

江苏省居民食物氮足迹研究

张雅娟¹, 王延华^{1,2}, 蔡祖聪^{1,2}, 邱雨¹, 杨浩^{1,2}

(1.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)

(2.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

[摘要] 我国城镇化进程的加快带动了城乡居民食物链中氮素的流动. 食物氮足迹提出的目的在于量化食物生命周期中释放出的氮素及其对环境带来的影响. 研究了江苏省 2000—2015 年氮素在农田、禽畜、家庭 3 个子系统中的流动所产生的食物氮足迹,探讨减少居民氮素排放对环境的影响. 研究表明,江苏省城镇与农村人均食物氮足迹呈相反的变化趋势,但在 2012 年大致相等. 城镇食物氮足迹从 16.08 kgN/(人·年)波动上升至 21.52 kgN/(人·年),平均为(19.93±1.45)kgN/(人·年). 农村食物氮足迹从 23.84 kgN/(人·年)波动下降至 20.21 kgN/(人·年),平均为(22.33±1.34)kgN/(人·年). 食物氮因子是导致食物氮足迹变化较大的主导因素,通过减少化肥施用量、宣传低氮消费、提高加工效率、提倡“光盘行动”等方法能够有效地减少食物氮足迹.

[关键词] 江苏省,城乡居民,氮流模型,氮足迹,食物链

[中图分类号] X24;F126.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)01-0078-08

Study of the Food Nitrogen Footprints of Urban and Rural Residents in Jiangsu Province

Zhang Yajuan¹, Wang Yanhua^{1,2}, Cai Zucong^{1,2}, Qiu Yu¹, Yang Hao^{1,2}

(1.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: The acceleration of the urbanization process has led to the circulating of active nitrogen in the food chain of the urban and rural residents. The purpose of the food nitrogen footprint is to quantify the active nitrogen released in the food life cycle and identify the environmental effects imposed by the active nitrogen. Accordingly, this paper discusses how to shrink the environmental impacts made by the active nitrogen emissions in urban areas. To calculate the amount of the active nitrogen circulating in the food chain, the data during year 1990 to 2015 in Jiangsu province are analyzed. The results show that per capita food nitrogen footprint in urban and rural areas is the opposite trend. However, in 2012 they are equal. For urban areas, food nitrogen footprint rises from 16.08 kgN/(person·yr) to 21.52 kgN/(person·yr), with an average of (19.93±1.45)kgN/(person·yr). The food nitrogen footprint in rural areas decreases from 23.84 kgN/(person·yr) in 2000 to 20.21 kgN/(person·yr) in 2015, with an average of (22.33±1.34)kgN/(person·yr). The food nitrogen factor is dominant factor leading to large food nitrogen footprints. However, to shrink the food nitrogen footprint, we apply some methods, just as reducing the amount of fertilizer, promoting the ideals of low nitrogen consumption, improving the processing efficiency, initiating the campaign of “Clear Plate” etc.

Key words: Jiangsu province, urban and rural residents, nitrogen flow model, nitrogen footprint, food chain

氮素(N)是控制陆地、淡水以及海洋生态系统结构与功能的关键元素之一^[1-2]. 随着现代工业和农业的发展,大量的活性氮释放到土壤、水体等环境当中,人类的排放已超过自然界的固氮量,由此导致了雾霾、地下水硝酸盐污染、酸雨、臭氧层破坏以及极端气候的出现,环境问题逐渐走进人们的视野^[3-5]. 改革开放以来,我国经济快速增长,人均收入水平、可支配收入水平显著增长,人们对食物的需求也发生了改变,饮食结构的多样化、侧重方面都发生了变化. 氮素作为食物蛋白质的重要成分,随着食物生产消费而

收稿日期:2018-04-08.

基金项目:“十三五”水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-005)、国家自然科学基金(41673107).

