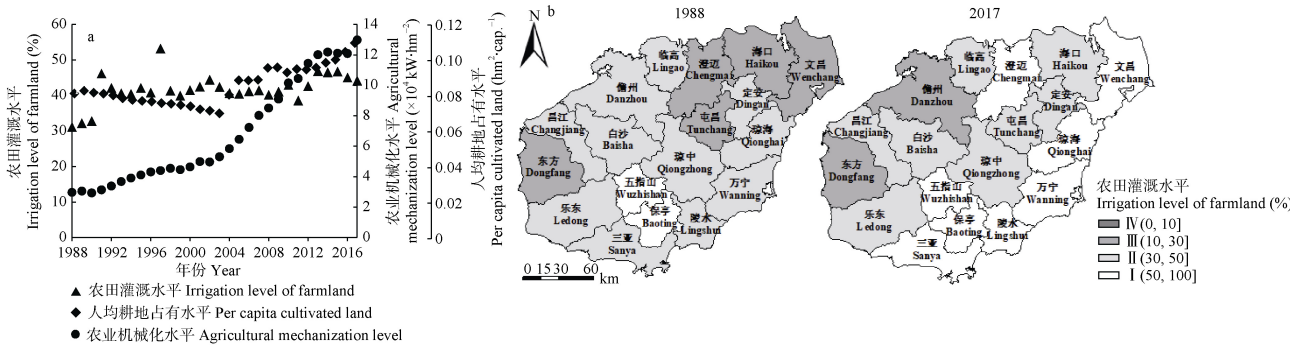

图 3　1988—2017 年海南岛社会发展指标时空变化特征(a: 社会发展指标时间变化趋势; b: 1988 年和 2017 年农业灌溉水平空间差异)

Fig. 3　Spatial and temporal characteristics of social development indicators in Hainan Island in 1988–2017 (a: temporal characteristics of social development indicators; b: spatial characteristics of irrigation level of farmland in 1988 and 2017)

县、五指山市达到Ⅰ级水平，约 1/3 地区处于Ⅲ级水平; 2017 年海南岛农田灌溉水平有所提高, 2/5 地区高于Ⅰ级水平，主要集中在东南沿海丘陵经作养殖区和平原种养农业区，与经济类指标地区分布较为一致。

2.4　资源投入指标时空变化特征

海南岛资源投入类指标绿色化水平下降明显，30 年间农业资源投入大幅增加，2017 年所有指标均下降至Ⅳ级水平(图 4a、4c)。氮素使用强度由 217.0 kg·hm^{-2} 增加至 411.7 kg·hm^{-2}，增加 90%；磷素使用强度由 13.9 kg·hm^{-2} 增加至 66.2 kg·hm^{-2}，增加了 3.8 倍；农药使用强度由 8.19 kg·hm^{-2} 增加至 41.9 kg·hm^{-2}，增加了 4.1 倍。农膜自 2002 年投入使用，使用强度由 4.1 kg·hm^{-2} 增长至 2017 年的 34.7 kg·hm^{-2}，增加了 7.5 倍。

海南岛是国家农业绿色发展先行区，而养分的过量投入与这一发展目标相悖。由图 4b、4d 可知，1988 年各地区资源投入较少，氮素使用强度除海口、澄迈外均处于Ⅰ、Ⅱ级水平(<225 kg·hm^{-2})，澄迈处于Ⅲ级水平(354.6 kg·hm^{-2})，海口市处于Ⅳ级水平(>405 kg·hm^{-2})(海口市 1988 年与 2017 年地区划分不同，1988 年农业资源使用量过高是由于土地利用不同)；1988 年各地区磷素使用强度均处于Ⅰ级水平(<35 kg·hm^{-2})。2017 年平原及丘陵地区氮素投入明显增多，大部分地区处于Ⅲ、Ⅳ级水平，其中琼海和三亚地区的氮素使用强度最高，分别为 818.9 kg·hm^{-2}、625.6 kg·hm^{-2}，仅五指山市(178.1 kg·hm^{-2})处于Ⅰ级水平。2017 年磷素使用强度三亚、琼海较高，分别为 99.6 kg·hm^{-2}、120.2 kg·hm^{-2}，而五指山市使用强度最低，为 18.9 kg·hm^{-2}。由于瓜果、经济作物等集中种植在沿海地区，而中部山区为热带雨林生态功能区，开发受限，因此沿海地区相较于中部山地养分资源投入增加更多。

