

· 热带植物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240030



主持人:徐 冉

海南典型蔬菜和果树氮素盈余指标的建立

张博飞,肖玉林,张 翀,巨晓棠

(海南大学 热带农林学院,海口 570228)

摘 要: 为了定量海南热带蔬菜和果树体系氮素输入和输出,建立氮素盈余指标并评价其环境影响,搜集了1980年以来发表的有关海南农田的34篇符合要求的文献,包括蔬菜和果树传统和优化氮素管理的72个样本,用土壤界面氮素平衡法分析氮素输入、输出和盈余,并以优化管理下氮素盈余作为氮素盈余阈值。同时,用生命周期评价法(Life Cycle Assessment)定量活性氮损失、温室气体排放、碳和氮足迹。结果表明:传统氮素管理条件下,海南典型蔬菜和果树氮素(N)盈余分别为290和432 kg·hm⁻²;优化氮素管理条件下,对应氮素盈余(阈值)减少39%和49%,分别为176和222 kg·hm⁻²;蔬菜传统氮素管理下活性氮排放、氮足迹、温室气体排放(CO₂-eq)和碳足迹(CO₂-eq)分别为145 kg·hm⁻²、4.5 kg·t⁻¹、9 444 kg·hm⁻²和295 kg·t⁻¹,优化氮素管理分别减少以上指标的26%、24%、19%和19%;果树传统氮素管理下活性氮排放、氮足迹、温室气体排放和碳足迹分别为177 kg·hm⁻²、4.5 kg·t⁻¹、14 758 g·hm⁻²和388 kg·t⁻¹,优化氮素管理分别减少以上指标的28%、33%、21%和26%。综上所述,海南典型蔬菜和果树体系氮素盈余阈值分别为176和222 kg·hm⁻²,采用优化模式(如“4R Plus”养分管理策略、土壤“改酸增碳”和水肥一体化等)可以达到以上氮素盈余阈值,并降低当前活性氮排放、氮足迹、温室气体排放和碳足迹的19%~33%。

关键词: 蔬菜;果树;氮素盈余阈值;活性氮排放;温室气体排放;海南

中图分类号: S63; S66 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054 (2024) 04-0391-09

张博飞,肖玉林,张翀,等. 海南典型蔬菜和果树氮素盈余指标的建立[J]. 热带生物学报, 2024, 15(4):391-399.

doi:10.15886/j.cnki.rdswwb.20240030

海南因其独特的光热水资源优势,成为我国重要的冬季蔬菜和热带水果生产基地,蔬菜以辣椒(*Capsicum annuum*)、茄子(*Solanum melongena*)和豇豆(*Vigna unguiculata*)等为主,果树以香蕉(*Musa nana*)、菠萝(*Ananas comosus*)和芒果(*Mangifera indica*)等为主。研究表明,这些体系的氮肥投入量高,蔬菜和果树每季平均化肥氮施用量分别为470和473 kg·hm⁻²,远远高于全国平均水平的318和393 kg·hm⁻²[1]。高强度的氮素投入集中在近海农田,对近海海域水体质量造成了威胁[2],多个入海口总氮浓度都超过了海水水质Ⅲ或Ⅳ类标准[3],受到不同程度污染,也是海南

岛近海珊瑚礁和海草严重退化的重要原因之一[4]。然而,当前海南农田氮肥去向、损失途径及收支状况研究薄弱,对热带地区农田氮素循环关键过程和调控措施还不很清楚,不利于海南热带特色高效农业发展和生态环境保护。氮素盈余是评价农田氮素管理水平的重要指标,可以在未监测各途径氮素损失的情况下,衡量土壤-作物体系氮素损失潜力[5]。近3年来,利用面上调研或点上跟踪取样等方法,初步厘清了海南典型作物体系的氮素盈余数量,如发现海南典型稻菜轮作、香蕉和菠萝氮素(N)每季盈余高达500 kg·hm⁻²以上[1,6]。研究发现,将氮素盈余控制在阈值以

收稿日期: 2024-02-24

修回日期: 2024-03-12

基金项目: 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2021008);海南省自然科学基金项目(422RC597);国家自然科学基金项目(42207348);海南大学启动经费项目[KYQD(ZR)-20098, KYQD(ZR)-21028]

第一作者: 张博飞(1997-),男,海南大学热带农林学院2021级硕士研究生。E-mail:z15670585072@163.com

通信作者: 张翀(1987-),男,副教授。研究方向:碳氮循环与环境效应。E-mail:zhangchong@hainanu.edu.cn;