通讯联系人:王延华,教授,博士生导师,研究方向:氮素梯级流动及其环境效应. E-mail:wangyanhua@njnu.edu.cn

流动,其流动模式和流量与生态环境密切相关,氮素流动变化带来的环境问题已经显现^[6-8]. 国内氮肥利用效率较低,普遍在 30%~41%,国外大多数国家均低于 50%^[7-9]. Galloway^[10] 最先提出氮足迹的概念,目的是基于消费者视角量化食物生产-消费过程中所释放进环境的氮素总和. 氮足迹是继生态足迹、水足迹、碳足迹研究之后出现的又一个研究热点^[4]. 2010 年,Leach^[10] 等人开发了用于计算个人、家庭以及国家的氮足迹在线模型(N-Calculator's <http://n-print.org>),估算出美国、德国、荷兰和英国的人均氮足迹年均值分别为 38.0、23.6、23.0 和 27.1 kgN/(人·年),其中食物氮足迹占比很大,分别占总氮足迹的 73%、72%、88%和 85%^[2,11]. 目前我国氮足迹的研究工作中,省级尺度仅有江西省已估算出^[2];市级尺度研究较多,北京、厦门、广州、南昌、广州均已估算^[2,12-14]. 江苏省是中国人口密度最高的省份之一,综合经济实力位居前列,人民生活水平质量较高. 由于社会经济和人口的快速增加,城市食物氮素代谢速度和数量增长迅猛. 本文以江苏省为研究靶区,对比分析 2000—2015 年江苏省城镇和农村居民人均食物氮足迹的变化,探讨江苏省食物消费氮足迹的发展趋势,为研究减少食物链氮素对环境的压力提供科学建议.

1 研究区域概况

江苏省位于中国大陆东部沿海中心(116°18'—121°57'E,30°45'—35°20'N),东临黄海,西接安徽,北连山东,东南与浙江和上海接壤. 全省土地面积为 10.72 万 km²,占全国总面积的 1.12%,地形以平原为主(70%以上). 气候类型以淮河—灌溉总渠为界,北部属暖温带湿润季风气候,南部属亚热带湿润季风气候. 植被覆盖率达到 75.89%. 江苏省内河湖众多,水域面积为 1.73 万 km²,水产资源丰富,滩涂、浅海,东部沿海渔场面积达 15.4 万 km²^[15].

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与研究范围

本文研究数据主要来自于 2001—2016 年的《江苏省统计年鉴》^[15]. 以江苏省人均食物消费量为基础数据计算食物氮消费量,分析江苏省城镇尺度和农村尺度的居民食物氮足迹. 由于城镇和农村尺度的居民外出就餐数据获取困难且所占比例较小,故暂且忽略. 因此,本研究仅针对居民家庭食物消费,不同食物的氮含量参数来源于相关文献. 城镇居民包括城市和集镇中所居住、生活的人. 农村居民为在农村生活、居住的人. 在此定义下,城镇居民计算范围为江苏省内 13 个地级市、54 个市辖区、21 个县级市、21 个县、767 个镇,农村居民计算范围为江苏省内 71 个乡.

2.2 研究方法

本文中食物氮足迹主要是研究氮素在农田、禽畜、家庭 3 个消费子系统流入流出. 秦树平^[6]在 Galloway 定义氮足迹的基础上继续深化,将氮足迹定义为某种产品或服务在其生产、运输及消费过程中直接或间接排放的氮素总和. 借鉴 N-calculator 计算模型^[16]的主要框架来计算江苏省城镇和农村尺度居民人均食物氮足迹,食物氮足迹主要包括食物消费氮足迹、食物生产氮足迹、能源氮足迹(由于能源氮足迹计算较复杂,故按照食物氮足迹的 25%来计算^[10]).

食物氮足迹计算公式^[12]为:

$$FP_T = FP_C + FP_P + FP_E, \quad (1)$$

式中,FP_T 为食物氮足迹;FP_C 为食物消费氮足迹,FP_C = 人均食物消费量×食物含氮量,FP_P 为食物生产氮足迹,FP_P = 虚拟氮因子×FP_C;FP_E 为能源氮足迹.

图 1 所示为食物氮足迹流动过程. 其中,食物消费氮足迹和食物生产氮足迹来自于农田消费系统、禽畜消费系统、家庭消费系统,能源氮足迹来源于能源部分.

2.2.1 食物生产氮足迹

食物生产氮足迹是指在食物生产加工及运输过程中产生的人类不能直接利用的氮素. 虚拟氮因子是食物生产氮足迹重要的组成部分,其定义为在食物生产-消费过程中氮素损失量^[7,13]. 为了避免重复计算,虚拟氮的计算不包括在食物生产-消费过程中的交通运输、灌溉等使用能源消耗所产生的氮素,这部分归入能源氮足迹^[10].