2.5　生态环境指标时空变化特征

1988—2017 年海南岛生态环境类指标绿色化水平下降趋势明显，养分环境排放量及畜禽承载量均有增加(图 5a、5c)。农田氮素盈余和氮素径流分别由 152.1 kg·hm^{-2} 和 6.5 kg·hm^{-2} 增加至 297.9 kg·hm^{-2} 和 12.4 kg·hm^{-2}，增加近 1 倍。农业系统氨挥发由 61.0 kg·hm^{-2} 增加至 131.4 kg·hm^{-2}，增加了 1.2 倍。农业源 GHG 排放强度随水稻播种面积减少而降低，由 5 327.3 kg(CO_2 eq)·hm^{-2} 降低至 5 061.3 kg(CO_2 eq)·hm^{-2}，减少 5%。畜禽承载量由 3.4 LU·hm^{-2} 增加至 7.4 LU·hm^{-2}。

农田氮素盈余量可定量种植过程养分输入与输出之差，而农业系统氨挥发则可指示化肥及畜禽粪污的损失情况。图 5b 表明，养分环境排放地区分布与资源投入趋势基本相同，沿海地区较中部地区增量更高，损失也更大。1988 年农田氮素盈余除海口市较高(249.2 kg·hm^{-2})，其余地区处于Ⅰ、Ⅱ级水平，最低为保亭县、白沙县(75 kg·hm^{-2})。1988 年农业系统氨挥发同样除海口市其余地区处于Ⅰ、Ⅱ级水平(图 5d)，其中五指山市、琼中县、保亭县最低(15 kg·hm^{-2})。2017 年农田氮素盈余仅屯昌县、琼中市、五指山市处于Ⅱ级水平，其中五指山市最低(87.8 kg·hm^{-2})，沿海台地农田氮素盈余较高，琼海市最高(649.9 kg·hm^{-2})。2017 年农业系统氨挥发全岛降低至Ⅲ、Ⅳ级水平，其中琼海市(264.6 kg·hm^{-2})高于其他地区(<200.0 kg·hm^{-2})，五指山市最低，为 65.3 kg·hm^{-2}，与资源利用类指标地区分布特征较为一致。

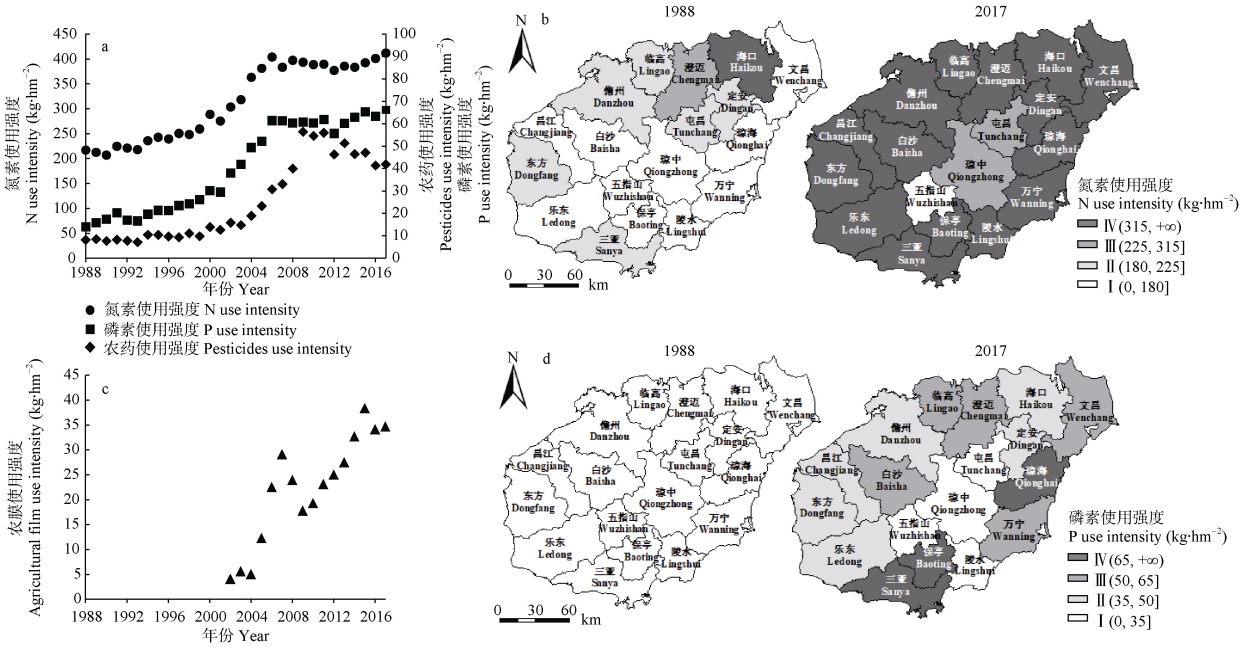

图 4 1988—2017 年海南岛资源投入指标时空变化特征(a、c: 资源利用指标时间变化趋势; b: 1988 年和 2017 年氮素使用强度空间差异; d: 1988 年和 2017 年磷素使用强度空间差异)