巨晓棠(1965-),男,教授。研究方向:农田生态系统氮素循环与环境效应。E-mail:juxt@cau.edu.cn

下,损失的氮素能够在环境可承受范围内,不会引起大气、水体和土壤等生态环境退化^[5]。海南典型蔬菜和果树氮素盈余阈值是多少?达到该阈值产生多少环境代价(活性氮损失,温室气体排放,碳和氮足迹等)?这些都是目前需要解决的关键科学问题。本研究以海南典型蔬菜和果树体系为对象,利用文献综合分析的方法,评估海南蔬菜和果树体系传统和优化2种管理模式下的氮素输入、输出、盈余及环境影响。建立优化模式下的氮素盈余作为对应种植模式的氮素盈余阈值^[5],并评价传统和优化管理下氮素盈余的环境代价,旨在为实现海南农田氮素的优化管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据库建立 根据国家统计局^[7]及《海南统计年鉴2022》^[8]确定海南主要种植的蔬菜及果树类型,并利用 Web of Science 和中国知网检索相关文献,检索关键词包括“蔬菜/果树类型”、“产量”、“氮”和“海南”等,试验必须是在海南进行的大田(露地)试验,不包括室内、盆栽和大棚试验;试验中必须包含施氮量和产量这2个重要参数。共获得34篇符合要求的文献,其中蔬菜共有17个研究点,主要分布在琼北(59%);果树共有22个研究点,主要分布在琼南(45%)。蔬菜和果树传统氮素管理的样本分别为6和20个,优化氮素管理下的样本量为21和25个。从文献中提取时空信息(详细位置、经纬度、试验起止年月);气象条件(年均气温、年均降雨量);土壤性质(土壤类型、有机碳、全氮、pH、质地、砂粉黏粒含量);田间管理(管理方式、施肥量及肥料类型、施氮方式、灌水量等);产量和吸氮量等数据。

1.2 氮素输入和输出项 传统施氮量均为文中明确的传统处理,优化施氮量来自于明确的优化施肥处理或结论中计算出的经济最佳施氮量;若未明确指出优化施氮量,文献含有氮水平试验,采用一元二次方程拟合作物产量与施氮量的关系,求得经济最佳施氮量(优化施氮量)^[5]。假设产量和施氮量方程为 $y=ax^2+bx+c$,则经济最佳施氮量为 $x=(px/py-b)/(2 \times a)$,其中, x 为施氮量, y 为作物产量, px 为氮肥价格4.86元·kg⁻¹^[9], py 为收获物价格。蔬菜和水果收获物的价格为近3年的平均价

格,黄瓜(*Cucumis sativus*)、豇豆、辣椒及茄子价格分别为4.55、8.01、5.29和4.65元·kg⁻¹,菠萝和香蕉的价格分别为5.50和5.07元·kg⁻¹^[10]。有机肥氮投入量采用有机肥用量与含氮量乘积求得,若文献中未明确有机肥含氮量,则根据机肥类型从文献收集所需参数,本研究涉及的羊粪和鸡粪含氮量分别为0.79%和1.50%^[11],此为有机肥的鲜基含氮量,若文中未明确有机肥为干基或鲜基,均按鲜基计算。

氮沉降数据来自于国家氮沉降观测网华南地区的年氮沉降值,为33(kg·hm⁻²)·a⁻¹^[11]。由于全年大气氮沉降量具有时间变异性,本研究根据杨小林^[12]得到的2016至2018年不同月份的氮沉降量,计算中国南方地区不同月份的氮沉降相对比例,结合上述华南地区氮沉降值和不同作物生育期所处月份(超过15天则按一个月计算,不满15天则不算)求得整个生育期氮沉降量。根据以往的研究,豆科作物(豇豆)的生物固氮量为115 kg·hm⁻²,其他作物生物固氮量取15 kg·hm⁻²^[13]。我国南方地区灌溉水主要依赖河流、湖泊及水库等地表水,研究表明南方地表水的全氮平均值为1.0 mg·L⁻¹^[14],结合文献灌水量来计算灌溉输入到农田的氮素量。

若文献中明确了作物地上部吸氮量则直接用于计算,否则根据收获物生物量和 N_{100} (百千克收获物地上部吸氮量)计算。本研究黄瓜、豇豆、辣椒、茄子的 N_{100} 平均值分别为0.23、0.62和0.28,菠萝、芒果、香蕉的 N_{100} 平均值分别为0.66、0.30和0.50^[11]。

1.3 氮素盈余和氮素利用率的计算 氮素盈余(N_{sur})和氮素利用率(NUE)分别用公式(1)和(2)计算。

$$N_{sur}=N_{fer}+N_{man}+N_{dep}+N_{fix}+N_{irr}-N_{har}, \quad (1)$$

$$NUE=N_{har}/(N_{fer}+N_{man}+N_{dep}+N_{fix}+N_{irr}), \quad (2)$$

式中: N_{sur} 和 NUE 分别指氮素盈余和氮素利用率; N_{fer} 、 N_{man} 、 N_{dep} 、 N_{fix} 和 N_{irr} 分别指来自化肥、有机肥、氮沉降、生物固氮和灌溉水的氮素输入; N_{har} 指作物的地上部吸氮量。