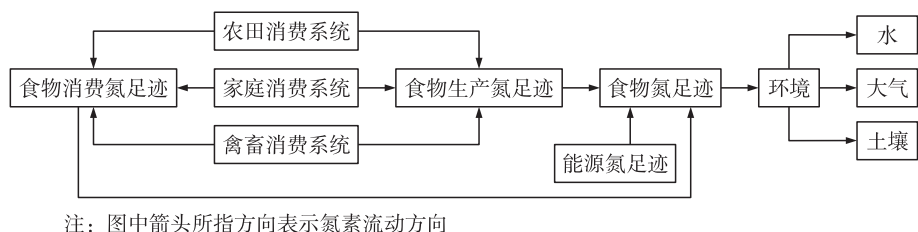


图 1 食物氮足迹流动过程图

Fig. 1 Food nitrogen footprint flow process

2.2.2 食物消费氮足迹

计算食物消费氮足迹需要两个参数,即人均食物消费量和食物含氮量. 江苏省居民主要食物消费种类划分为 7 类:粮食、水产品、水果、畜肉类、禽肉类、蛋类及蔬菜. 城镇及农村居民人均购买量数据均从《江苏省统计年鉴》^[15] 获得,不同食物中含氮量参照相关研究结果获得^[12-13,17]. 在本文计算中,默认食物消费摄入成年人体内的氮素最终全部以粪尿形式经各种渠道排放到环境中^[9].

2.2.3 能源氮足迹

能源氮足迹指在食物整个生命周期内产生的能源消耗,包括生产食物、运输食物、烹饪加工食物、处理剩余食物 4 个部分^[12]. 由于该部分数据涉及面广,数据收集难度大,为了研究简便,类比美国食物氮足迹组成,将能源氮足迹按总氮足迹的 25% 进行计算^[10].

2.3 统计检验

参数制约着模型计算结果的可靠性和准确性,统计随机样存在误差、数据代表性等原因都会导致模型参数的不稳定性,而参数的不稳定性又会影响到模拟预测结果的准确性^[18]. 本研究模型涉及参数较多,需要对参数进行敏感性、蒙特卡罗^[18-21] 不确定分析,探讨食物氮足迹变化的驱动因子.

由于参数主要来源于虚拟氮因子和食物含氮量,故针对这两类参数进行敏感性分析. 敏感性分析又称灵敏度分析,如式(2)所示^[21-22],通常以参数的变化率占输出结果变化率的比重来表示:

$$I = (\Delta X_i / X_i) / (\Delta Y / Y), \quad (2)$$

式中, I 为灵敏度; X_i 为第 i 个参数; Y 为模型输出结果; ΔX_i 、 ΔY 为参数和输出结果的变化量.

3 研究结果

3.1 虚拟氮因子

不同食物氮含量及虚拟氮因子如表 1 所示^[12-13]. 美国最先提出虚拟氮因子,包含 6 个方面:氮素可利用量、可利用氮素百分比、废弃氮素产量、氮素循环百分比、氮素循环量、氮素损失量. 日本氮因子在美国氮因子的基础上改进了后两个方面,并加入了污水处理系统的反硝化脱氮过程,因而日本虚拟氮因子低于美国. 由于我国污水处理系统总体脱氮水平不高(最高能达到 70%^[23]),难以达到日本水平,本文在计算江苏省居民食物氮足迹时采用美国虚拟氮因子.

表 1 不同食物的虚拟氮因子^[12]

Table 1 Virtual N factors in food

种类	虚拟氮因子	种类	虚拟氮因子
粮食	14.40	水产品	3.0
蔬菜	1.76	水果	10.6
畜肉类	29.22	蛋类	3.4
禽肉类	29.90		

3.2 敏感性和不确定性分析

由于食物含氮量敏感程度大于虚拟氮因子的敏感程度,因此对食物含氮量的 7 个参数进行蒙特卡罗不确定性分析,结果如表 2 所示. 从表中可以看出,水产品、蛋类、禽肉类、水果变异系数较小,这是因为这些参数所包含的子类含氮量在不同文献中相近,数据统计方法权威一致,因此可保证较小的误差和较高的准确性;粮食、蔬菜、畜肉类的变异系数较高,这是由于不同的文献中这 3 类参数所包含的子类较多,含氮量差距较为明显,而统计年鉴中的统计较为粗略,但统计年鉴中的数据统计多使用同一个系统,且有关已发表的相关文献可反映出这一数据的准确性具有保障^[6,12],故数据准确性和稳定性较高^[15].

在对食物含氮量的 7 个参数经不确定性影响比重大小、参数敏感性、不确定性分析之后可知,畜肉类、蔬菜和粮食的食物含氮量对模拟结果的不确定性影响比重较大(>19%),保证这些参数的准确性才可以保障本模型模拟结果的准确性.

