

DOI: 10.5846/stxb201509111882

周迪, 谢标, 杨浩, 孙盼盼, 宋一民, 汪雪野. 南京城市化食物生产消费系统氮素流动变化. 生态学报, 2017, 37(3): - .

Zhou D, Xie B, Yang H, Sun P P, Song Y M, Wang X Y. Nitrogen flow associated with food production and consumption in Nanjing. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

南京城市化食物生产消费系统氮素流动变化

周迪¹, 谢标^{1,2,3,*}, 杨浩^{1,2,3}, 孙盼盼¹, 宋一民¹, 汪雪野¹

1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 城市化的发展对食物生产消费过程中氮素的流动产生了一定的影响。本文以 1995—2012 年南京市食物生产消费变化为基础, 分析了食物生产消费过程中氮素的流动变化及其引起的环境负荷。结果表明, 农村和城镇人均食物氮消费量分别由 1995 年的 5.09 kg 人⁻¹ a⁻¹ 和 3.04 kg 人⁻¹ a⁻¹ 下降至 2012 年的 4.11 kg 人⁻¹ a⁻¹ 和 2.65 kg 人⁻¹ a⁻¹; 与 1995 年相比, 南京市食物消费代价降低了 39.29%; 农田系统和畜禽养殖系统氮素综合利用率由 1995 年的 18.71% 增加至 2012 年的 24.34%, 整体低于全国水平, 大量的氮素进入环境; 1995 年食物链引起氮素的环境负荷为 100.49 GgN/a, 到 2012 年下降至 69.90 GgN/a, 下降了 30.44%。南京城市化的发展增加了食物进口, 会使食物生产地的氮环境负荷大幅度增加。

关键词: 城市化; 氮素; 食物生产消费; 南京

Nitrogen flow associated with food production and consumption in Nanjing

ZHOU Di¹, XIE Biao^{1,2,3,*}, YANG Hao^{1,2,3}, SUN Panpan¹, SONG Yimin¹, WANG Xueye¹

1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: With rapid urbanization, the food production-consumption system is associated with increased nitrogen (N) flow resulting in environmental problems. However, quantitative analyses of N flow during urban expansion and information about their drivers and trajectories are limited, especially at the city level. In the present study, we analyzed the changes in N flow and environmental load in the food production and consumption system of Nanjing, which experienced remarkable population and economic growth between 1995 and 2012, using a combination of statistical databases, literature surveys, and the mass balance model. The results showed that population density increased at the expense of agricultural land and livestock breeding. Food production transformed from self-sufficiency to deficiency, resulting in increased food imports. The rapid increase of the migrant population coincided with a rapid increase in gross domestic production, with changes in food demand and consumption patterns. The structure of food consumption in Nanjing transformed from grain-oriented to grain-vegetable-meat-oriented, and the per capita N consumption of food decreased from 1995 to 2012. In addition, due to different living standards and food consumption patterns between rural and urban residents, the percentage of the per capita decline for N consumption of food was different. The rural and urban per capita N consumption decreased from 5.09 kg/(per a) and 3.04 kg/(per a) in 1995 to 4.11 kg/(per a) and 2.65 kg/(per a) in 2012, respectively. The N cost of food consumption of Nanjing decreased from 8.40 kg/kg in 1995 to 5.10 kg/kg in 2012, and declined by 39.29%. The N cost of

基金项目: 国家重大科学研究计划(2014CB953800); 国家自然科学基金(41273103)

收稿日期: 2015-09-11; 网络出版日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: biao@hotmai.com

the food consumption was relatively low when compared to the mean in China, and decreased over time. Mean N use efficiency in food production increased from 18.71% in 1995 to 24.34% in 2012; however, it was still lower than the mean national level. A large amount of N entered the environment and caused severe air, water, and soil pollution. The decrease of total N input, combined with increased N use efficiency in crop and animal production systems, resulted in a decreased environmental N load from food production and consumption of 30.44%, from 100.49 GgN/a in 1995 to 69.90 GgN/a in 2012. Regarding food production in Nanjing, environmental N load could be efficiently reduced by optimizing N fertilizer management and using slow-release fertilizer. Regarding food consumption, environmental N load is produced primarily from food waste and human sewage discharge. The effective collection and treatment of these wastes and the utilization of these in rural areas is urgently needed. The rapid increase in the urban population from 1995 onwards has greatly contributed to the increasing import of food and apparent low food N cost. As food imports increased with rapid growth of urban areas in Nanjing, the N cost associated with the production and processing of imported food and feed was transferred to areas where it was produced. Other regions with increased food production will be affected by large increases in N load.