1.4 环境影响评价 利用生命周期评价法(LCA)定量蔬菜和果树生产过程中的环境代价,包括活性氮损失、氮足迹、温室气体排放和碳足迹,包括农资阶段和农作阶段^[15]。

1.4.1 活性氮及氮足迹 农资阶段是生产和运输所有农资(肥料、农药、机械消耗的柴油及灌溉用电)时的活性氮(N_r)排放,主要是氨(NH_3)及氮氧化物的排放,计算公式如下:

$$N_{r-\text{MS}} = \sum_{i=1}^m F_i \times \text{Rate}_i, \quad (3)$$

式中,“ i ”代表投入农资类型; Rate_i 代表农资用量,主要包括氮肥、磷肥、钾肥、农药、机械消耗的柴油和电力, F_i 代表农资在生产和运输过程中产生的活性氮损失因子,从以往的研究中获取这些参数^[16-17]。

农作阶段活性氮 N_r 损失($N_{r-\text{FS}}$, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)是氮肥在施用过程中产生的排放,包括氧化亚氮(N_2O)排放、 NH_3 挥发、硝酸盐(NO_3^-)淋溶,计算依据氮素损失模型^[18-19],蔬菜和果树各途径活性氮计算方法分别为公式(4)~(6)和公式(7)~(10)。总活性氮排放和氮足迹分别用公式(11)和(12)计算。

$$\text{N}_2\text{O} \text{ 排放} = 0.0073 \times \text{氮肥用量} + 0.75, \quad (4)$$

$$\text{NO}_3^- \text{ 淋溶} = 0.22 \times \text{氮肥用量} + 0.60, \quad (5)$$

$$\text{NH}_3 \text{ 挥发} = 0.084 \times \text{氮肥用量} + 0.50, \quad (6)$$

$$\text{N}_2\text{O} \text{ 排放} = 0.0139 \times \text{氮肥用量}, \quad (7)$$

$$\text{NO}_3^- \text{ 淋溶} = 0.185 \times \text{氮肥用量}, \quad (8)$$

$$\text{NH}_3 \text{ 挥发} = 0.00364 \times \text{氮肥用量}, \quad (9)$$

$$\text{N 径流} = 0.0275 \times \text{氮肥用量}, \quad (10)$$

$$N_{r-\text{Total}} = N_{r-\text{MS}} + N_{r-\text{FS}}, \quad (11)$$

$$N_{r-\text{F}} = N_{r-\text{Total}} / Y_1, \quad (12)$$

式中, $N_{r-\text{Total}}$ 表示单位面积总活性氮损失的总量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, Y_1 代表蔬菜的产量,单位为 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; $N_{r-\text{F}}$ 表示单位产量活性氮损失量,即氮足迹,单位为 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

1.4.2 温室气体排放及碳足迹 温室气体的排放主要包括氮磷钾肥、农药、生产和使用过程以及机械消耗的柴油及灌溉用电过程中所产生的 CO_2 、甲烷(CH_4)及氧化亚氮(N_2O)的排放,以及氮肥施用直接带来的 N_2O 排放,以及 NO_3^- 淋溶和 NH_3 排放引起的间接 N_2O 排放,具体计算见公式(13)~(15),碳足迹计算见公式(16)。

$$\text{GWP}_{-\text{FS}} = \sum_{i=1}^m \text{PEC}_i \times \text{Rate}_i, \quad (13)$$

$$\text{N}_2\text{O}_{-\text{Total}} = \text{N}_2\text{O} \text{ 排放} + 1\% \times \text{NH}_3 \text{ 挥发} + 2.5\% \times \text{NO}_3^- \text{ 淋溶}, \quad (14)$$

$$\text{GWP}_{-\text{Total}} = \text{GWP}_{-\text{FS}} + \text{N}_2\text{O}_{-\text{Total}} \times 44/28 \times 265, \quad (15)$$

$$\text{CF} = \text{GWP}_{-\text{Total}} / Y_1, \quad (16)$$

式中, $\text{GWP}_{-\text{FS}}$ 表示氮磷钾肥和其他农资的在生产和运输过程中产生的温室气体排放量,“ i ”代表农资类型, Rate_i 代表农资用量,主要包括氮肥、磷肥、钾肥、农药、农膜、机械消耗的柴油和电力, PEC_i 代表每个农业投入产品在生产和运输过程中产生的温室气体排放系数,从以往的研究中获取这些参数^[18]。 $\text{N}_2\text{O}_{-\text{Total}}$ 表示氮肥施用过程中 N_2O 的排放量,主要包括氮肥施用过程中引起的 N_2O 直接排放以及 NO_3^- 淋溶和 NH_3 挥发间接产生的 N_2O 的排放量,1%和2.5%分别是与 NH_3 挥发和 NO_3^- 淋溶相关的 N_2O 间接排放系数^[20]。 $\text{GWP}_{-\text{Total}}$ 表示的是氮磷钾肥及其他农资在生产和运输过程中产生的温室气体排放总量;44/28代表 N_2O -N对 N_2O 的换算系数;265代表 N_2O 以 CO_2 -eq计算的全球增温潜势^[20];CF表示单位面积产量上温室气体排放总量,即碳足迹,单位为 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ (以 CO_2 -eq计)。

