

DOI: 10.5846/stxb201411042165

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. 生态学报, 2016, 36(8): - .

Xian C F, Ouyang Z Y. Calculation and dynamic analysis of the food nitrogen footprints of urban and rural residents in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

城乡居民食物氮足迹估算及其动态分析 ——以北京市为例

洗超凡^{1,2}, 欧阳志云^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 氮足迹作为一种评价氮排放影响的新兴测度方法, 已被用来衡量人类活动造成的环境影响。食物消费是城市营养元素流动的重要环节, 其产生的氮足迹反应维持一个城市人口的基本食物需求的活性氮排放以及对周边环境的影响。本文以北京市为例, 基于 N-Calculator 模型的基础上, 估算了 1980—2012 年居民食物氮足迹, 分析其变化特点及其与经济社会因素之间的关系。结果表明: 北京市居民人均食物氮足迹变化与食物消费量变化趋势相似, 城镇居民氮足迹呈持续增长后渐趋平稳, 在 14.69—22.58 kg(N)/年之间波动, 平均为 17.78 kg(N)/年, 接近发达国家水平; 农村居民氮足迹呈小幅减少趋势, 在 10.81—15.28 kg(N)/年之间波动, 平均为 12.72 kg(N)/年。其中, 高氮含量食物在城乡居民人均食物氮足迹中所占比例都有所增加, 以肉类为主的荤食比例分别由 27% 和 10% 上升至 41% 和 31%; 以奶类为主的副食比例由 7% 和 1% 上升至 18% 和 13%。城镇居民食物氮足迹与人均可支配收入呈正相关, 与恩格尔系数和平均家庭人口数呈负相关, 而农村居民食物氮足迹与各因子的相关关系则与前者相反。此外, 北京市食物氮足迹总体呈增长趋势, 年均增加约 8066 t(N)/年。城镇居民当前的饮食消费模式不利于减缓北京区域食物氮足迹高通量的剧增趋势, 更多的农村及外来人口进入城镇将加速区域氮足迹增长。食物氮足迹的估算能为居民改变高氮消费模式提供参考, 进而促进城市的低氮发展。

关键词: 城乡居民; 食物消费; 氮足迹; 氮计算模型; 北京市

Calculation and dynamic analysis of the food nitrogen footprints of urban and rural residents in Beijing

XIAN Chaofan^{1,2}, OUYANG Zhiyun^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The impact of nitrogen emission was assessed using 'nitrogen footprints' to determine the effect of human activities on the environment. With rapid urbanization in China, city residents are playing increasingly important roles in the alteration of nutrient flow. Food consumption, as an important process of urban nutrient metabolism, is an important driver of environmental pollution in cities. The food nitrogen footprints of residents reflect reactive nitrogen emissions impacting the surroundings to feed the whole population of a city. Taking Beijing city as a case study, the food nitrogen footprints of residents from 1980—2012 were calculated based on the N-Calculator model. Meanwhile, the characteristic trends and associated economic and social factors were analyzed. The results showed that changes of food nitrogen footprints per capita of Beijing residents were consistent with changes of food consumption per capita. The food nitrogen footprints of urban

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41030744)

收稿日期: 2014-11-04; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

residents increased from 1980 to 2002 and then remained between 14.69—22.58 kg (N) per capita per year. The average nitrogen footprint during the study period was 17.78 kg (N) per capita per year, which was similar to the nitrogen footprint of residents in developed countries. The food nitrogen footprints of rural residents, decreased slightly from 1982 to 2012, and then remained between 10.81—15.28 kg (N) per capita per year with 12.72 kg (N) per capita per year as the average. Meanwhile, the proportions of food with high nitrogen contents increased in the food nitrogen footprints of both urban and rural residents. Food with high animal meat contents increased from 27—41% and 10—31%, for urban and rural residents, respectively. Subsidiary food with high dairy contents also increased from 7—18% and 1—13% for urban and rural residents, respectively. The food nitrogen footprint of urban residents was positively correlated with per capita disposable income. Meanwhile, there were negative correlations between Engel's coefficient, the average number of family members, and food nitrogen footprints per capita. The correlations between the food nitrogen footprints of rural residents and the socio-economic driving factors were contrary to those of urban residents. The food nitrogen footprints of rural residents were negatively correlated with per capita disposable incomes, and positively correlated with Engel's coefficient and the average number of family members. During the study period, the food nitrogen footprints of Beijing residents increased 8,066 t (N) on an average per year. Current food consumption patterns of urban residents contributed to the increasing food nitrogen footprints of the city, accelerated by rural and external population immigration. Calculation of food nitrogen footprints can provide theoretical support for residents to change their high nitrogen consumption patterns, contributing to the low nitrogen development of cities.