Key Words: urbanization; nitrogen; food production-consumption; Nanjing

随着我国城市化水平不断提高,城市居民的食物消费由主食消费为主转向主副食品替代,以及以植物性食物消费为主转变为动、植物食物并重^[1-2]。食物消费的变化对环境质量也产生了一系列的影响^[3],如食物生产消费过程中 C、N、P 等营养元素的循环变化会引起城市土壤和水体的富营养化^[4-5]。

人类通过食物生产消费向生态环境排放的过量氮素已经成为全球面临的重大环境问题之一^[6-9]。城市居民由食物消费驱动而导致的食物氮素来源和数量发生了改变^[10],氮素随着食物生产和消费而流动,其流动模式和流量与生态质量密切相关^[11-13]。研究城市发展过程中食物氮消费的变化有利于把握城市氮素流动特点和规律,为城市氮素管理提供参考和依据,促进城市的健康发展^[14-17]。

近年来,国内外已经有很多学者从食物生产消费的角度研究了氮素流动变化情况。总体来说国外的研究大部分从食物生产和食物消费过程中的某一环节进行研究^[9,18-21],如 Galloway 的研究指出亚洲粮食生产中活性氮产量位居世界首位,是欧洲粮食生产产生的活性氮量的近两倍^[18];也有学者定量研究食物生产和餐余垃圾带来的氮环境负荷,发现食物生产消费过程中所带来的氮环境负荷不容小觑^[12-13,22-23]。国内研究主要侧重食物消费系统氮素的流动变化及其环境负荷^[7,10,24],以及从国家和区域尺度分析食物链氮素养分流动变化^[25-27],对城市化过程中食物生产和消费系统氮素流动变化研究较少。本研究以南京市农村和城镇居民为研究对象,分析 1995—2012 年南京市食物生产消费过程中氮素的流动和影响因素,为居民合理膳食、减少食物氮素消费提供科学依据,进而促进南京市的可持续发展。

1 研究区概况

南京市位于长江下游中部富庶地区,江苏省西南部。地理坐标为 32°02'43"N、118°46'43"E。全市行政区域总面积 6587.02 km²,2013 年国务院批复南京调整区划,调整后,南京市辖玄武、秦淮、建邺、鼓楼、雨花台、栖霞、江宁、浦口、六合、溧水、高淳 11 个区,共有 81 个街道、19 个镇。

随着经济的平稳快速发展,南京市常住人口也不断增加,2012 年达到 816.1 万人口^[28]。城市人均可支配收入由 1990 年的 1591 元增长到 2012 年的 36322 元,同时,人均食物消费支出占生活消费支出的比重由 1990 年的 60.1% 下降到 2012 年的 34.7%^[29]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本研究所需要的南京市人口数量和各类食物生产量、消费量等基础数据来源于 1996—2013 年的南京统

计年鉴和 2003—2013 年的江苏省统计年鉴。不同食物中的蛋白质含量来源于常见食物营养成分表^[30],并将蛋白质按 16%折算出氮的含量^[7],不同食物的含氮量如表 1 所示。食物链氮素输入输出及循环过程中所需参数来源于文献资料^[31-41],见表 2。另外,由于外出就餐数据较难搜集,故本研究中不包括外出就餐量。

表 1 不同食物含氮量 %

Table 1 Nitrogen content in food

种类 Items	粮食 Cereals	植物油 Plant Oil	蔬菜 Vegetable	猪肉 Pork	牛羊肉 Flocks and herds	蛋类 Egg
氮含量 Nitrogen content/%	1.55	0.32	0.30	2.45	2.83	2.06
种类 Items	水产品 Aquatic product	水果 Fruit	糕点 Cake	酸奶 Milk	豆制品 Soya product	家禽 Poultry
氮含量 Nitrogen content /%	2.18	0.19	0.19	0.53	0.11	2.99

表 2 氮素流动过程中主要参数

Table 2 The main parameters during nitrogen flow

项目 Items	数值 Numerical	资料来源 Reference
固氮因子 Nitrogen fixation factor	豆科作物(豆类、花生) Soybean/(kg/hm ²)	165 [31-32]
	水稻 Rice/(kg/hm ²)	25
	甘蔗 Sugarcan/(kg/hm ²)	35
	其他 Other/(kg/hm ²)	12.5
大气沉降 Deposition	22.7	[33-34]
灌溉水 Irrigation	13	[33,35]
有机肥 Organic fertilizer	秸秆还田率 Straw to field/%	30 [36]
	粪尿还田率 Manure to field/%	45 [33,37]
饲料 Feed	秸秆饲料率 Straw for feed/%	5 [38]
	餐余饲料率 Meals for feed%	70 [39-41]