1.5 统计分析 利用 Microsoft Office Excel 2021 和 IBM SPSS Statistis 25 软件对数据进行统计分析,使用 Origin 2023 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 蔬菜氮素输入、输出和盈余 传统氮素管理下,海南豇豆、辣椒和茄子总氮素投入量的分别为520、473、423 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中,辣椒和茄子的肥料(化肥和有机肥)投入量较高,占其总氮素投入的92%~93%,豇豆因生物固氮能力较强,肥料投入仅占其总氮素投入的75%。3种作物的地上部携出氮量分别为293、161和160 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占其总氮素输入的56%、34%和38%,其中,辣椒和茄子的地上部携出氮远远低于氮素的输入量;豇豆、辣椒和茄子氮素盈余量分别为227、313和263 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。利用算术平均求得海南蔬菜传统氮素管理下氮素输入、地上部吸氮和盈余分别为473、183和290 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

优化氮素管理措施下,海南豇豆、辣椒、茄子和黄瓜总氮素投入量分别为323、346、304和248 $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$,前3种作物总氮素投入量相比于传统氮素管理措施分别减少了37%、27%和28%。豇豆、辣椒、茄子和黄瓜地上部携出氮为179、193、114和133 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占其总氮素输入的67%、51%、38%和54%,氮素盈余量分别为143、188、189和115 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。利用算术平均求得海南蔬菜优化

氮素管理下氮素输入、地上部吸氮和盈余分别为 357、180 和 176 kg·hm⁻²。优化氮素管理下氮素盈
余比传统氮素盈余低 39%，其主要原因为优化氮素管理的施氮量的减少(116 kg·hm⁻²)。

表1 不同蔬菜传统氮素管理下的氮素投入、产出和盈余
Tab. 1 N input, output and surplus under conventional N management in vegetable field

项目 Item	豇豆 Cowpea	辣椒 Pepper	茄子 Eggplant
样本量/个 Samples	1	4	1
产量/(kg·hm ⁻²) Yield	47 276	30 303	57 094
氮输入/(kg·hm ⁻²) N input			
化肥氮 Chemical N fertilizer	390	426±14	390
有机肥氮 Manure N	0	16±16	0
氮沉降 N deposition	15	15±3	18
生物固氮 Biological nitrogen fixation	115	15	15
灌水氮 N irrigation	0	1	0
氮输出/(kg·hm ⁻²) N output			
地上部吸氮量 N harvest	293	161±31	160
氮素盈余(kg·hm ⁻²) N surplus	227	312±25	263
氮素利用率(NUE)/%	56	34	38

注：部分数据以平均值±标准误差表示，下同。
Note: Some data represent mean ± standard error, the same below.

表2 不同蔬菜优化氮素管理下的氮素投入、产出和盈余
Tab. 2 N input, output and surplus under optimum N management in vegetable field

项目 Item	豇豆 Cowpea	辣椒 Pepper	茄子 Eggplant	黄瓜 Cucumber
样本量/个 Samples	4	14	2	1
产量/(kg·hm ⁻²) Yield	28 935	36 499	40 803	57 609
氮输入/(kg·hm ⁻²) N input				
化肥氮 Chemical N fertilizer	185±64	276±40	231±133	227
有机肥氮 Manure N	14±14	40±76	40±40	0
氮沉降 N deposition	9	15±2	18	6
生物固氮 Biological nitrogen fixation	115	15	15	15
灌水氮 N irrigation	0	0	0	0
氮输出/(kg·hm ⁻²) N output				
地上部吸氮量 N harvest	179±1	193±18	114±38	133
氮素盈余(kg·hm ⁻²) N surplus	143±24	188±36	189±55	115
氮素利用率(NUE)/%	67	51	38	54

2.2 果树氮素输入、输出和盈余 传统氮素管理措施下,菠萝、芒果和香蕉氮素总投入量的分别为 920、247、588 kg·hm⁻²,菠萝和香蕉的肥料(化肥和有机肥)氮投入量相对较高,占总氮素投入的 92% ~ 94%,芒果肥料氮占其总氮素投入的 80%。
3 种作物的地上部携出氮分别为 373、63 和 174kg·hm⁻²,占其总氮素输入的 41%、26% 和 30%,芒果和香蕉的地上部携出氮远远低于氮素的输入量。菠萝、芒果和香蕉氮素盈余量分别为 546、184 和 414 kg·hm⁻²。利用算术平均求得海南果树