表 2 食物含氮量不确定性分析结果
Table 2 Uncertainty analysis of food N contents

种类	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差/%	变异系数
粮食	1.40	2.10	1.75	0.20	11.55
蔬菜	0.18	0.30	0.24	0.04	15.01
畜肉类	1.50	3.04	2.28	0.44	19.45
禽肉类	2.48	3.9	2.78	0.18	6.35
水产品	2.88	2.96	2.92	0.02	0.82
蛋类	2.05	2.20	2.12	0.04	2.05
水果	0.15	0.17	0.16	0.01	2.88

3.3 江苏省各类食物氮足迹发展趋势

图 2 所示为江苏省城乡居民各类食物氮足迹变化趋势。除粮食外,其余 6 种食物城镇居民所产生的氮

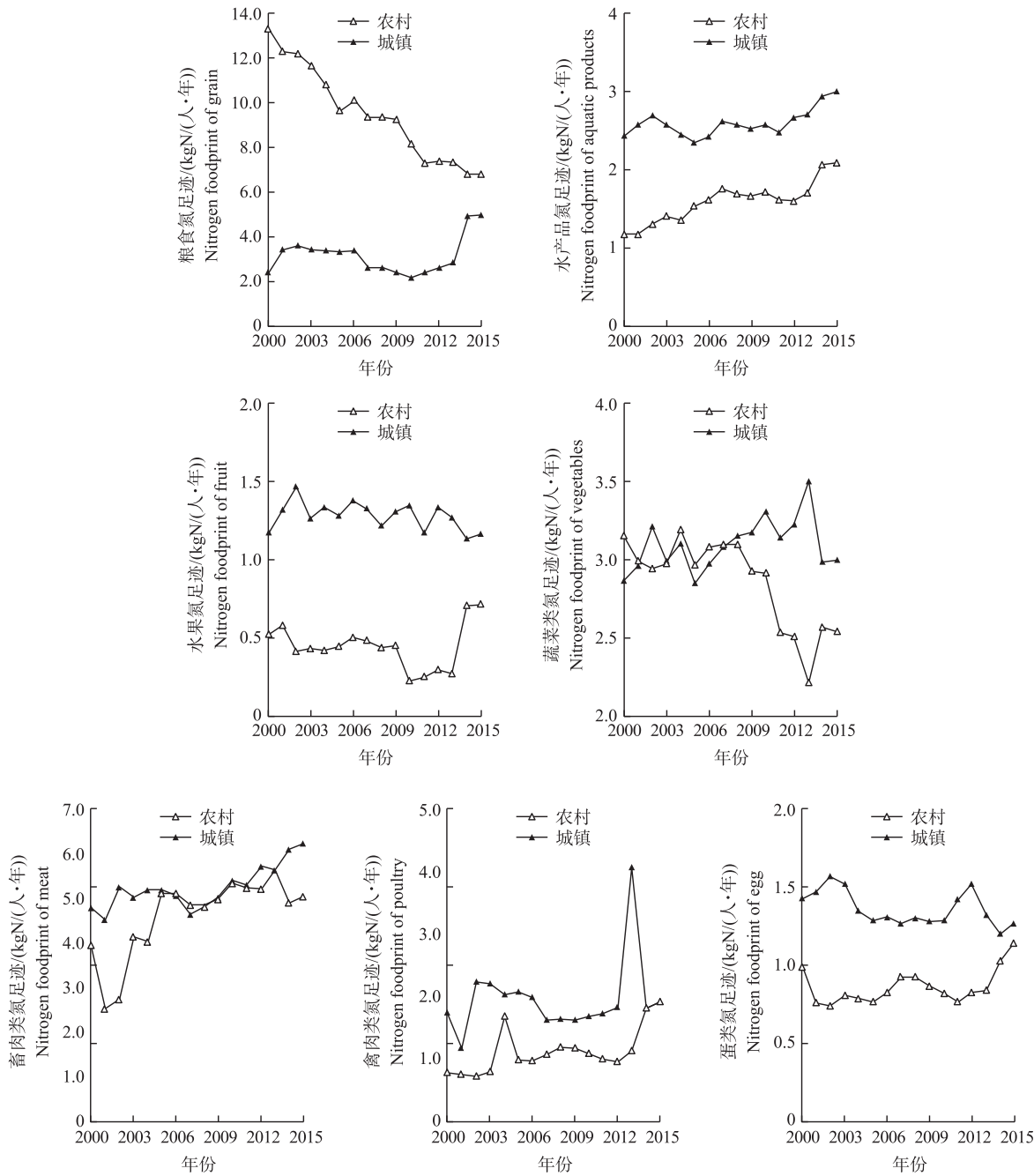


图 2 江苏省城乡居民各类食物人均氮足迹变化趋势

Fig. 2 Urban, rural resident all kinds of food nitrogen footprint in Jiangsu province

足迹均大于农村居民且均呈现波动上升的趋势. 其中,2013 年城镇居民的蔬菜、禽类氮足迹有大幅度的波动,其主要原因是居民消费量的突然增加. 农村居民水果氮足迹在 2010 年期间呈最低水平,在 2008—2013 年期间持续下降,其主要原因是产量增加、价格上涨、出口量上涨、商品率增加、自留食物减少等. 畜肉类、蔬菜氮足迹在 2000—2006 年期间呈强劲增长态势. 就整体来看,2002—2008 年期间城乡居民蔬菜氮足迹基本持平,2006—2012 年期间城乡居民畜肉类氮足迹基本持平.