2.2 食物链氮流动过程中通量计算

食物链包括食物生产系统、消费系统以及食物生产消费过程中进入循环的部分,具体分为 4 部分:植物性食物生产、动物性食物生产、家庭消费和废弃物(包括作物秸秆、人畜粪便及生活垃圾)。本文采用物质流分析法对食物链中氮素流动的途径和通量进行分析,食物链氮素流动模型如图 1 所示,氮的投入包括(1)生物固氮,(2)大气沉降和灌溉,(3)肥料,(4)饲料,和(5)进口食物;氮的输出包括(6)氨挥发,(7)反硝化产生的 N₂O 和 N₂,和(8)淋洗、流失;各部分间氮素的流动过程主要包括(10)作物生产提供家庭消费,(11)秸秆作为畜禽饲料,(12)动物生产提供家庭消费,(13)未被利用的秸秆,(14)畜禽粪便,(15)人粪尿及餐余垃圾,(16)粪尿、秸秆还田,(17)餐余垃圾作为饲料;其中(9)外系统累计是指未被利用的废弃物。由于籽粒具体去向数据无法搜集,本文中籽粒除了供给居民食用,其余均按出口计算。主要计算公式为:

$$\text{进口饲料含氮量} = \text{饲料氮消费量} - \text{饲料氮生产量}$$

$$\text{饲料氮生产量} = \text{秸秆饲料氮} + \text{餐余饲料氮}$$

$$\text{进口食物含氮量} = \text{食物氮消费量} - \text{食物氮生产量}$$

$$\text{外系统累计氮量} = \text{氮输入量} - \text{氮输出量} - \text{废弃物氮循环量}$$

$$\text{食物中氮消费量} = \text{食物 1 含氮量} \times \text{食物 1 消费量} + \text{食物 2 含氮量} \times \text{食物 2 消费量} + \dots + \text{食物 } n \text{ 含氮量} \times \text{食物 } n \text{ 消费量}$$

其中,1,2,……,n 指居民消费的各类食物,各食物含氮量如表 1 所示。

3 结果与讨论

3.1 南京市食物氮生产消费变化

南京市 1995—2012 年动植物食品生产消费情况如图 2 所示。植物性食物氮收获量虽然有些波动减少,

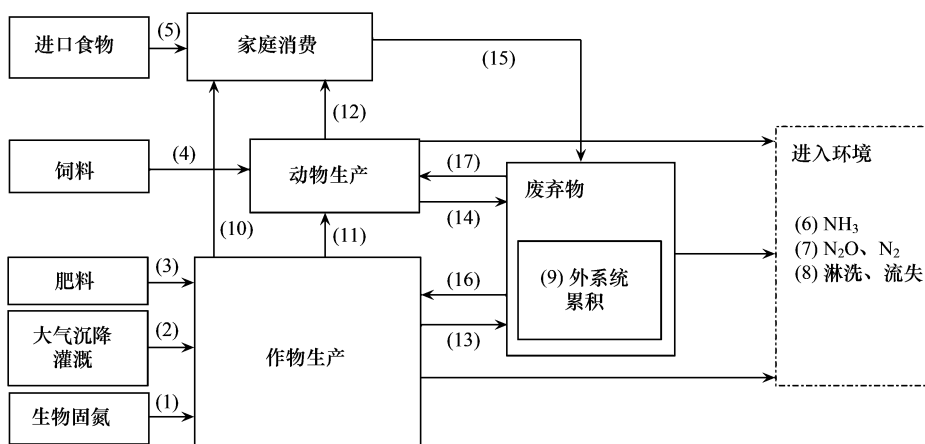


图1 食物生产消费氮流动模型

Fig.1 The nitrogen flow in food production and consumption

其始终大于食物氮消费量;畜禽类食物氮收获量在 2003 年达到最大值 7.96 GgN/a 后持续减少,其消费量显著增加,2007 年后需要进口来满足需求;水产品类食品氮消费量一直攀升,由 1995 年的 1.44 GgN/a 增加至 2012 年的 2.83 GgN/a,增加了近一倍。马林等人对北京市 1978—2008 年食物链中氮的流动进行了研究,北京市 1998—2008 年植物性食物氮和动物性食物氮消费量均显著增加^[24,42],一方面北京市 2008 年城市化率已达到 85%^[24],而南京市 2012 年城市化率为 75.13% (图 3),北京市的城市化水平和人口都高于南京,另一方面,由于南方和北方食物消费习惯的差异,南京市人均植物性食物氮消费量低于北京市。