Key Words: urban and rural residents; food consumption; nitrogen footprint; N-Calculator; Beijing

居民生活消费是城市营养元素代谢的主要驱动力,而食物消费是生活消费的重要组成部分^[1-2]。随着社会发展和经济水平的提高,人们的食物消费需求不断增长,食物消费模式和饮食偏好也随之发生改变。伴随着食物的生产和消费,营养元素氮通过食物链在城市中流动,但是,其中能被人类有效吸收利用的部分只占小比例,大部分氮素都在生产过程中流失到环境,同时城市相对高的食物需求也驱动着城郊地区高通量的食物氮生产,增加了区域氮负荷量^[3]。相关研究发现,素食或肉食饮食方式能提供给人类的蛋白质中氮量仅为生产投入的 20%,即生产过程中绝大部分氮素都排放到环境^[4],过量的氮素累积易导致酸雨、光化学烟雾和水体富营养化等环境问题^[3],故城市居民食物消费是氮污染产生的主要源头之一。

氮足迹是继生态足迹、碳足迹、水足迹等足迹研究后又一研究热点^[5],其可以定量评价人类生产与生活方式对氮素排放的影响。氮足迹定义可借鉴碳足迹的概念理解为:产品或服务在其生产、运输、储存以及消费过程中直接或间接排放的活化氮总和^[6]。在 2010 年末,Leach 等^[7]开发了用于计算个人、家庭以及国家氮足迹的在线模型(N-Calculator, <http://n-print.org>),目前该模型能估算出美国、德国、荷兰和英国的人均氮足迹,年均值分别约为 38.0、23.6、23.0 和 27.1 kg,其中食物氮占有很大比例,分别占总氮足迹的 73%、72%、88% 和 85%^[8-9]。由此可见,个人食物氮足迹的减少是减轻城市氮代谢包袱的重要一部分^[10]。虽然此模型目前不能直接用于估算中国的个人氮足迹,但可借鉴其计算框架来初步估算中国城市个人氮足迹。北京是我国的首都,是政治、文化和国际交流中心,作为世界上人口高度密集的城市之一,北京市人口的快速增长和城市化的迅速发展导致氮素需求量增大。本文以城市个人氮代谢为基本思想,分别从北京城镇与农村居民食物氮素消费的角度初步分析了 1980—2012 年北京市发展过程中居民食物氮足迹的动态变化情况,为探讨城市发展与居民食物消费氮排放的关系提供依据。

1 研究方法

1.1 数据来源

本文的研究数据主要来自 1980—2013 年的《北京市统计年鉴》^[11]与《北京六十年》统计报告^[12]。由于

1999年后北京市城镇居民人均食物消费量数据缺乏,故采用年鉴“千户城镇居民家庭平均每人年购买食品支出”中的购买食物支出除以当年各类食物价格得到。2000—2012年居民购买各类食物的价格,采用《2013中国价格统计年鉴》^[13]中2012年北京市食物12个月份平均价格数据,并利用历年《北京市统计年鉴》中的居民消费价格分类指数推算得到。其中,某些年份居民奶类消费量数据缺乏,本文默认农村居民1985年前人均奶类年消费量为1985年消费水平,因早年农民奶类消费量极少且变化幅度不大^[14],而1999年后城镇居民人均奶类消费量统视为当年北京农村居民的4.6倍^[15]。由于居民外出就餐数据难以获取,因此,本研究只针对居民家庭的食物消费,不包括外出就餐。不同食物的氮含量参数来源于相关文献。

1.2 食物氮足迹计算方法

本研究过程中考虑的北京市居民食物氮足迹包含食物整个生命周期过程(生产—初加工—运输—再加工—食用消耗)中的氮排放,借鉴N-Calculator氮计算模型的主要框架来测算北京市食物氮足迹(图1)。食物氮足迹(*Total Food Nitrogen Footprint, FP_T*)主要包括食物消费氮足迹(*Food Consumption Nitrogen Footprint, FP_C*)和食物生产氮足迹(*Food Production Nitrogen Footprint, FP_P*),即:

$$FPT = FPC + FPP \quad (1)$$

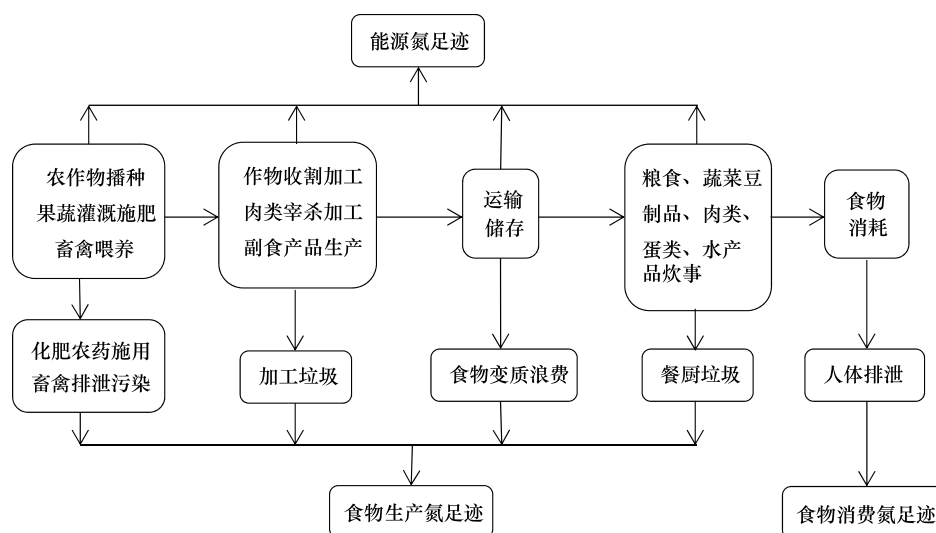


图1 食物生命周期过程中的氮足迹

Fig. 1 Nitrogen footprint during the food life cycle

食物消费氮足迹(即食物氮消费量)的计算需要人均食物消费量和食物氮含量两个参数。本文计算中,默认食物消费摄入成年人体内的氮素全部最终以粪尿氮的形式,经各种渠道最终排入环境中^[7]。北京市居民主要消费的素食、荤食与副食等食物主要包括粮食、蔬菜、瓜果、畜肉类(猪肉为主)、禽肉类、水产品、蛋类、奶类和豆制品,因豆制品占食物消费总量比例低且缺失相关数据,故其氮消费予以忽略。不同食物氮含量见表1^[9,16]。

食物生产氮足迹可视为虚拟氮(*Virtual N*),这指的是在食物生产过程中产生的而不用于人类直接消费的那部分氮,包括农田氮肥施用、畜禽喂养和食物处理加

表1 不同食物的氮含量与虚拟氮因子

Table 1 Nitrogen content and the virtual N factors in food

种类 Item	氮含量 Nitrogen content/(g/kg)	虚拟氮因子 Virtual N Factor
粮食 Grain	14.40	1.4
蔬菜 Vegetable	1.76	10.6
瓜果 Fruit	1.60	10.6
畜肉类 Livestock	29.22	4.7
禽肉类 Poultry	29.90	3.4
水产品 Aquatic Product	28.77	3.0
蛋类 Egg	20.48	3.4
奶类 Dairy	5.28	5.7

工过程中损失的所有氮素。虚拟氮因子在 2012 年最初被用于量化美国居民各类食物消费所导致的额外氮排放,其数据是建立在本国食物生命周期中消费前端涉及的氮流失量的基础上,这类因子数据可适用于食物生产工业化的国家及地区,用来初步估算食物消费前的生产氮足迹,即居民餐桌上消费的每一克氮素都伴随着若干克氮素在消费之前流失到环境。为了明确界限和避免重复计算,虚拟氮的计算一般不包括食物生产过程中涉及的能源消耗所产生的氮流失,而是把这部分流失的氮归于能源氮足迹分开计算^[7],故在本文计算中,虚拟氮不包括食物生产、处理和运输过程中因能源消耗而排放的氮素。因此,可以通过各种食物的虚拟氮与消费氮之间的关系,利用虚拟氮因子(表 1)与食物消费氮足迹相乘求出食物生产氮足迹。

2 结果与分析

2.1 居民食物氮足迹估算

北京市 1980—2012 年居民平均食物氮足迹估算结果如表 2 所示,进入新世纪后,北京市居民荤食和副食食物氮足迹都有所增加,而素食食物氮足迹相应减少。与 1980 年食物氮足迹水平相比,农村居民各类食物氮足迹(除粮食和蔬菜外)增加的幅度都比城镇居民大,但城镇居民历年食物氮足迹平均水平较高。总体来讲,除粮食消费外,1980—2012 年城镇居民人均食物氮足迹比农村居民的大,如畜肉类(2.32 倍)、禽肉类(4.05 倍)、水产品(3.95 倍)、蔬菜(1.44 倍)、瓜果(1.87 倍)、蛋类(1.97 倍)、奶类(5.55 倍)。其差别大的原因可能是城镇居民生活水平较高,饮食习惯一直偏向于营养高的高氮荤食和副食,早年农村地区居民日常食物消费主要以粮食和蔬菜为主,随着农村经济发展,价格较高的荤食和副食食物消费的比例有所增加,但十分有限。北京市个人平均氮足迹分别约为城镇居民 17.78 kg(N)/年和农村居民 12.72 kg(N)/年,随着北京城市化的快速发展,城镇居民人口数量剧增,其食物氮足迹 2012 年上升至 20.02 kg(N)/年,高于德国平均水平 16.99 kg(N)/年,接近荷兰平均水平 20.24 kg(N)/年,说明了北京大部分城镇居民倾向于发达国家的高氮生活模式,对于氮污染防治技术仍需完善的中国来讲,这种生活模式使城市更易受到氮累积过量导致的环境问题的威胁。