Fig. 4 Spatial and temporal characteristics of resource input indicators in Hainan Island in 1988–2017 (a, c: temporal characteristics of resource utilization indicators; b: spatial characteristics of nitrogen use intensity in 1988 and 2017; d: spatial characteristics of phosphorus use intensity in 1988 and 2017)

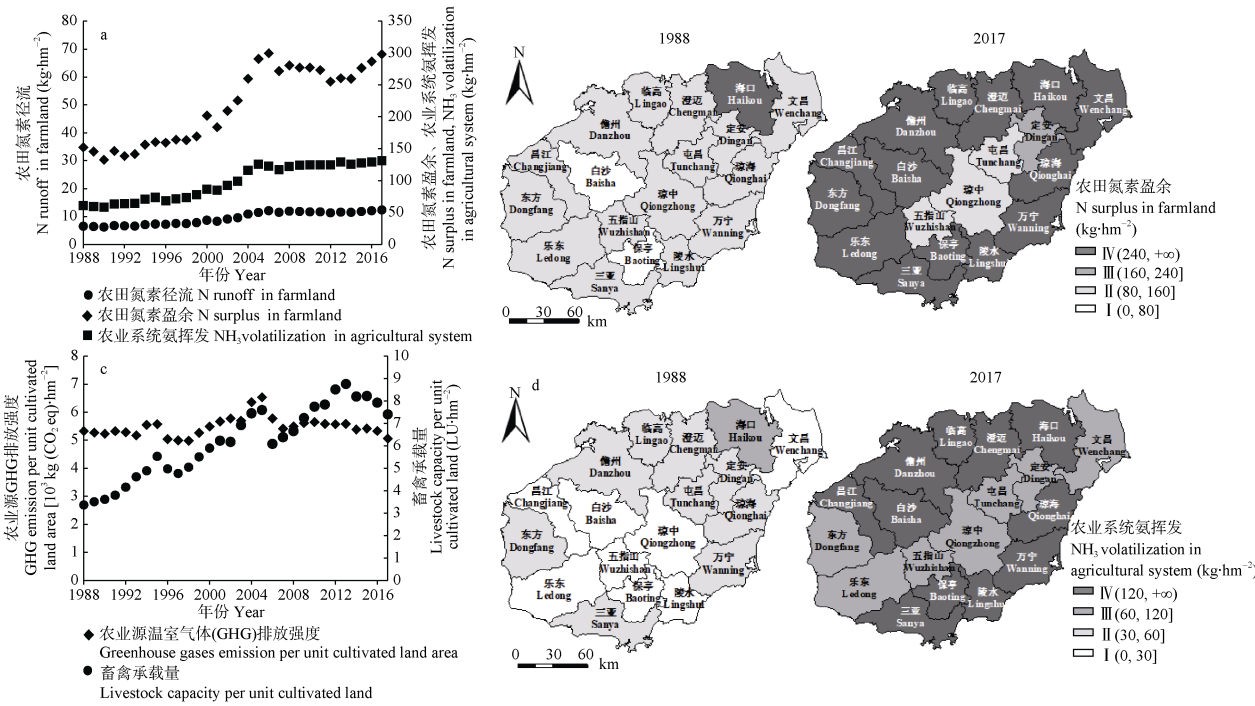

图 5 1988—2017 年海南岛生态环境指标时空变化特征(a、c: 生态环境指标时间变化趋势; b: 1988 年和 2017 年农田氮素盈余量空间差异; d: 1988 年和 2017 年农业系统氨挥发空间差异)

Fig. 5 Spatial and temporal characteristics of ecological environment indicators in Hainan Island in 1988–2017 (a, c: temporal characteristics of ecological environment indicators; b: spatial characteristics of N surplus in farmland in1988 and 2017; d: spatial characteristics of NH_3 volatilization in agricultural system in 1988 and 2017)

2.6 农业生产指标时空变化特征

海南岛农业生产指标绿色化水平整体呈上升趋势(图 6a、6c), 但仍处于较低水平。1998 年以前各指标均处于Ⅰ级水平。蔬菜单产、水果单产、单位

动物蛋白产量由 10.0 t·hm^{-2}、9.7 t·hm^{-2}、11.0 kg·LU^{-1} 提高至 2017 年的 22.9 t·hm^{-2}、20.4 t·hm^{-2}、20.6 kg·LU^{-1}，分别增加了 1.3 倍、1.1 倍和 87%。农田系统氮素利用效率、畜禽系统氮素利用效率分别由 15.9%、4.0%提高至 2017 年的 20.0%、8.3%，分别增加了 30%和 1.1 倍。