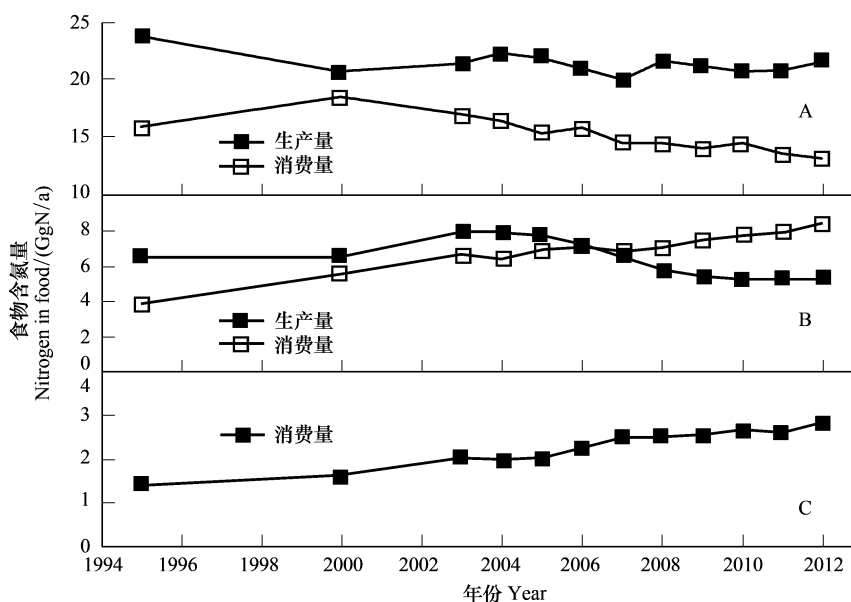


图2 南京市动植物食品生产消费变化

Fig.2 Changes in total production and consumption in Nanjing during the period 1995 to 2012

图 A 为植物性食物氮生产量与消费量变化,图 B 为畜禽食物氮生产量与消费量变化,图 C 为水产品氮消费量变化

南京市人均食物氮消费量呈现出下降趋势,其中人均植物性食物氮消费量一直减少,而人均动物性食物氮消费量逐年增加,其增加幅度远小于植物性食物氮消费量的减少幅度。农村人均食物氮消费量在 1995—2000 年间呈波动增加,2000 年达到最高值 6.34 kg 人⁻¹ a⁻¹,随后年份呈现不同程度下降,到 2012 年降至 4.11 kg 人⁻¹ a⁻¹;城镇人均食物消费量一直处于下降趋势,到 2012 年下降至 2.65 kg 人⁻¹ a⁻¹(表 3),基于以往研究结果,南京市居民食物消费进入第二个阶段,即数量型阶段^[43-44]。表 5 对相关研究结果进行了比较,魏静等人

的研究结果显示 1982—2002 年中国农村和城镇居民人均食物氮消费量变化趋势并不相同^[10];王俊能等人指出 1981—2007 年中国城镇居民人均食物氮消费量总体呈不显著的上升趋势^[11];2012 年闫祯等人对厦门市 1998—2010 年居民食物 N 消费动态进行了研究,结果显示厦门市人均食物氮消费量的变化趋势与南京市的变化趋势一致^[4];2014 年马林等人对北京市 1978—2008 年食物链中氮流动的研究表明,人均食物氮消费量逐年增加^[24];国外也有类似的研究,Riina 等的研究结果表明芬兰在 1995—1999 年人均食物氮消费量平均值已经达到 $6.5 \text{ kg 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$;Barles 指出巴黎十九世纪人均食物氮消费量的平均水平为 $6.57 \text{ kg 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。以上研究结果对比可见,一方面,人均食物氮消费量可能受城乡差异的影响,另一方面,不同城市受经济发展的影响,食物消费阶段及食物消费结构可能不同,从而导致人均食物氮消费量变化趋势不同。

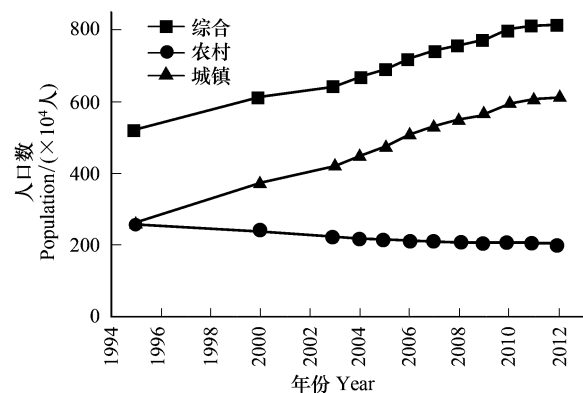


图3 南京市 1995—2012 年常住人口变化

Fig.3 Resident population of Nanjing from 1995 to 2012

表3 食物链氮素利用率的主要指标

Table 3 Nutrient use indicators for food chain

项目 Items	指标 Indicator	1995	2000	2005	2010	2012
利用率/% Utilization	农田+畜禽	18.71	16.45	18.33	23.13	24.34
	农田	25.67	20.38	24.57	31.47	34.44
	畜禽	9.44	10.26	10.67	11.25	11.14
	食物氮消费代价	8.40	7.08	7.31	5.06	5.10
百分比指标/% Percentage indicators	农村动物性食物消费比例	18.53	17.85	27.44	29.36	33.76
	城镇动物性食物消费比例	35.72	42.63	44.71	49.59	52.47
	进口食物饲料比例	36.23	35.27	38.31	34.31	33.94
	循环利用率	17.32	15.51	16.98	21.22	21.98
人均指标/(kgN/a) Per capita index	农村人均植物食品氮消费	4.15	5.21	3.64	3.20	2.72
	农村人均动物食品氮消费	0.94	1.13	1.37	1.33	1.39
	农村人均食物氮消费量	5.09	6.34	5.01	4.53	4.11
	城镇人均植物食品氮消费	1.95	1.62	1.57	1.32	1.26
	城镇人均动物食品氮消费	1.08	1.21	1.27	1.30	1.39
	城镇人均食物氮消费量	3.03	2.83	2.84	2.62	2.65
单位播种面积指标/(kgN/hm ²) Indicators of unit agricultural land	新氮投入	219.75	227.06	221.32	193.51	190.17
	土壤累计	75.45	77.12	74.69	71.41	70.36