表 2 北京市居民年均食物氮足迹

Table 2 The annual food nitrogen footprints of residents in Beijing

食物类别 Food category	城镇居民人均食物氮足迹/kg N Urban food nitrogen footprints per capita			农村居民人均食物氮足迹/kg N Rural food nitrogen footprints per capita		
	1980	2012	1980—2012	1980	2012	1980—2012
荤食 Animal product	4.03	8.29	7.06	1.50	3.62	2.62
畜肉类 Livestock	3.28	5.05	4.71	1.40	2.48	2.03
禽肉类 Poultry	0.12	1.03	0.89	0.01	0.53	0.22
水产品 Aquatic Product	0.63	2.21	1.46	0.09	0.61	0.37
素食 Vegetarian product	9.64	8.2	8.33	13.58	6.46	9.26
粮食 Grain	5.77	2.90	3.48	9.39	3.54	6.04
蔬菜 Vegetable	3.40	4.41	3.97	4.11	2.05	2.75
瓜果 Fruit	0.47	0.89	0.88	0.08	0.87	0.47
副食 Subsidiary food	1.02	3.53	2.39	0.15	1.44	0.84
蛋类 Egg	0.59	1.50	1.28	0.13	1.00	0.65
奶类 Dairy	0.43	2.03	1.11	0.02	0.44	0.19
总量 Total	14.69	20.02	17.78	15.23	11.52	12.72

2.2 居民与区域食物氮足迹变化趋势

北京市 1980—2012 年城乡居民氮足迹一直处于变化动态中(图 2),可以看出,1980 年城镇与农村居民食物氮足迹差别不大,随着食物消费量的变化,食物氮足迹同时也呈现出几乎一致的趋势。通过 Spearman 相关分析可知,两者呈现显著相关性。1980—2012 年城镇居民食物消费量波动增加(主要表现为蔬菜和肉奶类消

费量增加),食物氮足迹随之增大($r=0.912, P=0.000$),在 2002 年达到顶峰 22.58 kg(N)/年;农村居民食物量消费量逐年减少(主要表现为粮食和蔬菜消费量大幅减少),食物氮足迹相应降低($r=0.939, P=0.000$)。其中,2005 年食物消费量突然增长却没有直接导致食物氮足迹的增长,这可能因为氮含量较低食物如蔬菜等的消费量虽然大幅增加,但高氮含量的畜肉类消费量却减少,某种程度上,说明高氮肉类的消费对食物氮足迹变化趋势有很大的影响力。

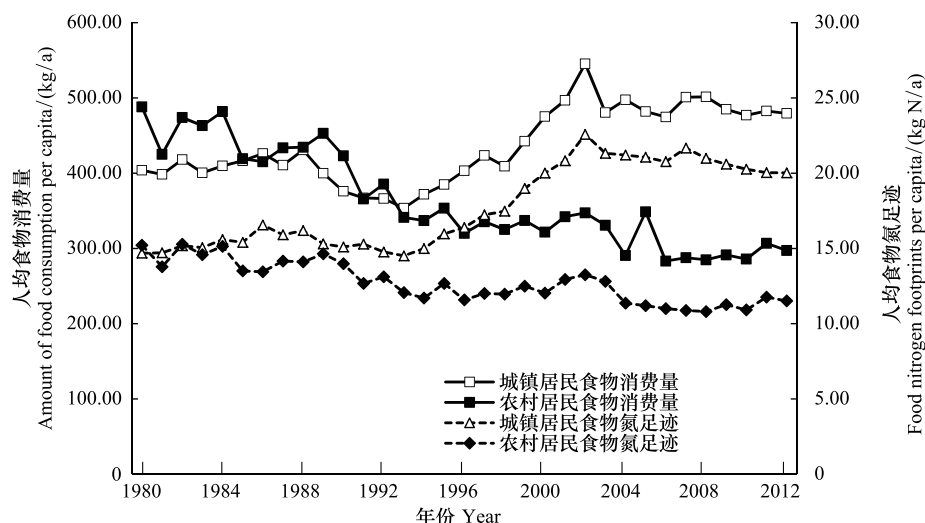


图 2 1980—2012 年北京市居民人均食物消费量和食物氮足迹的变化

Fig. 2 Variation of food consumption and nitrogen footprints per capita per year of Beijing residents in 1980—2012

各类食物占当年食物氮足迹总量的比例变化如图 3 所示,多年农村居民日常食物消费以粮食和蔬菜为主,而城镇居民饮食结构较为均衡,荤食与副食等食物氮足迹比例保持在 34%至 63%,同时期农村居民同类食物氮足迹比例只在 11%与 44%之间,虽然增加的比例比城镇居民高很多,但其仅仅是城镇居民的 23%至 43%,因为肉类和奶类等食物的氮足迹要远远高于谷类和碳水化合物^[17],这导致长年城镇居民食物氮足迹要比农村居民氮足迹大。就北京城镇与农村居民食物消费结构总体而言,以粮食、蔬菜为代表的素食食物氮足迹比例不断降低,瓜果食物氮足迹比例相对有所提高或小幅起伏;以畜禽肉类和水产品为代表的荤食氮足迹比例逐步增大,后渐趋于稳定,分别由 27%和 10%上升至 41%和 31%;蛋类与奶类等副食消费比例也逐渐增大,分别由 7%和 1%上升至 18%和 13%。可以看出,随着生活水平提高,北京城乡居民倾向于高氮畜禽肉类和水产品荤食的消费,素食食物选择也更多地偏向于营养丰富的瓜果,同时增加高蛋白的副食产品消费,日常食物消费不再满足于吃饱,而逐渐向吃精、吃好转变。