从空间分布特征来看(图 6b)，各县域种养产业单产不高。2017 年蔬菜单产除三亚市、琼海市处于Ⅲ级水平(35 t·hm^{-2})，其余地区均处于Ⅳ级，琼中县最低(9.7 t·hm^{-2})；2017 年大部分市(县)水果单产处于Ⅲ、Ⅳ级水平，仅澄迈县、临高县、昌江县高达Ⅰ级水平(>29 t·hm^{-2})，屯昌县最低(10.4 t·hm^{-2})。海南岛单位动物蛋白产量 30 年来一直处于Ⅲ、Ⅳ级水平(图 6d)，1988 年中西部较低，东部沿海地区较高，其中五指山市最低(12.4 kg·LU^{-1})，海口最高(23.1 kg·LU^{-1})；2017 年海南岛单位动物蛋白产量空间分布上呈现南低北高的特点，其中陵水县最低(15.2 kg·LU^{-1})，文昌市最高(28.8 kg·LU^{-1})。

由此可见，海南岛农业发展具有经济增长快、资源投入高、环境损失大、耕地资源紧缺、生产力水平低的特征；而在空间上，表现出南部地区经济与社会发展较好、中部山区热带雨林生态功能区资源投入及环境损失优于平原种养农业区及丘陵经作养殖区、生产效率全岛普遍不高的特征。

2.7　农业绿色发展指标间关系

海南岛农业绿色发展的经济增长、社会发展、资源投入、生态环境和农业生产 5 类指标所处等级反映其优劣程度，指标间相互影响，关系复杂。

通过对以上 5 类指标的变化结果分析可以看出，经济增长、资源投入和生态环境 3 类指标均增加幅度最大、趋势最明显，经济增长类指标最能代表本地区的农业发展状况，资源投入类指标最能反映农业生产具体投入能耗的多少，环境生产类指标能表明农业生产对环境的具体影响。从这 3 类指标中选取最具有代表性的指标，对其相关关系进行分析，得出畜禽承载量的提高明显推动了海南省农业经济产值的提升，其结果的相关性较强(R^2=0.97)；而蔬菜、水果和经济作物也是海南省农业的主要产业，农业经济产值随蔬菜、水果和经济作物播种比例的增加大幅增长(R^2=0.79)。种养规模的扩大势必影响农业资源投入及其环境损失。1988—2017 年海南岛热带水果、蔬菜和特色经济作物种植比例从 31.2%增高至 68.9%[19]，增加了 1.2 倍(图 7a)，与此同时，畜禽承载量由 3.4 LU·hm^{-2} 增加至 7.4 LU·hm^{-2}，增加