表4 相关研究结果比较

Table 4 Relative research comparison

区域 Study area	年份 Year	人均食物氮消费量 (kgN/a) Amount of per capita nitrogen consumption		食物氮消费总量 (万 t) Amount of total nitrogen consumption		资料来源 Reference
		城镇 Urban	农村 Rural	城镇 Urban	农村 Rural	
		中国 Chinese	1982	4.632	4.604	
	1992	4.965	159.74	369.69		
	2002	4.770	4.314	239.51	337.53	
中国城镇 Urban of China	1981—2007	趋势: 上升—下降—上升, 体不显著的上升		—		[1]

续表

区域 Study area	年份 Year	人均食物氮消费量(kgN/a) Amount of per capita nitrogen consumption		食物氮消费总量(万 t) Amount of total nitrogen consumption		资料来源 Reference
		城镇 Urban	农村 Rural	城镇 Urban	农村 Rural	
		北京 Beijing	1978—2008	5.0—6.6		
厦门 Xiamen	1988—2009	2000 年之前 3.29 2000 年之后 4.00		0.54—1.50		[7]
厦门 Xiamen	1988—2010	4.13—3.44		0.64—1.21		[4]
厦门 Xiamen	1991—2010	—		0.6—1.26		[3]
芬兰 Finnish	1995—1999	平均 6.5		平均 3.34		[45]
巴黎 Paris	1801—1914	6.57		0.4—1.8		[21]

3.2 食物链中氮素的输入和输出

食物链氮素的输入主要包括肥料、进口饲料和进口食物。1995 年南京市食物链氮的总输入为 162.48 GgN/a, 随后波动下降至 2012 年的 116.42 GgN/a, 期间 2003 年达到了最大值 172.25 GgN/a(图 4)。与 1995 年相比, 2012 年单位播种面积氮的投入量减少了 13.46%。南京市进口食物和饲料氮占食物链氮素输入总量的比例由 1995 年的 36.55% 下降至 2012 年的 34.78%(其中 2007 年之前不需要食物进口, 进口食物氮量按零计算)(表 3), 一方面, 畜禽养殖规模的减小导致进口饲料氮减少, 另一方面, 2007 年起畜禽食品需要进口, 并逐年增加, 到 2012 年畜禽食品氮素进口量达到 3.17 GgN/a(表 5), 然而进口饲料氮的减少量大于进口畜禽食物氮的增加量。由于水产品养殖数据缺失, 故食物链氮素的总投入量计算值偏小。

本研究中食物链氮素主要是通过氨挥发、反硝化及径流、淋洗进入环境, 部分循环进入食物链(如粪尿还田、秸秆还田、秸秆饲料化、厨余饲料化), 其余部分无法具体确定去向, 假设全部进入外系统累积(表 5)。农田单位播种面积氮素累积量呈现波动性的减少, 2000 年达到最大值 77.12 kgN/hm²; 废弃物氮循环进入食物链由 1995 年的 27.96 GgN/a 波动减少至 2012 年的 24.72 GgN/a, 这主要是由畜禽养殖规模的变化引起的(表 3, 表 5)。

3.3 食物链中氮素的利用效率

由表 3 可知, 1995—2000 年南京市农田系统氮素利用率从 25.67% 下降至 20.38%, 随后一直攀升, 到 2012 年增加至 34.44%; 畜禽养殖系统氮素利用率从 1995 年的 9.44% 持续增加, 2012 年达到 11.14%; 农田系统和畜禽养殖系统氮素的综合利用效率呈先下降后上升的趋势, 其值整体低于农田系统的氮素利用率, 高于畜禽养殖系统的氮素利用率, 这主要是受畜禽粪便还田量减少的影响。南京市 2005 年农田系统和畜禽养殖系统氮素的综合利用率为 18.33%, 低于中国的平均值 27%^[46]。南京市的食物氮消费代价由 1995 年的 8.40 kgN/kg 下降至 2012 年的 5.10 kgN/kg, 这主要是因为随着城市化的发展, 南京市农田面积及畜禽养殖规模减小, 食物生产量由自给自足转变为供不应求, 需要大量进口, 故食物消费代价呈下降趋势。北京市从 1978 年到 2008 年食物氮消费代价一直维持在 2.5—4.5 kgN/kg^[24], 中国 2005 年食物氮消费代价平均值为 11 kgN/kg^[25], 南京市城市化水平低于北京市, 进口食物和饲料量远远低于北京市, 故其食物氮消费代价高于北京市。