3.4 居民年均食物氮足迹逐年变化

图 3 所示为 2000—2015 年江苏省居民人均食物氮足迹的变化趋势. 可以看出,江苏省城镇居民食物氮足迹波动小于农村居民,城镇总体浮动较小且呈持续上升状态,与农村呈明显相反的变化趋势. 城镇居民人均食物氮足迹在 2011 年开始有明显的上升趋势至 2015 年处于峰值,为 21.52 kgN/(人·年)且有继续增长的趋势,平均为 19.93 kgN/(人·年). 江苏省城镇人均食物氮足迹高于北京市城镇居民(17.78 kgN/(人·年)),接近于德国、英国和荷兰等发达国家(见表 3). 城镇尺度人均食物消费氮足迹由 2000 年 16.80 kgN/(人·年)逐渐上升至 2015 年 21.52 kgN/(人·年),这与近 10 年来经济发展、产业转型及大量外来人口有关.

表 3 国内外人均食物氮足迹
Table 3 Food nitrogen footprint around the world

国家尺度	氮足迹/(kgN/(人·年))	省市尺度	食物氮足迹/(kgN/(人·年))	城乡尺度	氮足迹/(kgN/(人·年))
美国	38.0	北京	—	北京市 城镇	17.78
德国	23.6	广州	25.98	北京市 农村	12.72
荷兰	23.0	南昌	—	—	—
英国	27.1	兰州	—	南昌市 城镇	15.53
日本	28.1	江西省	—	南昌市 农村	14.76
中国	21.3			兰州市 城镇	10.66
				兰州市 农村	10.19
				江西省 城镇	20.80
				江西省 农村	15.92

江苏省农村居民人均食物氮足迹总体呈波动下降状态,且高于北京市农村居民水平(12.72 kgN/(人·年)). 农村人均食物消费氮足迹由 23.84 kgN/(人·年)波动下降至 20.21 kgN/(人·年),最低值出现在 2011 年,此后呈现反弹上升趋势,平均为 22.33 kgN/(人·年). 粮食氮足迹变化幅度最大且与食物氮足迹呈现相同的下降趋势,在 2000—2001 年、2009—2011 年之间下降趋势尤为显著. 畜肉类氮足迹有较为明显上升趋势. 2000—2015 年农村居民除粮食之外,其余氮足迹均小于城镇居民. 随着经济发展,农民可支配收入提高,饮食结构朝着多样化、合理化转变,蛋奶类、水产品、水果和肉类的消费逐年上升.

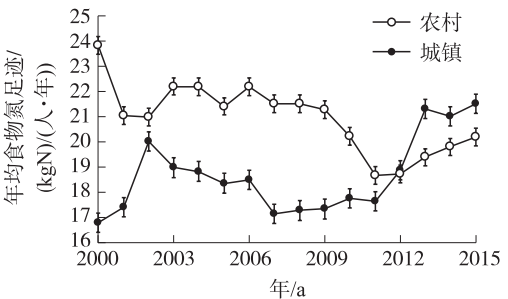


图 3 2000—2015 年江苏省居民人均食物氮足迹的变化
Fig. 3 Variation of food nitrogen footprint of Jiangsu province

4 讨论

4.1 江苏省城镇和农村居民食物消费特征

粮食氮足迹在江苏省居民食物氮足迹中占主要地位,领先于蔬菜和其他食物主要消费种类. 如图 4 所示,农村居民多年来饮食结构以粮食、蔬菜、畜肉类为主,粮食在食物消费中所占比例最大;城镇居民饮食结构较为均衡,蔬菜在食物消费中所占比例最大;就总体氮足迹消费结构来看,粮食、蔬菜为代表的素食食物氮足迹在下降,而肉蛋奶为代表的荤食食物氮足迹在增加. 这主要是由于江苏省居民粮食消费量基数较大且呈持续减少态势,随着近几年经济的发展居民们由原来的单一饮食结构逐渐转变为较丰富的饮食结构,从而减少了粮食氮足迹.