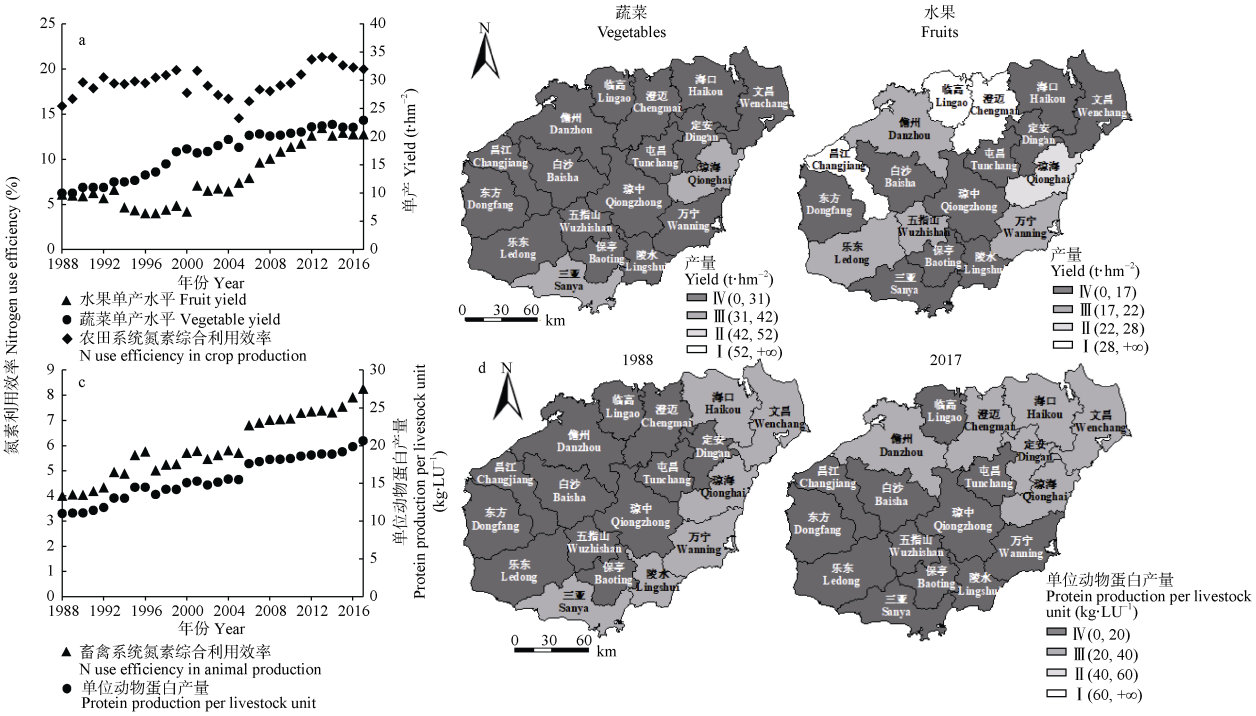

图 6　1988—2017 年海南岛农业生产指标时空变化特征(a、c：农业生产指标时间变化趋势；b：2017 年单位面积蔬菜产量和水果产量空间差异；d：1988 年和 2017 年单位动物蛋白产量空间差异)

Fig. 6　Spatial and temporal characteristics of agricultural productivity indicators in Hainan Island in 1988–2017 (a, c: temporal characteristics of agricultural productivity indicators; b: spatial characteristics of vegetables and fruits yields in 2017; d: spatial characteristics of protein production per livestock unit in 1988 and 2017)

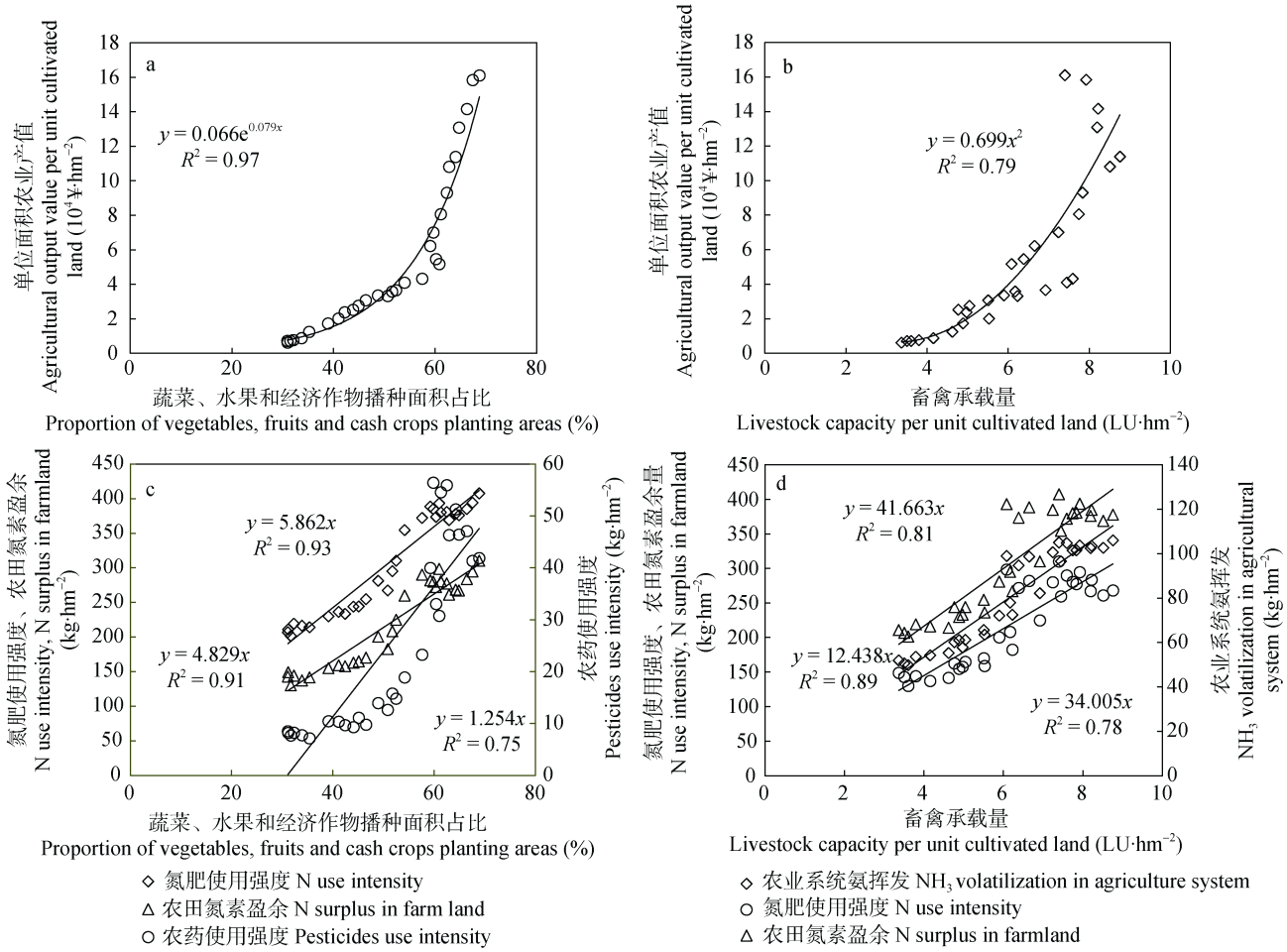

图 7 1988—2017 年海南岛农业绿色发展指标间的关系(a: 单位面积农业产值与播种面积占比之间的关系; b: 单位面积农业产值与畜禽承载量之间的关系; c: 资源投入及生态环境与播种面积占比之间的关系; d: 资源投入及生态环境与畜禽承载量之间的关系)