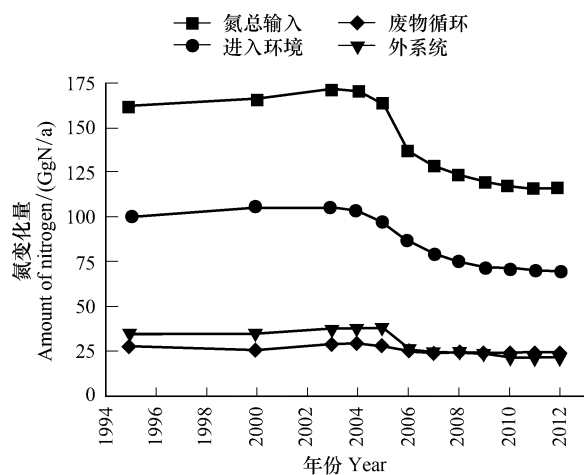


图 4 南京市 1995—2012 年食物链氮素的输入输出变化
Fig. 4 Changes in total N inputs and outputs in Nanjing during the period 1995 to 2012

表 5 南京市 1995、2000、2005、2010、2012 年食物链氮素的输入和输出

Table 5 Total N inputs and outputs in the food chain in Nanjing in 1995, 2000, 2005, 2010 and 2012

项目 Items	指标 Indicator	1995	2000	2005	2010	2012
输入 Input / (GgN/a)	生物固氮	9.01	9.83	8.01	6.70	6.58
	大气沉降	9.50	10.09	9.11	7.61	7.24
	灌溉水	5.44	5.78	5.22	4.36	4.28
	种子	0.84	0.52	0.36	0.46	0.47
	肥料	67.17	74.72	66.11	45.75	43.98
	饲料	58.56	58.75	62.53	37.65	36.34
	进口食物	—	—	—	2.51	3.17
	水产品	1.44	1.64	2.06	2.67	2.83
	总量	162.48	166.55	163.23	117.07	116.42
输出 Output / (GgN/a)	NH ₃	31.53	32.79	30.41	22.65	22.21
	N ₂ O	1.13	1.19	1.10	0.81	0.79
	淋洗	14.53	15.31	14.04	10.31	10.06
	径流	1.97	2.18	1.92	1.34	1.29
	N ₂	51.32	54.10	49.61	36.41	35.56
	循环进入食物链	27.96	25.80	27.96	24.16	24.72
	外系统累积	34.03	35.16	38.18	21.40	21.80
	总量	162.48	166.55	163.23	117.07	116.42
	循环 / (GgN/a)	植物性食物	15.85	18.49	15.32	14.46
Recycling	秸秆饲料	0.90	0.75	0.95	0.87	0.92
	畜禽类食物	3.86	5.58	6.94	5.29	5.33
	未被利用的秸秆	5.05	4.22	5.33	4.85	5.13
	畜禽粪便	28.08	23.56	23.58	14.61	14.79
	人粪尿及餐余垃圾	19.17	23.30	22.05	22.59	22.26
	粪尿、秸秆还田	24.66	22.14	24.26	20.47	21.02
	餐余饲料	2.40	2.91	2.76	2.82	2.78

3.4 食物链中氮素的环境负荷

由图 4 可知,1995—2012 年南京市食物链引起氮素的环境负荷呈现出波动下降的趋势,1995 年食物链引起氮素的环境负荷为 100.49 GgN/a,到 2012 年下降至 69.90 GgN/a,下降了 30.44%,导致这一变化的主要原因是城市化发展使南京市农田播种面积和畜禽养殖面积减小,食物链氮素的总输入随之减少,加之农田和畜禽养殖系统氮素利用率的增加。马林等人认为北京市 1978—2008 年食物链引起的氮环境负荷呈增加趋势^[24],这主要是因为北京市的常住人口急剧增加,且远远大于南京市,导致其进口食物大幅度增加,其环境负荷主要来自食物消费过程。由此可见,城市化对食物链引起的氮环境负荷有双重影响,一定的城市化水平有利于降低食物生产过程对城市化地区带来的环境负荷,然而城市化水平过高会引起大量食物进口,不仅会使城市化地区食物消费氮产生的环境负荷增加,食物生产地需大量生产食物供给,其生产过程中也会给本地带来大量的氮环境负荷。

食物生产消费过程中所产生的氮环境负荷主要来自化肥施用、人畜粪尿以及餐余垃圾。从南京市食物生产系统看,农田播种面积的减少以及化肥利用率的提高,使南京市化肥投入有所减少,但与国家农田氮素利用率相比,南京市农田氮素利用率相对较低,有研究表明合理的对策可以使农田氮素利用率达到 60%—80%,如优化氮肥管理、控释/缓释肥料等^[47-49]。食物消费过程中,氮环境负荷一方面是来自餐余垃圾,人口的流动使城镇人口剧增,进而导致餐余垃圾的不断增多,餐余垃圾的处理是造成南京市氮环境负荷的重要部分,因此减少餐余垃圾量和资源化利用是降低南京市氮环境负荷的重要途径,另一方面氮素进入人体后只有 2%被人体吸收,大部分通过粪尿排出^[50],提高城镇污水处理率可以减少这些氮素直接进入水体和大气而造成氮环境