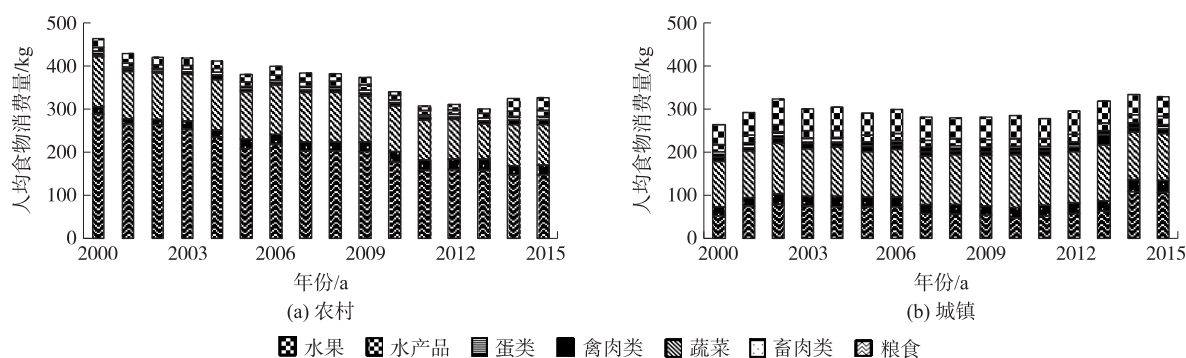


图4 城乡居民食物消费量结构变化

Fig. 4 Urban and rural residents changes in food consumption structure

4.2 食物氮生产-消费变化的环境效应

江苏省农田种植业氮肥利用率为 30%~35%,养殖业氮利用率为 8.1%~11.4%^[24-26]. 据估算,江苏省农田-畜禽-家庭系统一年共产生 7.87×10^5 万 t 废弃物氮,其中秸秆氮、人畜粪尿氮和餐厨垃圾氮各占 38.57%、36.59%、5.12%. 这些废弃物氮中的 34.04%来源于农田生产子系统,42.39%来源于畜禽养殖子系统,23.57%来源于家庭消费子系统. 从去向看,废弃物氮总量的 35.70%通过还田、作饲料和原料得到再利用,以饲料最多;其余 64.30%进入环境,以进入水环境最多. 江苏省食物链系统氮素环境损失率高而利用率低,进入环境的氮素使水体、土壤受到污染威胁,环境恶化与食物链系统产生的大量氮素负荷有关.

张丹^[27]等人的研究结果显示,北京市餐饮食物浪费所引起总的氮排放量为 16.37 g/人次,其中有 1.24 g/人次的氮排放来自于食物的直接浪费,其余 15.13 g/人次氮排放来自于食物生产过程. 北京市餐饮食物浪费的氮足迹为 0.22 gN/g 食物,即每浪费 1 g 的食物,就会有 0.22 g 的氮排放到环境中. 因此,合理控制外出就餐点餐量,避免过度浪费,对于减少环境氮负荷量、减轻环境压力有重要影响.

4.3 减少氮足迹的措施与对策

为了发展与落实环保政策,减小江苏省城乡居民的食物氮足迹,本文在分析江苏省城乡不同尺度食物氮足迹数据的基础上提出以下 3 点建议:

(1) 改进耕作技术,提高加工效率,减少运输距离,倡导“光盘行动”,减少食物浪费.

能源消费氮足迹在整个食物氮足迹中占 25%,主要表现为食品加工、运输、烹饪、剩余残渣处理所需的能源消耗. 提倡节能减排,优化加工流程,提高食品企业的加工效率. 在农田系统里改进耕作技术,通过氮肥深施和控制氮肥施用量、添加肥料增效剂等技术及方法,使土壤中氮素残留量减少^[28-32].

(2) 商品增加氮足迹标签.

大型法国超市家乐福在几年前已使用“生态标签”和“营养标签”,得到消费者认可和支持^[32]. 全球已有超过 20 家企业产品贴上“碳足迹”的标签^[33-34]. 目前尚无公司在实际产品中应用氮足迹标签. 使用食品氮足迹标签,可以让消费者了解产品对环境的影响,从而引导消费者转变原有高氮消费习惯,促进低氮环保.

(3) 提倡低氮经济,大力宣传低碳低氮的生活理念.

英国率先提出“低碳经济”,目的是提高能源效率和使用清洁能源^[32]. 我国政府应依照本国国情,发展具有我国特色的“低氮经济”. 低氮经济,重点在于降低经济生活释放在环境中的氮素含量,更好地保持我国经济长期可持续发展.

5 结论

本文运用 N-calculator 模型,对 2000—2015 年江苏省食物氮足迹及食物链生产-消费系统的氮素环境效应进行综合分析,得到如下结论:

(1) 江苏省城镇居民人均食物氮足迹从 2000 年的 16.08 kgN/(人·年)上升至 2015 年 21.52 kgN/(人·年),总体浮动较大且呈持续增长状态,2011 年开始上升趋势明显,至 2015 年处于峰值(21.52 kgN/(人·年)),且仍有继续增长的趋势. 饮食结构主要以植物性低氮食物消费为主.