传统氮素管理下氮素输入、地上部吸氮和盈余分别为669、237和432 kg·hm⁻²。

优化氮素管理措施下,菠萝、芒果和香蕉总氮素投入量分别为554、261、566 kg·hm⁻²,化肥氮投入分别占氮素投入的90%、81%和91%,地上部携出氮量分别为453、64和241 kg·hm⁻²,占其总氮素

输入的82%、25%和43%,菠萝、芒果和香蕉氮素盈余量分别为101、197和324 kg·hm⁻²。利用算术平均求得海南果树优化氮素管理下氮素输入、地上部吸氮和盈余分别为488、266和222 kg·hm⁻²。优化氮素管理下氮素盈余比传统氮素盈余低49%,得益于优化氮素管理施氮量的减少(181 kg·hm⁻²)。

表 3 不同果树传统氮素管理下的氮素投入、产出和盈余

Tab. 3 N input, output and surplus under conventional N management in orchard

项目 Item	菠萝 Pineapple	芒果 Mango	香蕉 Banana
样本量/个 Samples	8	3	9
产量/(kg·hm ⁻²) Yield	56 566	20 907	34 831
氮输入/(kg·hm ⁻²) N input			
化肥氮 Chemical N fertilizer	862±43	198±38	528±63
有机肥氮 Manure N	0	0	11±10
氮沉降 N deposition	43±1	34±1	34±2
生物固氮 Biological nitrogen fixation	15	15	15
灌水氮 N irrigation	0	0	0
氮输出/(kg·hm ⁻²) N output			
地上部吸氮量 N harvest	373±42	63±12	174±22
氮素盈余/(kg·hm ⁻²) N surplus	547±36	184±32	414±65
氮素利用率(NUE)/%	41	26	30

表 4 不同果树优化氮素管理下的氮素投入、产出和盈余

Tab. 4 N input, output and surplus under optimum N management in orchard

项目 Item	菠萝 Pineapple	芒果 Mango	香蕉 Banana
样本量/个 Samples	8	6	11
产量/(kg·hm ⁻²) Yield	68 588	21 360	48 284
氮输入/(kg·hm ⁻²) N input			
化肥氮 Chemical N fertilizer	473±32	146±14	440±45
有机肥氮 Manure N	23±15	65±3	77±34
氮沉降 N deposition	43±2	35±1	34±1
生物固氮 Biological nitrogen fixation	15	15	15
灌水氮 N irrigation	0	0	0
氮输出/(kg·hm ⁻²) N output			
地上部吸氮量 N harvest	453±41	64±7	241±29
氮素盈余/(kg·hm ⁻²) N surplus	101±34	197±46	325±51
氮素利用率(NUE)/%	82	25	43

2.3 传统和优化氮素管理下蔬菜和果树生产环境代价 传统氮素管理下,海南蔬菜活性氮损失及氮足迹分别为145 kg·hm⁻²和4.5 kg·t⁻¹,不同活性氮损

失途径中,硝酸盐淋溶的贡献率最高(65%),其次为氮挥发(25%)、农资阶段活性氮排放(7%)和氧化亚氮排放(3%)。温室气体排放和碳足迹平均值(以

CO₂-eq 计)分别为9 444 kg·hm⁻²和295 kg·t⁻¹,其中农资和农作阶段分别贡献总温室气体排放的71%和29%。优化氮素管理下,海南蔬菜的单位面积活性氮损失及氮足迹分别为108 kg·hm⁻²和3.4 kg·t⁻¹,其中,硝酸盐淋溶、氨挥发、农资阶段活性氮排放和氧化亚氮排放的贡献率分别为64%、25%、9%和3%;温室气体排放和碳足迹平均值分别为7 612 kg·hm⁻²和239 kg·t⁻¹,其中,农资和农作阶段分别贡献总温室气体排放的73%和27%。优化氮素管理下,蔬菜活性氮损失、氮足迹、温室气体排放和碳足迹分别比传统氮素管理低26%、24%、19%和19%。

传统氮素管理下,海南果树活性氮损失及氮足迹分别为177 kg·hm⁻²和4.5 kg·t⁻¹,不同活性氮损失途径中,硝酸盐淋溶的贡献率最高(64%),其次为氨挥发(13%)、氮径流(10%)、农资阶段活性

氮排放(8%)和氧化亚氮排放(5%)。温室气体排放和碳足迹平均值分别为14758 kg·hm⁻²和388 kg·t⁻¹,其中,农资和农作阶段分别贡献总温室气体排放的67%和33%。优化氮素管理下,海南果树的单位面积活性氮损失及氮足迹平均值分别为128 kg·hm⁻²和3.0 kg·t⁻¹,其中硝酸盐淋溶、氨挥发、农资阶段活性氮排放、氮径流和氧化亚氮排放的贡献率分别为63%、12%、11%、9%和5%,温室气体排放和碳足迹平均值分别为11 626 kg·hm⁻²和286 kg·t⁻¹,其中,农资和农作阶段分别贡献总温室气体排放的70%和30%。优化氮素管理下,果树活性氮损失、氮足迹、温室气体排放和碳足迹分别比传统氮素管理低28%、33%、21%和26%。优化管理蔬菜和果树环境代价的降低的原因是农田管理措施的提高,如采用合理的肥料用量、土壤改良和有机无机配施等。