另一方面,由于居民人均食物氮足迹的和区域常住人口的变化,北京市食物氮足迹呈现出大幅上升的趋势(图 4),由 1980 年 13.57 万 t(N)/年一直增加到 2012 年 39.38 万 t(N)/年,平均每年增加 8066 t(N)/年,其数量级超过 1990—2010 年间广东省农业人口年均食物消费氮足迹总量^[18]。尤其是在 1994 年后,氮足迹增长速度加快,除了 2002—2003 年出现减少趋势外,每年保持增长率约 5.66%。北京市在 2009 年就超过广州市 1980—2009 年间峰值 35 万 t(N)/年^[9]。32 年来北京市地域较广农村区域的食物氮足迹虽然有所减少,但人口数量占优的城镇区域食物氮足迹不断增加,故城镇居民人均食物氮足迹是影响北京全市食物氮足迹的重要因素($r=0.861, P=0.000$),侧面说明了减缓北京食物氮足迹上升趋势的关键在于城镇居民人均食物氮足迹减少。

2.3 北京居民食物氮足迹与社会经济因子的关系

居民的食物消费量、消费结构及消费模式等随着社会和经济的发展而发生转变。于洋等^[16]对厦门市居民食物氮消费研究发现,人均可支配收入、恩格尔系数、食物价格指数、家庭规模均与食物氮量消费相关。因

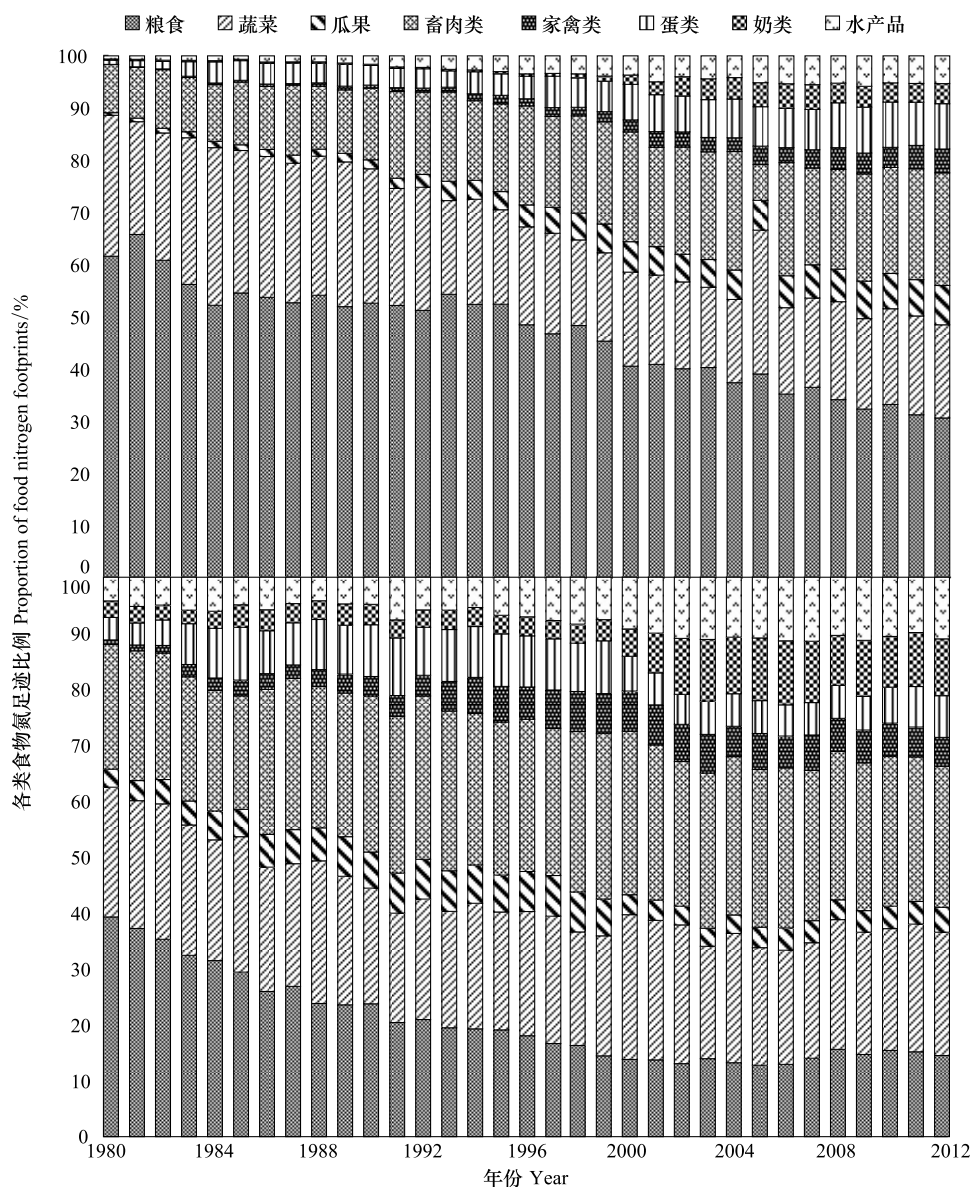


图3 1980—2012年北京市居民食物氮足迹结构变化(上为农村居民,下为城镇居民)