Fig. 7 Relationships between agricultural green development indicators of Hainan Island in 1988–2017 (a: relationship between agricultural output value per unit cultivated land area and proportion of planting areas; b: relationship between agricultural output value per unit cultivated land area and livestock capacity per unit cultivated land area; c: relationship between proportion of planting areas and resource inputs or ecological environment; d: relationship between livestock capacity per unit cultivated land area and resources inputs or ecological environment)

了 1.2 倍(图 7b)。分析得出, 蔬菜、水果和经济作物播种比例的增大导致氮肥、农药使用强度的明显提高以及农田氮素盈余的增多, 该比例的增大与氮肥施用强度和农田氮素盈余的增多关系最为显著, 其 R^2 分别达 0.93 和 0.91; 氮肥使用强度、农田氮素盈余和农业系统氨挥发随畜禽承载量的增大而提高, 其中单位农田氮素盈余及农业系统氨挥发与畜禽承载量之间关系最为显著, R^2 分别为 0.81 和 0.89(图 7d)。

3 讨论

本研究首次定量分析了海南农业绿色发展指标的时空变化特征, 分析 5 类指标之间的关系, 探究制约海南农业绿色发展的关键问题, 得出海南岛农业发展具有以下特征:

1)农业经济增长和社会发展变化趋势一致, 1988—2017 年各指标提升明显, 东南沿海提升速度更快。随着社会的发展、经济的转型, 农田灌溉设备得以配备, 农田灌溉水平随之提高。从空间上看, 东部和南部沿海地区有效灌溉面积占比较大, 经济作物产量更高, 农业产值提高更快, 说明农业社会发展水平的提高可以促进农业经济产值的提升。

2)资源投入类与生态环境类指标表现为资源投入量与环境排放量大幅增多的趋势, 且沿海(如三亚、琼海等地)较中部山地更为严重。其原因是由于海南热带果蔬、特色经济作物种植比例和畜禽养殖规模不断扩大导致的养分过量投入与排放增加。30 年间海南果蔬、热带特色经济作物等高收益[25]、高耗肥[26-28]作物逐渐发展为种植业的主导产业, 其种植比例的增加既促进了海南岛农业经济的快速发展,

也导致肥料及农药投入量的持续增加，带来了高环境排放风险。海南岛农户生产 1 季香蕉(*Musa nana* Lour.)氮肥投入强度为 1 300 kg·hm^{-2}，种植豆角(*Phaseolus vulgaris*)则分 5 次施用 750 kg·hm^{-2} 氮肥，均高于作物推荐施氮水平(150~180 kg·hm^{-2})[29]。同时，蔬菜水果养分利用效率显著低于其他作物，过量的氮投入会导致养分损失、土壤盈余过量、耕地退化[5]，又间接导致生产力水平降低。2017 年海南岛约 80%市(县)农田氮素盈余超过 240 kg·hm^{-2}，与丁尚等[30]研究结果较为一致，远超荷兰养分监管系统(MINAS)[31]针对不同农田核算的氮素盈余(砂质土壤 60 kg·hm^{-2}、黏质土壤 100 kg·hm^{-2})。已有研究表明, 20 世纪 80 年代以来海南岛过量氮素投入和种植结构改变使得土壤酸化进程加快[32-33]。另外，除了养分过量排放，海南岛也面临农药使用超标的问题。由于环境特殊，农户为保证收益，农药使用频繁，甚至造成食品安全问题[34]。2009 年海南岛农药使用强度高达 56.4 kg·hm^{-2}，是全国平均水平(16.3 kg·hm^{-2})[35]的 3.5 倍，2010 年受“毒豇豆”事件影响，政府出台了蔬菜安全监督措施，减少高毒农药的使用，农药使用强度随之减少。同样，受人口增长、饮食结构变化等因素影响，海南岛畜禽规模也在不断扩大，畜禽系统氮素利用效率和单位动物蛋白产量均随养殖数量的增多而提高，这一变化趋势与 Bai 等[36]研究结论一致。与此同时，畜禽粪尿等排泄物随之剧增，规模化的排污配套设施没有及时完善，大部分粪污仅简单处理甚至不处理直接施入周边作物或荒地[23]，导致单位农田土壤氮盈余、农业系统氨挥发增加，与马怡斐等[37]研究结果一致。2017 年琼海市单位耕地面积畜禽承载量为 14 LU·hm^{-2}，由于农牧生产养分循环脱节，土壤氮盈余已达 665.2 kg·hm^{-2}，是 2014 年河北栾城[37]土壤氮盈余的 2.4 倍(该地区单位耕地面积畜禽承载量为 18 LU·hm^{-2})。海南沿海地区经济作物的种植与养殖更为密集，中部山区热带雨林生态功能区耕作困难且开发受限，资源投入与环境排放量水平低于沿海区域。