负荷。

4 结论

本文通过统计数据、调研数据、文献资料,运用物质流分析法对南京市 1995—2012 年食物链氮素流动情况及其环境负荷进行了综合分析,结论如下:

(1) 由于城市化水平的提高,南京市食物消费由生存型阶段进入数量型阶段,食物消费结构发生了一定的变化,由植物性食物为主转化为植物动物性食物并重,与 1995 年相比,农村居民和城镇居民 2012 年人均食物氮消费量明显减少,即在食物消费过程中,平均每个人所消费的氮有所减少。

(2) 城市化的不断发展使耕地面积和畜禽养殖规模大幅度减小,从而是农田系统和畜禽养殖系统的氮投入减少,另外,南京市人口不断增多,改变了南京市食物自供自给的状态,部分食物需要进口,因而使食物氮消费成本相对降低。

(3) 城市化过程中一部分农村人口流动到城镇,减少了食物生产系统氮投入,但食物生产系统氮素利用率远远低于全国平均水平,提高氮素利用率可以进一步减少由食物生产系统带来的氮环境负荷。

(4) 南京市目前的城市化水平处于部分食物需要进口的状态,这使南京市食物链氮素的总投入有所减少,但随着城市化水平越来越高,会需要大量的食物进口,食物消费阶段也将从数量型阶段进入质量型阶段,人均食物氮消费量可能会像北京市一样呈上升趋势,而大量的食物进口也会使食物生产地的氮投入增加,从而导致食物生产地的氮环境负荷增加,因此城市化对食物链引起的氮环境负荷有双重影响,一定的城市化程度有利于城市化地区的发展。

参考文献 (References):

- [1] 王俊能,许振成,彭晓春. 中国城镇居民食物氮消费变化分析. 安徽农业科学, 2010, 38(19): 10332-10334.
- [2] 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来. 厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷. 环境科学, 2013, 34(4): 1636-1644.
- [3] 王进,齐涛. 食物源 CNP 的城市代谢特征分析——以厦门市为例. 生态学报, 2014, 34(21): 6366-6378.
- [4] 闫祯,崔胜辉,王慧娜,于洋,徐礼来. 厦门快速城市化中居民食物 C、N、P 消费动态. 环境科学与技术, 2012, 35(61): 479-486.
- [5] 方华,莫江明. 活性氮增加: 一个威胁环境的问题. 生态环境, 2006, 15(1): 164-168.
- [6] Smil V. 氮和食物生产: 人类饮食中的蛋白质. AMBIO-人类环境杂志, 2002, 31(2): 126-131.
- [7] 于洋,崔胜辉,赵胜男,孟凡鑫,李飞. 城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(19): 5953-5961.
- [8] Shindo J, Okamoto K, Kawashima H, Konohira E. Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005. Soil Science & Plant Nutrition, 2009, 55(4): 532-545.
- [9] Shindo J, Okamoto K, Kawashima H. A model-based estimation of nitrogen flow in the food production-supply system and its environmental effects in East Asia. Ecological Modelling, 2003, 169(1): 197-212.
- [10] 魏静,马林,路光,马文奇,李建辉,赵路. 城镇化对我国食物消费系统氮素流动及循环利用的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1016-1025.
- [11] 李玉炫,王俊能,许振成,张志军. 广州食物氮足迹估算与分析. 广东农业科学, 2012, 39(6): 137-140.
- [12] Grizzetti B, Pretato U, Lassaletta L, Billen G, Garnier J. The contribution of food waste to global and European nitrogen pollution. Environment Science & Policy, 2013, 33: 186-195.
- [13] Lassaletta L, Billen G, Grizzetti B, Garnier J, Leach A M, Galloway J N. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. Biogeochemistry, 2014, 118(1): 225-241.
- [14] 于洋. 厦门市居民食物氮消费及其环境负荷研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [15] 魏静,马林,杨玉荣,马文奇,路光,赵路. 城镇化对我国食物消费系统氮素水体排放的影响. 生态学报, 2009, 29(11): 6035-6041.
- [16] 王慧娜,赵小锋,唐立娜,崔胜辉,李桂林. 城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例. 生态学报, 2013, 33(14): 4495-4504.
- [17] 秦树平,胡春胜,张玉铭,王玉英,董文旭,李晓欣. 氮足迹研究进展. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 462-467.
- [18] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl