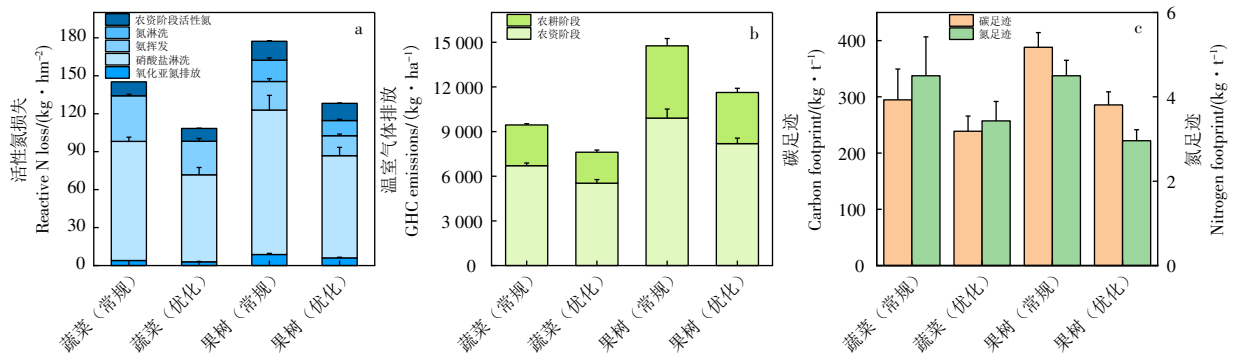


图1 传统和优化氮素管理海南蔬菜和果树活性氮损失(a)、温室气体排放(b)、氮和碳足迹(c)

误差棒表示标准误差。

Fig. 1 Reactive nitrogen loss(a), greenhouse gas emissions(b), nitrogen and carbon footprint(c) in Hainan vegetables field and orchard under traditional and optimum N management

Some data represent mean $\pm$ standard error.

3 讨论

3.1 海南蔬菜和果树氮素盈余及环境影响 海南典型露地蔬菜氮素盈余为290 kg·hm⁻²,高于我国露地蔬菜氮素盈余(199~204 kg·hm⁻²)^[11, 21],可能是由于蔬菜的根系较浅(主要集中在0~30 cm的土层)^[21-22],热带地区高降雨量的气候条件导致投入氮肥极易随水淋溶或径流损失,为了维持较高目标产量需要增加氮肥投入,导致了更高的氮素盈余。海南典型果树氮素盈余为432 kg·hm⁻²,接近于我国果树氮素盈余(464 kg·hm⁻²)^[11]。果树因生育周期长等原因,氮肥施用次数和用量往往高于蔬

菜生产^[23],是其氮素盈余比露地蔬菜更高的重要原因之一。海南作物体系具有较高的氮损失潜力和环境代价,如蔬菜比长三角地区具有更高的活性氮损失(海南145 kg·hm⁻²,长三角地区103 kg·hm⁻²)和温室气体排放(海南9 444 kg·hm⁻²,长三角地区5 930 kg·hm⁻²)^[24],也比我国辣椒生产体系具有更高的活性氮损失(120 kg·hm⁻²)和温室气体排放(5 656 kg·hm⁻²)^[18]。海南果树(14 758 kg·hm⁻²)比我国柑橘(12 300 kg·hm⁻²)排放了更多的温室气体^[25]。

海南蔬菜和果树高氮素盈余和环境代价的主要原因是高氮肥投入,本研究证实了优化氮肥管

理模式,如“4R Plus”养分管理策略、土壤“改酸增碳”和水肥一体化等优化管理模式^[6],可以大幅降低海南作物生产的氮盈余和环境代价。优化模式下,蔬菜和果树的氮盈余分别减少39%和49%,为176和222 kg·hm⁻²;蔬菜优化氮素管理下活性氮排放、氮足迹、温室气体排放和碳足迹分别降低26%、24%、19%和19%;果树优化氮素管理下的以上指标分别降低28%、33%、21%和26%,实现了较好的减排效果。在农业生产中,通过基于目标产量的优化施氮量、土壤增碳协调供氮的方法,可以有效减少氮素盈余和环境代价。