3)海南农业生产水平虽有小幅提高，各市县仍处于较低水平。蔬菜水果单产水平较低的原因复杂，主要有以下几点：海南的酸性土壤(平均 pH 低于 5.6[32])易导致肥力不足和作物养分利用效率不高，蔬菜瓜果因不耐高温不适宜夏季种植，全年病虫害高发且易受台风天气干扰造成损失。以蔬菜为例，2017 年海南岛蔬菜单产水平提高至 22.9 kg·hm^{-2}，仍仅为全国水平(34.6 kg·hm^{-2})[35]的 2/3。

4　结论

海南岛农业绿色发展水平在经济、社会和生产力方面呈上升趋势，南部沿海地区要优于北部地区；但就资源投入与环境排放方面来看呈下降趋势，尤其是在沿海地区，环境损失情况较中部山区更为严峻。产生这些变化的原因主要与种植结构与养殖规模的转变有关，海南省在追求经济增长过程中，蔬果、热带特色经济作物播种比例和养殖密度不断增加，且管理措施的优化有限，因此带来了环境问题。中部山区作为受保护的热带雨林生态功能区，开发受限，资源投入及环境污染排放水平优于沿海地区。

资源投入过高、养分利用效率低和环境污染排放较大是限制海南岛农业绿色发展的主要问题。为实现海南地区农业绿色发展，今后的发展规划中应兼顾农业发展与环境保护的协调统一。对于种植业发展，首先需要协调经济作物与粮食作物种植比例，通过减施化肥、农药和农膜以减少环境风险；养殖业应优化区域布局，合理发展畜牧业规模，加强对畜禽粪污的管理，提高资源的循环利用效率；协调农牧关系，促进农牧可持续发展，提高养分利用效率和减少环境排放。

参考文献 References

[1] 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

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

[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] 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

[5] ZHENG H, WANG L J, PENG W J, et al. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China’s new ecological development strategy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(17): 8623–8628

[6] MA L, BAI Z H, MA W Q, et al. Exploring future food provision scenarios for China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(3): 1385–1393

[7] 韩长赋. 大力推进农业绿色发展[J]. 农村实用技术, 2018, (3): 12–13
HAN C F. Vigorously promote green development of agriculture[J]. Applicable Technologies for Rural Areas, 2018, (3): 12–13

[8] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命: 1978—2008 年[J]. 经济学, 2014, 13(2): 537–558
LI G C. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008[J]. China Economic Quarterly, 2014, 13(2): 537–558

[9] 金书秦, 牛坤玉, 韩冬梅. 农业绿色发展路径及其“十四五”取向[J]. 改革, 2020, 33(2): 30–39
JIN S Q, NIU K Y, HAN D M. The path of agricultural green development and its orientation in the 14th five-year plan period[J]. Reform, 2020, 33(2): 30–39

[10] SHEN J B, ZHU Q C, JIAO X Q, et al. Agriculture green development: A model for China and the world[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(1): 5–13

[11] PÉTRY F. Sustainability Issues in Agricultural and Rural Development Policies: Vol. 2: Traineer's-Kit[M]. Roma: FAO, 1995

[12] 高薇, 汪岚, 栾胜基. 欧盟农业环境足迹指数法述评[J]. 生态经济, 2015, 31(9): 176–180
GAO W, WANG L, LUAN S J. Review of the EU agri-environmental footprint index method[J]. Ecological Economy, 2015, 31(9): 176–180

[13] 魏琦, 张斌, 金书秦. 中国农业绿色发展指数构建及区域比较研究[J]. 农业经济问题, 2018, (11): 11–20
WEI Q, ZHANG B, JIN S Q. A study on construction and regional comparison of agricultural green development index in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2018, (11): 11–20

[14] 袁久和. 我国农村绿色发展水平与影响因素的实证分析[J]. 山西农业大学学报: 社会科学版, 2019, 18(6): 46–53
YUAN J H. Empirical analysis of green development level and influencing factors in rural areas of China[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Social Science Edition, 2019, 18(6): 46–53

[15] 杨世琦. 基于欧氏距离的农业可持续发展评价理论构建与实例验证[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3840–3848
YANG S Q. A case study of a novel sustainable agricultural development evaluation method based on Euclidean distance theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3840–3848