Fig. 3 Structure of food nitrogen footprints per capita per year of rural and urban residents in Beijing in 1980—2012

此,本文选取1980—2012年北京市城乡居民家庭的人均可支配收入、恩格尔系数、食物价格指数以及平均家庭人口数等与食物氮足迹有关的经济、社会因子,利用软件SPSS19.0进行Spearman相关分析,对人均食物氮足迹变化相关的驱动因子进行探讨。

由表3看出,1980—2012年间北京居民人均食物氮足迹与各经济、社会因子存在显著相关关系。其中,城镇居民食物氮足迹与人均可支配收入呈正相关关系,与城镇恩格尔系数、食物价格指数、平均家庭人口数呈负相关关系,即食物氮足迹随前者增长而增长,随后三者减少而增长,但食物氮足迹与食物价格指数相关性微弱。农村居民食物氮足迹相关性情况与城镇居民相异,其与农村恩格尔系数和平均家庭人口数呈正相关关系,与人均可支配收入呈负相关关系。进一步将各类食物氮足迹与所选取的社会经济因子进行相关分析,可以发现,城镇居民肉奶类氮足迹和社会经济因子的相关性与食物总量氮足迹高度相似,农村居民粮蔬类素食氮足迹和各因子的相关性与食物总量氮足迹高度相似,说明了随着社会发展,城镇居民肉类与奶类的消费影响着食物氮足迹变化趋势的走向,而粮食和蔬菜消费则主导着农村居民氮足迹的走向。由此推断,由于经济发展和人们收入提高,食物支出占总支出的比例逐渐减小,食物价格和食物消费支出对居民食物消

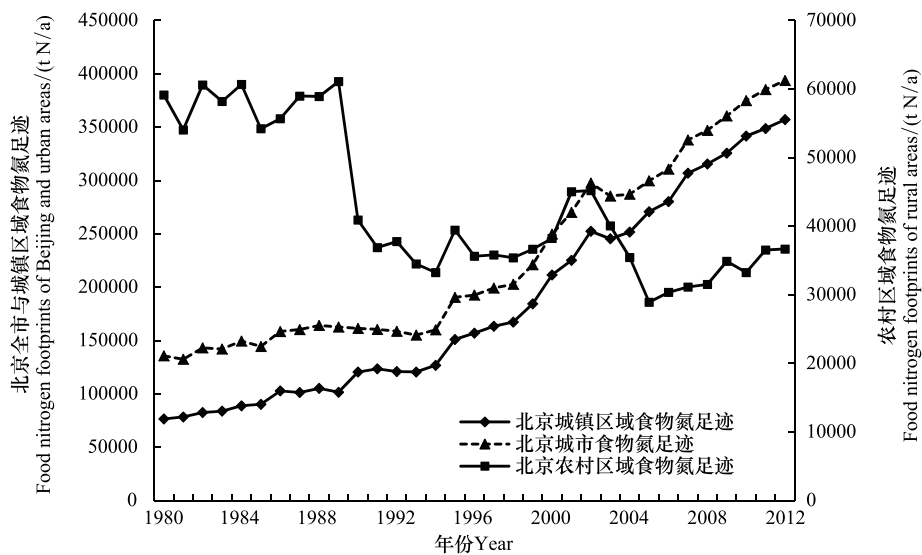


图 4 1980—2012 年北京区域食物氮足迹变化
Fig. 4 Variation of food nitrogen footprints of Beijing in 1980—2012

费的制约大为减少。另一方面,家庭规模随着计划生育政策的推行而逐渐缩小,家庭消费负担便有所减小。因此,北京城镇居民更趋向于价格和营养较高的肉奶类消费,同时增加蔬菜类消费来保持营养均衡,从而导致食物氮足迹的增长。而对于生活水平较低的农村居民,其受饮食习惯和食物选择限制,日常食物消费依然是以粮食和蔬菜为主,随着农村经济发展,食物消费也从单一化朝向多元化发展,传统主粮消费量大为减少,而瓜果、荤食与副食消费量有限地增长,这使得农村居民食物氮足迹不但没增长,反而显略减趋势。