(2) 江苏省农村人均食物氮足迹从 2000 年 23.84 kgN/(人·年)下降至 2015 年 20.21 kgN/(人·年),

最低值出现在2011年,此后呈现反弹上升趋势,平均值为22.33 kgN/(人·年)。与农村相比,膳食结构皆为合理,营养均衡。

(3)江苏省农田-畜禽-家庭系统一年共产生 7.87×10^5 万t废弃物氮,其中秸秆氮、人畜粪尿氮和餐厨垃圾氮各占38.57%、36.59%和5.12%。在废弃物氮中35.70%通过还田、作饲料和原料得到再利用,其余64.30%废弃物氮进入环境。通过提高加工效率、改善饮食结构和减少废弃物排放量、减少食物氮足迹、缓解环境压力的有效措施。

[参考文献](References)

- [1] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. Technical report: human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecological applications, 1997, 7(3): 737-750.
- [2] 王彦芳. 江西省城乡居民食物氮足迹研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2017.
WANG Y F. Study on food nitrogen footprint of urban and rural residents in Jiangxi[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2017.
- [3] 巨晓棠, 张富锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境学报, 2003, 12(1): 24-28.
JU X T, ZHANG F S. Accumulation of nitrate nitrogen in soils of Northern China and its impact on the environment[J]. Ecology and environment, 2003, 12(1): 24-28. (in Chinese)
- [4] 方凯. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1647-1659.
FANG K. Footprint family: concept, classification, theoretical framework and integrated pattern[J]. Acta ecologica sinica, 2015, 35(6): 1647-1659. (in Chinese)
- [5] MOOMAW W R. Energy, industry and nitrogen: strategies for decreasing reactive nitrogen emissions[J]. Ambio, 2002, 31(2): 184-189.
- [6] 秦树平, 胡春胜, 张玉铭, 等. 氮足迹研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 462-467.
QIN S P, HU C S, ZHANG Y M, et al. Advances in nitrogen footprint research[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2011, 19(2): 462-467. (in Chinese)
- [7] 许振成, 王俊能, 庄晓诚, 等. 人体粪尿氮排放及模型研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(33): 16510-16512.
XU Z C, WANG J N, ZHUANG X C, et al. Study on nitrogen emission and model of human excreta[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2009, 37(33): 16510-16512. (in Chinese)
- [8] 张富锁, 王激清, 张卫峰, 等. 主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta pedologica sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [9] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 释控肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2678-2684.
ZHAO B, DONG S T, WANG K J, et al. Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield field ammonia volatilization and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. Chinese journal of applied ecology, 2009, 20(11): 2678-2684. (in Chinese)
- [10] LEACH A M, GALLOWAY J N, BLEEKER A, et al. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment[J]. Environmental development, 2012, 1(1): 40-66.
- [11] STEVENS C J, LEACH A M, DALE S, et al. Personal nitrogen footprint tool for the United Kingdom[J]. Environmental science: processes & impacts, 2014, 16(7): 1563-1569.
- [12] 洗超凡, 欧阳志云. 城乡居民食物氮足迹估算及其动态分析—以北京市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 2413-2421.
XIAN C F, OUYANG Z Y. Calculation and dynamic analysis of the food nitrogen footprints of urban and rural residents in Beijing[J]. Acta ecologica sinica, 2012, 32(19): 2413-2421. (in Chinese)
- [13] 于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等. 城镇居民食物氮消费变化及其环境负荷—以厦门市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 5953-5961.
YU Y, CUI S H, ZHAO S N, et al. Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen[J]. Acta ecologica sinica, 2012, 32(19): 5953-5961. (in Chinese)
- [14] 王彦芳, 徐步朝, 蔡建辉. 南昌市城乡居民食物氮足迹估算与分析[J]. 江西科学, 2016, 34(4): 429-433.
WANG Y F, XU B C, CAI J H. Nanchang residents' food carbon footprint estimation and evaluation[J]. Jiangxi science, 2016, 34(4): 429-433. (in Chinese)
- [15] 江苏省统计局. 江苏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2016.
Jiangsu Statistics Bureau. Jiangsu statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016. (in Chinese)
- [16] GALLOWAY J N, ABER J D, ERISMAN J W, et al. The nitrogen cascade[J]. Bio science, 2003, 53(4): 341-356.
- [17] GALLOWAY J N, WINIWARTER W, LEIP A, et al. Nitrogen footprints: past, present and future[J]. Environmental research