- D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöösmary C J. Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [19] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, Yan X D, Huang Y, Han S H, Hu F, Chen G X. The asian nitrogen cycle case study. *Ambio*, 2002, 31(2): 79-87.
- [20] Stevens C J, Leach A M, Dale S, Galloway J N. Personal nitrogen footprint tool for the United Kingdom. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2014, 16(7): 1563-1569.
- [21] Barles S. Feeding the city: food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801—1914. *Science of the Total Environment*, 2007, 375(1/3): 48-58.
- [22] Asmala E, Saikku L, Vienonen S. Import-export balance of nitrogen and phosphorus in food, fodder and fertilizers in the Baltic Sea drainage area. *Science of The Total Environment*, 2011, 409(23): 4917-4922.
- [23] Shukla B D, Misra A K, Gupta P K. Application of nitrogen in production and post-production systems of agriculture and its effect on environment in India. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1): 115-122.
- [24] Ma L, Guo J H, Velthof G L, Li Y M, Chen Q, Ma W Q, Oenema O, Zhang F S. Impacts of urban expansion on nitrogen and phosphorus flows in the food system of Beijing from 1978 to 2008. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 192-204.
- [25] Ma L, Ma W Q, Velthof G L, Wang F H, Qin W, Zhang F S, Oenema O. Modeling nutrient flows in the food chain of China. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1279-1289.
- [26] 谢勇, 荣湘民. 食物链氮素养分流动研究进展. *湖南农业科学*, 2014, (11): 42-45.
- [27] 高利伟. 食物链氮素养分流动评价研究-以黄淮海地区为例[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- [28] 江苏省统计局. 江苏省统计年鉴(2003-2013). 北京: 中国统计出版社, 2003-2013.
- [29] 南京市统计局. 南京市统计年鉴(1991-2012). 北京: 中国统计出版社, 1991-2013.
- [30] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物营分表. 北京: 北京大学医学出版社, 2002.
- [31] 向荣燕, 谢标, 秦俊, 李婧, 王延华. 中国农业生态系统生物固氮量的时空分布. *湖北农业科学*, 2013, 52(18): 4333-4336.
- [32] Smil V. Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1999, 13(2): 647-662.
- [33] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [34] 谢迎新, 张淑利, 赵旭, 熊正琴, 邢光熹. 长江三角洲地区雨水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\delta^{15}\text{NH}_4^+$ 值的变化. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 2035-2041.
- [35] 张静, 王德建, 王灿. 苏南平原稻田灌排水系统中氮磷平衡状况. *土壤学报*, 2008, 45(4): 657-662.
- [36] 冯蕾, 王效华. 江苏省农作物秸秆资源量的灰色预测. *能源研究与利用*, 2010, (4): 1-3.
- [37] 杨帆, 李荣, 崔勇, 段英华, 等. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议. *中国土壤与肥料*, 2010, (4): 77-82.
- [38] 谢海燕, 周玉新. 江苏省农作物秸秆资源化利用及产业化发展研究. *安徽农业科学*, 2013, 41(7): 3105-3108.
- [39] 胡贵平, 杨万, 张广裕. 国内主要城市厨余垃圾处理进展. *城市管理与技术*, 2006, 8(6): 267-208, 272-272.
- [40] 王庆华, 安艳玲, 尚佰晓. 小型餐饮点餐厨垃圾调查及资源化难点分析——以贵阳市为例. *环境科学与技术*, 2013, 36(11): 153-157.
- [41] 潘洋, 李慧明. 天津市餐厨垃圾回收现状与对策. *再生资源与循环经济*, 2011, 4(8): 20-24.
- [42] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 郑华. 北京城市化进程中家庭食物碳消费动态. *生态学报*, 2005, 25(12): 3252-3258.
- [43] Casani S, Rouhany M, Knehel S. A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry. *Water Research*, 2005, 39(6): 1134-1146.
- [44] Gao W Z, Zhu H J, Chen S L. Impacts of urbanization on topsoil nutrient balances—a case study at a provincial scale from Fujian, China. *Catena*, 2007, 69(1): 36-43.
- [45] Antikainen R, Lemola R, Nousiainen J I, Sokka L, Esala M, Huhtanen P, Reikola S. Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2/3): 287-305.
- [46] Ma L, Velthof G L, Wang F H, Qin W, Zhang W F, Liu Z, Zhang Y, Wei J, Lesschen J P, Ma W Q, Oenema O, Zhang F S. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005. *Science of the Total Environment*, 2012, 434: 51-61.
- [47] 葛鑫, 戴其根, 霍中洋, 孟立明, 许轲. 农田氮素流失对环境的污染现状及防治对策. *环境科学与技术*, 2003, 26(6): 53-57.
- [48] Dushenkov V, Kumar P B A N, Motto H, Raskin I. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(5): 1239-1245.
- [49] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 黄庆, 魏岚. 农田氮素流失对水环境污染及防治研究进展. *广州环境科学*, 2007, 22(1): 5-10.
- [50] Forkes J. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 52(1): 74-94.