表 3 居民人均食物氮足迹与各社会经济因素相关性

Table 3 Partial correlation coefficients between food nitrogen footprint and various economic factors				
种类 Item	恩格尔系数 Engel coefficient	人均可支配收入 Per capita Disposable income	食物价格指数 Food price index	平均家庭人口数 Average number of family members
城镇人均总量 Urban area per capita	-0.834 **	0.808 **	-0.347 *	-0.829 **
粮食 Grain	0.721 **	-0.683 **	0.322	0.662 **
蔬菜 Vegetable	-0.734 **	0.705 **	-0.346 *	-0.740 **
瓜果 Fruit	0.017	0.067	0.191	-0.065
畜肉类 Livestock	-0.858 **	0.847 **	-0.387 *	-0.830 **
禽肉类 Poultry	-0.810 **	0.827 **	-0.396 *	-0.816 **
水产品 Aquatic product	-0.850 **	0.857 **	-0.413 *	-0.838 **
蛋类 Egg	-0.088	0.144	-0.190	-0.142
奶类 Dairy	-0.907 **	0.843 **	-0.219	-0.849 **
乡村人均总量 Rural area per capita	0.766 **	-0.865 **	0.023	0.864 **
粮食 Grain	0.903 **	-0.983 **	0.174	0.983 **
蔬菜 Vegetable	0.792 **	-0.823 **	0.276	0.822 **
瓜果 Fruit	-0.850 **	0.954 **	-0.312	-0.954 **
畜肉类 Livestock	-0.655 **	0.718 **	-0.371 *	-0.721 **
禽肉类 Poultry	-0.862 **	0.980 **	-0.173	-0.980 **
水产品 Aquatic product	-0.860 **	0.964 **	-0.271	-0.963 **
蛋类 Egg	-0.861 **	0.879 **	-0.289	-0.879 **
奶类 Dairy	-0.821 **	0.863 **	-0.367 *	-0.863 **

** 表示其显著水平为 $\leq 1\%$; * 表示其显著性水平 $\leq 5\%$

3 讨论

由估算结果可知,北京城镇居民人均食物氮足迹 32 年来增幅约 36%,而英国 1970—2007 年 37 年增幅仅

约 2%^[8], 说明中国城市化过程中居民食物氮足迹增加速度远比发达国家快。虽然农村居民食物氮足迹有所下降, 降幅达 16%, 但随着农村经济发展, 城乡居民收入差异缩小, 农村居民饮食习惯趋向于城镇居民, 逐渐对饮食营养有更高的追求, 高氮食物消费量会逐渐增大, 目前其荤食与副食消费量离营养平衡下限(表 4)所需食物量^[19]还差很多, 故其食物氮足迹有很大的上升空间。由于城市化快速发展, 导致更多农村居民和外来人口进入北京城镇生活, 即使以后北京居民食物氮足迹还能保持在 2012 年水平, 假设未来北京市城乡常住人口增长率为“十一五”期间的平均增长率, 按照马尔萨斯人口模型预测, 到 2020 年北京人口规模涨至 3000 万以上, 城市区域食物氮足迹将达 60.5 万 t(N)/年, 比 10 年前的数量级 37.5 万 t(N)/年增加近一倍。可见, 未来北京市区域氮负荷将承受更大的压力。因此, 在控制人口数量增长的前提下, 优化城镇居民食物消费结构和保持最低营养平衡食物需求在某种程度上可以抑制个人食物氮足迹的无限增长, 对城市低氮发展具有极其重要的意义。

表 4 中国居民营养平衡的年均食物消费量与北京居民食物消费量

Table 4 Annual mean food consumption of nutrient balance of Chinese resident and the resident in Beijing

食物类别 Food category	营养平衡所需年均食物消费量 Annual mean food consumption for nutrient balance/kg	城镇居民食物消费量 Foodconsumption of urban residents/kg	农村居民食物消费量 Foodconsumption of rural residents/kg
粮食 Grain	91.3—146.0	77.5—166.9	102.3—271.6
蔬菜 Vegetable	109.5—182.5	146.5—274.1	88.7—223.9
瓜果 Fruit	73.0—146.0	25.4—67.4	4.1—46.7
畜禽肉 Meat	18.3—27.3	20.6—46.7	7.6—19.3
水产品 Aquatic Product	27.4—36.5	5.46—21.6	0.8—5.7
蛋类 Egg	9.1—18.3	6.43—19.9	1.4—11.1
奶类 Dairy	109.5	10.3—67.2	0.3—14.6

本文估算的氮足迹结果低于李玉炫估算得出的广州人均食物氮足迹 25.98 kg(N)/年^[9]。北京与广州同属国内大城市, 其居民食物氮足迹差异大的原因一方面是因为李玉炫食物氮足迹估算方法与本文不同, 其食物氮足迹组成除了食物消费氮足迹与食物生产氮足迹外, 还包括食物生产消费中涉及的能源氮足迹(其默认为总氮足迹的 25%)。本文遵循的是英国 Stevens 教授^[8]的估算方法, 其个人食物氮足迹不包含能源氮损失部分, 而把这部分氮损失归于能源氮足迹, 故这估算方法的结果较于前者偏低; 另一方面, 本文采用美国的虚拟氮因子, 虚拟氮因子的校正需要兼顾本国食物生产过程中的一些参数, 如食物氮量的效用率、浪费率、循环率和流失率等^[7-8], 因中国本土食物生产以传统农耕和粗放型养殖为主, 成品处理与冷藏技术不及美国完善, 加工垃圾处理率和循环利用率低效, 造成食物在生命周期过程中氮损失量更大, 故中国食物虚拟氮因子会更高些, 这导致估算结果可能比现实小。同时, 由于缺乏居民在外就餐和外来人口食物消费的相关统计资料, 本文只涉及常住居民家庭食物消费, 这也造成北京人均及区域食物氮足迹的低估。就估算结果准确度而言, 氮量换算的误差主要来自于数据与相关文献中的参数, 但统计年鉴中的数据统计多年使用的是同一个系统, 故不确定性不超过 5%^[20]。从本文结果可知, 北京市 1980—2008 年城镇居民食物氮足迹从 15 kg(N)/年增加至 21 kg(N)/年, 与谷保静^[21]估算的同一时期中国人均食物氮足迹变化幅度 16 kg(N)/年至 22 kg(N)/年相似, 故本研究的估算结果具有一定的参考性, 同时也能为日后城市其他营养元素足迹的测量提供方法参照。