- letters, 2014, 9(11): 115003.
- [18] 何朋朋. 基于蒙特卡罗方法的边坡可靠性分析[D]. 北京:中国地质大学, 2006.
HE P P. Slope reliability analysis with Monte Carlo method[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006. (in Chinese)
- [19] 唐晓, 王自发, 朱江, 等. 蒙特卡罗不确定性分析在 O_3 模拟中的初步应用[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 541–550.
TANG X, WANG Z F, ZHU J, et al. Preliminary application of Monte Carlo uncertainty analysis in O_3 simulation[J]. Climatic and environmental research, 2010, 15(5): 541–550. (in Chinese)
- [20] 陈怀艳, 曹芸, 韩洁. 基于蒙特卡罗法的测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 301–308.
CHEN H Y, CAO Y, HAN J. Evaluation of uncertainty in measurement based on a Monte Carlo method[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2011, 25(4): 301–308.
- [21] 杨允, 张士杰, 肖云汉, 等. 蒙特卡罗法在分布式供能系统不确定性评价中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2): 16–23, 6.
YANG Y, ZHANG S J, XIAO Y H, et al. Application of Monte Carlo method in uncertainty evaluation for cogeneration systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2): 16–23, 6. (in Chinese)
- [22] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1056–1062.
XU C G, HU M Y, CHANG Y, et al. Sensitivity analysis in ecological modeling[J]. Chinese journal of applied ecology, 2004, 15(6): 1056–1062. (in Chinese)
- [23] 吴悦颖, 王洪臣, 孙娟, 等. 我国城镇污水处理设施脱氮除磷能力现状分析及对策建议[J]. 给水排水, 2014(增刊1): 118–122.
WU Y Y, WANG H C, SUN J, et al. Status analysis and countermeasures for nitrogen and phosphorus removal in Chinese town sewage treatment facilities[J]. Water & wastewater engineering, 2014(Suppl 1): 118–122. (in Chinese)
- [24] 谷保静, 葛莹, 朱根海, 等. 人类活动对杭州城乡复合系统陆源氮排海的驱动分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2078–2087.
GU B J, GE Y, ZHU G H, et al. Terrestrial nitrogen discharges to the ocean derived from human activities area China[J]. Acta scientiae circumstantia, 2010, 30(10): 2078–2087. (in Chinese)
- [25] 彭春瑞. 农业面源污染防治理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 15–19.
PENG C R. Theory and technology of agricultural non-point source pollution prevention and control[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003: 15–19. (in Chinese)
- [26] 王丹, 王延华, 杨浩, 等. 活性氮梯级流动进展[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3): 112–118.
WANG D, WANG Y H, YANG H, et al. Research progress on reactive nitrogen cascade[J]. Environmental science & technology, 2016, 29(9): 112–118. (in Chinese)
- [27] 张丹, 伦飞, 成升魁, 等. 不同规模餐馆食物氮足迹浪费及其氮足迹—以北京市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1699–1708.
ZHANG D, LUN F, CHENG S K, et al. The nitrogen footprint of different scales of restaurant food waste: a Beijing case study[J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(5): 1699–1708. (in Chinese)
- [28] 陈清, 温闲芳, 郑兴耘, 等. 适宜的氮素投入与农业的持续发展[J]. 核农学通报, 1996, 17(4): 193–197.
CHEN Q, WEN X F, ZHENG X Y, et al. Appropriate nitrogen input and sustainable development of agriculture[J]. Journal of nuclear-agricultural sciences, 1996, 17(4): 193–197. (in Chinese)
- [29] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2014, 20(4): 783–795. (in Chinese)
- [30] 苏阳, 刘德林. 提高氮肥利用率方法的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2005(6): 38–40.
SU Y, LIU D L. Research progress on methods of increasing nitrogen fertilizer utilization rate[J]. Hunan agricultural sciences, 2005(6): 38–40. (in Chinese)
- [31] HUANG Y, BIRD R, BELL M. A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and microsimulation[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2009, 14: 197–204.
- [32] 秦军. 发展低碳经济的国际对比及其对我国的启示[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(22): 12–16.
QIN J. International comparison of developing low-carbon economy and its enlightenment to China[J]. Science & technology progress and policy, 2010, 27(22): 12–16. (in Chinese)
- [33] SHIBATA H, CATTANEO L R, LEACH A M, et al. First approach to the Japanese nitrogen footprint model to predict the loss of nitrogen to the environment[J]. Environmental research letters, 2014, 9(11): 115013.
- [34] FU D F, CAI M Y, HUA J L, et al. Research of microwave processing experiment on municipal sludge of sewage plant[J]. China water & wastewater, 1999, 15(6): 56–57.