[16] LIU Y F, SUN D S, WANG H J, et al. An evaluation of China's agricultural green production: 1978–2017[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118483

[17] 新华社. 中共中央 国务院关于支持海南全面深化改革开放的指导意见[EB/OL]. 北京: 新华社, (2018-04-14). http://www.gov.cn/zhengce/2018-04/14/content_5282456.htm
Xinhua News. Guiding opinions of the CPC Central Committee and the State Council on supporting Hainan's comprehensive deepening reform and opening-up[EB/OL]. Beijing: Xinhua News, (2018-04-14). http://www.gov.cn/zhengce/2018-04/14/content_5282456.htm

[18] 张建杰, 崔石磊, 马林, 等. 中国农业绿色发展指标体系的构建与例证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200069
ZHANG J J, CUI S L, MA L, et al. Construction of a green development index system for agriculture in China and examples[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200069

[19] 海南省统计局, 国家统计局海南调查总队. 海南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018
Hainan Provincial Bureau of Statistics, Hainan Survey Team of National Bureau of Statistics. Hainan Statistical Yearbook 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018

[20] MA L, MA W Q, VELTHOF G F, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1279–1289

[21] 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 in China[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2005

[22] 阮云泽, 张茂星, 陈鹏, 等. 热带人工橡胶林地砖红壤中氨挥发规律的研究[J]. 土壤, 2014, 46(3): 466–469
RUAN Y Z, ZHANG M X, CHEN P, et al. Characterization of ammonia volatilization from latosol soils in rubber plantation in tropical region[J]. Soils, 2014, 46(3): 466–469

[23] 海南省农业农村厅. 关于加大支持儋州市推进畜禽养殖粪污资源化利用的建议[EB/OL]. (2018-04-09). http://www.hainan.gov.cn/rdjydata-6527.html
Hainan Provincial Department of Agriculture. Suggestions on strengthening the support of Danzhou to promote the utilization of manure from livestock and poultry[EB/OL]. (2018-04-09). http://www.hainan.gov.cn/rdjydata-6527.html

[24] 海南省农业厅.《海南省“十三五”秸秆综合利用实施方案》的公告[EB/OL]. (2017-12-19). https://www. nongjitong. com/ news/2017/426707.html
Hainan Provincial Department of Agriculture. Implementation plan of comprehensive utilization of straw in the “Thirteenth Five-Year Plan” in Hainan Province[EB/OL]. (2017-12-19). https://www.nongjitong.com/news/2017/426707.html

[25] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018
National Development and Reform Commission of the People' Repbulic of China. Compilation of National Agricultural Product Cost-Benefit Data[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018

[26] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (5): 70–75
JI H J, ZHANG R L, WU S X, et al. Analysis of fertilizer input and nutrient balance of farmland in Taihu watershed[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008, (5): 70–75

[27] YAN Z J, LIU P P, LI Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 982–989

[28] 武良, 张卫峰, 陈新平, 等. 中国农田氮肥投入和生产效率[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 76–83
WU L, ZHANG W F, CHEN X P, et al. Nitrogen fertilizer input and nitrogen use efficiency in Chinese farmland[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (4): 76–83

[29] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778–783
ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pe-

dologica Sinica, 2008, 45(5): 778–783

[30] 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
DING S, GUO H H, CHENG M Y, et al. 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

[31] OENEMA O, KROS H, DE VRIES W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 20(1/2): 3–16

[32] 邓万刚. 海南岛土壤酸度数据库的建立及土壤酸度变异研究[D]. 儋州: 华南热带农业大学, 2005
DENG W G. Foundation of soil acidity database and study on variation of soil acidity in Hainan island[D]. Danzhou: South China University of Tropical Agriculture, 2005

[33] 赵青云, 王辉, 庄辉发, 等. 海南香草兰园土壤酸化现状及酸化原因分析[J]. 热带农业科技, 2014, 37(1): 12–13
ZHAO Q Y, WANG H, ZHUANG H F, et al. Investigation and analysis of the soil acidification of vanilla orchard in Hainan[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2014, 37(1): 12–13

[34] 梁伟红, 罗微, 刘燕群, 等. 海南冬季瓜菜产业风险及可持续发展对策研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 431–433
LIANG W H, LUO W, LIU Y Q, et al. Study on risks and sustainable development countermeasures of melon-vegetable industry in Hainan Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(10): 431–433

[35] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019

[36] BAI Z H, MA L, QIN W, et al. Changes in pig production in China and their effects on nitrogen and phosphorus use and losses[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12742–12749

[37] 马怡斐, 柏兆海, 马林, 等. 栾城城郊型农牧系统养分流动与环境排放时空特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 493–506
MA Y F, BAI Z H, MA L, et al. Temporal and spatial changes of nutrient flows and losses in the Peri-Urban crop-livestock system in Luancheng[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 493–506