3.2 建立海南蔬菜和果树氮素盈余阈值 氮素盈余是表征作物体系氮素损失的重要指标^[5,26-28],氮素盈余阈值(N surplus benchmark)指特定作物体系可以接受的最大氮素盈余量,该氮盈余下,可以达到较高的作物产量同时能将氮素损失降低到当前能实现的最低程度^[5]。确定氮素盈余阈值的方法通常有3种,根据文献[29]确定,根据环境指标(如地表水质或空气质量等)可承受的阈值反推氮素盈余阈值^[30],根据多点多年的优化试验来确定^[5]。当前国际普遍用欧洲氮素专家组推荐的80 kg·hm⁻²作为每季作物允许的氮素盈余阈值^[29]。然而,以上未能考虑土壤-气候的空间变异对氮素盈余阈值的影响。利用多年多点优化处理,Zhang等^[5]建立了我国主要粮食作物的氮素盈余阈值,一年一熟和一年两熟作物分别为40~100和110~190 kg·hm⁻²。

本研究利用海南多年多点的优化处理,建立了典型蔬菜和果树氮素盈余阈值,分别为176和222 kg·hm⁻²,均高于前人提出的单季作物氮素盈余阈值。其原因有2个方面,首先,蔬菜和果树经济价值比粮食作物高,导致我国蔬菜和果树生产中氮肥管理很粗放,过量施氮现象十分普遍,产生了大量氮素盈余,但扭转这一现象需要阶段性优化氮素管理措施的具体实施;其次,蔬菜和水果生产需要高频次大量灌水,粗放灌水方式(如漫灌)直接导致氮素损失较高^[31-32]。本研究以海南农田为对象,建立了蔬菜和果树经济作物氮素盈余阈值,为减少氮素负面环境效应提供依据。若某一田块的氮素盈余高于本研究提出的氮素盈余阈值,则需要通过上述优化管理策略,在保障作物产量和品质前提下减少施氮量和(或)提高作物吸氮量;

反之,则需要增加施氮量,避免出现作物产量和品质的下降。限于海南农田氮素循环研究方面薄弱,本研究仅收集到72个样本的田间数据,由于蔬菜和果树种类丰富、分布广泛,随着未来田间试验样本的不断丰富,需要进一步建立海南更多类型蔬菜和果树的氮素盈余指标,进一步量化不同氮素管理措施对氮素盈余的影响,在区域尺度上评估这些措施对社会经济的影响,为提高氮素管理水平提供科学依据。此外,本研究主要研究了活性氮和温室气体排放引起的负面环境效应,对氮素盈余可能导致的土壤酸化和水体富营养化未做分析,未来研究可以进一步关注,以综合评价氮素环境影响。

4 结 论

海南传统氮素管理下典型蔬菜和果树氮素盈余分别为290和432 kg·hm⁻²,导致了环境代价很高,蔬菜和果树活性氮排放、氮足迹、温室气体排放和碳足迹分别为145和177 kg·hm⁻²、4.5和4.5 kg·t⁻¹、9 444和14 758 kg·hm⁻²、295和388 kg·t⁻¹。采用优化模式显著降低以上环境代价的19%~33%。海南典型蔬菜和果树体系氮素盈余阈值分别为176和222 kg·hm⁻²,分别是欧洲氮素专家组推荐氮素盈余阈值的2和3倍,未来需要进一步建立不同类型、不同区域蔬菜和果树氮素的盈余指标,为提高区域氮素管理水平提供科学依据。

参考文献:

- [1] 洪秀杨, 钟于秀, 李伟芳, 等. 海南农田养分平衡状况及环境风险评价[J]. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(11): 2070-2081.
- [2] 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.
- [3] ZHANG P, RUAN H, DAI P, et al. Spatiotemporal river flux and composition of nutrients affecting adjacent coastal water quality in Hainan Island, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125293.
- [4] 黄晖, 陈竹, 黄林韬, 等. 中国珊瑚礁状况报告 2010-2019[M]. 北京: 海洋出版社, 2021: 1-127.
- [5] ZHANG C, JU X, POWLSON D, et al. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6678-6687.
- [6] 赵永鉴, 张博飞, 张翀, 等. 海南典型稻菜轮作区和香蕉