4 结论

本研究利用统计数据和相关文献资料, 在 N-Calculator 的氮足迹计算框架下, 对北京市 1980—2012 年居民食物氮足迹变化动态特征及其影响因子进行了综合分析。北京市城镇居民人均食物氮足迹在 14.69—22.58 kg(N)/年之间波动, 平均为 17.78 kg(N)/年; 农村居民人均食物氮足迹在 10.81—15.28 kg(N)/年之间波动, 平均为 12.72 kg(N)/年, 其中城镇居民食物氮足迹接近发达国家高氮消费水平。食物消费量和消费模

式的改变对居民食物氮足迹有一定的影响,城乡居民食物氮足迹结构都发生较大改变,畜肉类、禽肉类和水产品等荤食和奶类食物氮足迹比例逐年增加,素食食物中粮食和蔬菜比例大幅减少。城镇居民食物氮足迹与人均可支配收入呈正相关,与恩格尔系数和平均家庭人口数呈负相关。农村居民食物氮足迹与各因子的相关关系则与前者相反。随着北京城市化和人口快速增加,北京市区域食物氮足迹每年以约 8066 t(N)/年的数量级快速增长,并保持增长趋势,城镇居民调整饮食结构和保持合理低氮膳食是减缓区域氮足迹增长的重要途径。此外,由于居民在外就餐统计数据和符合中国实际情况的虚拟氮因子缺乏,对北京居民及城市区域的食物氮足迹核算带来了不确定性,可能造成估算结果偏低。

5 展望

氮素通过城镇居民食物消费在城市生态系统中流动,随着中国城镇化的快速发展,居民高氮食物消费比重的提高和城市人口膨胀导致了城市食物氮足迹增加。食物氮足迹强度的增加易干扰城市生态系统中的氮平衡,导致一系列环境风险与问题。目前,中国关于城市氮足迹的研究比较少。本文初步估算了北京多年居民食物氮足迹,探讨其变化规律及其与相关社会经济因子间的关系。但由于相关统计数据和参数的缺乏,增大了氮足迹估算的难度和结果的误差性,因此本文结果仅可以作为城市低氮管理的一个理论参考。加强基于中国本地情况的食物虚拟氮因子的研究,有利于提高食物氮足迹估算的精确度,也便于从食物生命周期角度来减少每个过程的氮浪费。同时,完善城市能源消耗氮排放因子,以进一步准确计算能源氮足迹。目前,氮足迹的计算仅是所有活性氮的质量加总,缺乏对不同形态氮素的环境影响的量化^[6],如碳足迹中的各类温室气体都有其全球暖化潜势因子等。引入此类特征化因子,具体化各类氮污染物在每个研究目标中的权重,这样便可以将氮足迹的应用从目前的清单分析阶段延伸到整个生命周期影响评价。在此基础上,建立起适合中国情况的 N-Calculator 模型来计算个人氮足迹,在当前城市人口膨胀的背景下,指引居民低氮生活,进而减少城市有害氮排放,降低氮污染的风险。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Forkes J. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 52(1): 74–94.
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889–892.
- [4] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 year of change. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 64–71.
- [5] 方凯. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. *生态学报*, 2015, 35(6): 1–17.
- [6] 秦树平, 胡春生, 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.
- [7] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, Erismann J W, Kohn R, Kitzes J. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 40–66.
- [8] 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.
- [9] 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, 6: 137–140.
- [10] 洗超凡, 欧阳志云. 城市生态系统氮代谢研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2548–2557.
- [11] 北京市统计局. 北京统计年鉴(1980—2013). 北京: 中国统计出版社, 1980–2013.
- [12] 北京市统计局. 北京六十年. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [13] 中国国家统计局. 2013 中国价格统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [14] 王海伟, 邓蓉. 中国奶类消费现状分析. *北京农学院学报*, 2012, 27(4): 61–64.
- [15] 袁学国. 我国城乡居民畜产品消费研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2001.
- [16] 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.
- [17] Xue X B, Landis A E. Eutrophication potential of food consumption patterns. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(16): 6450–6456.
- [18] 周涛, 王云鹏, 王芳, 冯艳芬. 广东省农业氮足迹分析. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2430–2438.
- [19] 中国营养学会. 中国居民膳食指南. 拉萨: 西藏人民出版社, 2008.
- [20] 谷保静, 葛莹, 朱根海, 徐昊, 常杰, 徐青山. 人类活动对杭州城乡复合系统陆源氮排海的驱动分析. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2078–2087.
- [21] Gu B J, Leach A M, Ma L, Galloway J N, Chang S X, Ge Y, Chang J. Nitrogen footprint in China: food, energy, and nonfood goods. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(16): 9217–9224.