- 园氮磷盈余及土壤硝态氮累积[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2954–2965.
- [7] 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, 2022.
- [8] 海南省统计局. 海南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业农村统计摘要(2022)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- [11] 肖玉林. 中国蔬菜和果树氮素盈余指标的建立[D]. 海口: 海南大学, 2023.
- [12] 杨小林, 贺梦微, 陈艺晏, 等. 丹江口库区大气氮干湿沉降动态变化特征研究[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 62–68.
- [13] SMIL V. Nitrogen in crop production: an account of global flows [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(2): 647–662.
- [14] XU Z, ZHANG X, XIE J, et al. Total nitrogen concentrations in surface water of typical agro-and forest ecosystems in China, 2004–2009 [J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e92850.
- [15] HE X, QIAO Y, LIU Y, et al. Environmental impact assessment of organic and conventional tomato production in urban greenhouses of Beijing city, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 134: 251–258.
- [16] CHEN X H, MA C C, ZHOU H M, et al. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001–2018[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 72: 105661.
- [17] ZHAO C, GAO B, WANG L, et al. Spatial patterns of net greenhouse gas balance and intensity in Chinese orchard system [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146250.
- [18] 王孝忠. 我国蔬菜生产的环境代价、减排潜力与调控途径[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [19] ZHAO H, LAKSHMANAN P, WANG X, et al. Global reactive nitrogen loss in orchard systems: a review [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153462.
- [20] IPCC. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application[C]// Agriculture, forestry and other land use. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Geneva, Switzerland: IPCC, 2019.
- [21] WANG X, DOU Z, SHI X, et al. Innovative management programme reduces environmental impacts in Chinese vegetable production [J]. *Nature Food*, 2021, 2: 47–53.
- [22] TEI F, DE NEVE S, DE HAAN J, et al. Nitrogen management of vegetable crops [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 106316.
- [23] ZHOU J, GU B, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088.
- [24] 赵明炯, 王孝忠, 刘彬, 等. 长三角地区蔬菜生产的活性氮损失和温室气体排放估算[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1409–1419.
- [25] 赵环宇. 我国柑橘生产的环境代价及氮素优化措施研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- [26] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development [J]. *Nature*, 2015, 528: 51–59.
- [27] SOUZA E F C, SORATTO R P, SANDAÑA P, et al. Split application of stabilized ammonium nitrate improved potato yield and nitrogen-use efficiency with reduced application rate in tropical sandy soils [J]. *Field Crops Research*, 2020, 254: 107847.
- [28] SAPKOTA T B, TAKELE R. Improving nitrogen use efficiency and reducing nitrogen surplus through best fertilizer nitrogen management in cereal production: The case of India and China[J]. *Advances in Agronomy*, 2023, 178: 233–294.
- [29] EU NITROGEN EXPERT PANEL. Nitrogen Use Efficiency (NUE) an indicator for the utilization of nitrogen in food systems [EB/OL]. 2015, <https://research.wur.nl/en/publications/nitrogen-use-efficiency-nue-an-indicator-for-the-utilisation-of-n>.
- [30] SCHULTE-UEBBING L F, BEUSEN A H W, BOUWMAN A F, et al. From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution [J]. *Nature*, 2022, 610: 507–512.
- [31] ZHU X, ZHOU P, MIAO P, et al. Nitrogen use and management in orchards and vegetable fields in China: challenges and solutions[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9: 386–395.
- [32] HUDDLELL A M, GOLFORD G L, TULLY K L, et al. Meta-analysis on the potential for increasing nitrogen losses from intensifying tropical agriculture [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1668–1680.

Establishment of Nitrogen surplus indicators in the main vegetable and orchard systems in Hainan

ZHANG Bofei, XIAO Yulin, ZHANG Chong, JU Xiaotang

(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228)

Abstract: This study aims to quantify the nitrogen (N) input and output of Hainan's tropical vegetable and orchard cropping systems, establish N surplus indicators, and evaluate the environmental impacts. We collected 34 papers published in Hainan since 1980, including 72 samples of conventional and optimized N management of vegetables and orchards. The N inputs, outputs, and surpluses under conventional and optimized N management were analyzed based on the soil surface nitrogen balance method, and the N surplus under the optimized management was used as the N surplus benchmark. The life cycle assessment method (LCA) was used to quantify reactive N losses, greenhouse gas emissions, carbon and N footprints under conventional and optimized N management. Under conventional N management, the N surpluses were 290 kg·hm⁻² in vegetables and 432 kg·hm⁻² in orchards, respectively, the corresponding N surplus benchmarks under optimized N management were reduced by 39% and 49%, which were 176 and 222 kg·hm⁻², respectively. The reactive N emission, N footprint, greenhouse gas emissions(CO₂-eq), and carbon footprint(CO₂-eq) under conventional N management of vegetables were 145 kg·hm⁻², 4.5 kg·t⁻¹, 9 444 kg hm⁻² and 295 kg·t⁻¹, respectively; under optimized N management, the above indicators were reduced by 26%, 24%, 19% and 19%, respectively. The active N emission, N footprint, greenhouse gas emission, and carbon footprint under conventional N management of orchards were 177 kg·hm⁻², 4.5 kg·t⁻¹, 14 758 kg·hm⁻² and 388 kg·eq t⁻¹, respectively; Optimizing N management can reduce the above indicators by 28%, 33%, 21% and 26%, respectively. In conclusion, the N surplus benchmarks of Hainan's typical vegetable and orchard systems were 176 and 222 kg·hm⁻², respectively, using optimized N management (such as "4R Plus" nutrient management strategy, soil acid modification and organic carbon improvement, fertigation, etc.) can achieve the above N surplus benchmarks, and the current reactive N emissions, N footprint, greenhouse gas emissions, and carbon footprints can be reduced by 19%–33%.

Keywords: vegetable; orchard; nitrogen surplus benchmark; reactive nitrogen emission;
greenhouse gas emission; Hainan

(责任编辑:潘学峰)