

DOI: 10.5846/stxb201906161269

冼超凡, 刘晶茹, 潘雪莲, 欧阳志云. 典型移民城市食物氮足迹估算分析——以深圳市为例. 生态学报, 2020, 40(20): 7441-7450.

Xian C F, Liu J R, Pan X L, Ouyang Z Y. Calculation and analysis of urban food nitrogen footprints in a typical immigrant city: a case study of Shenzhen City, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7441-7450.

典型移民城市食物氮足迹估算分析 ——以深圳市为例

冼超凡¹, 刘晶茹¹, 潘雪莲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 深圳市环境科学研究院, 深圳 518001

摘要: 城市食物源氮消费产生的环境排放是全国氮污染的重要源头, 城市食物氮足迹评估可反映维持城市人口基本食物需求的活性氮排放以及对周边环境的潜在影响。以典型移民城市深圳市为例, 基于改进 N-Calculator 模型的基础上, 估算了 2010—2015 年间因城市人口流动导致的城市食物氮足迹变化, 并分析其时空异质性及其与城市化间的关系。结果表明: 深圳市不同类型城市居民食物氮足迹不一致, 其中常住户籍居民人均食物氮足迹从 14.63 kg N a⁻¹ 增加至 15.17 kg N a⁻¹, 高于非户籍居民食物氮足迹 13.09 kg N a⁻¹, 其主要体现在瓜果、肉类、水产品等食物消费上。总体上, 深圳城市食物氮足迹呈增长趋势, 5 年增幅 11.50%, 增幅最大为常住户籍居民食物氮足迹, 但目前深圳非户籍居民的食物消费主导着城市食物氮足迹。深圳城市内部区域食物氮足迹呈高度空间异质性与聚集性, 各区域增长量差异明显, 街道尺度城市食物氮足迹增长热点主要分布在城市的西部沿海区域, 部分热点区域单位增长量数量级比肩区级尺度单位的生长量, 城市区域食物氮足迹与人口城市化的关联性不明显, 但与经济城市化存在一定的关联性。当前城市移民落户趋势及居民高氮饮食倾向不利于城市氮足迹的削减, 减少食物生产上游活性氮流失为深圳市贯彻粤港澳大湾区协同可持续发展的关键。

关键词: 流动人口; 食物消费; 氮足迹; 时空特征; 深圳市

Calculation and analysis of urban food nitrogen footprints in a typical immigrant city: a case study of Shenzhen City, China

XIAN Chaofan¹, LIU Jingru¹, PAN Xuelian², 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 Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, China

Abstract: The anthropogenic release of reactive nitrogen (Nr, consists of all nitrogen species except N₂) from urban food consumption contributes to national nitrogen-related pollution. The emergence of food nitrogen footprint indicator, which quantifies the amount of reactive nitrogen release to the environment by food production and consumption, can address the potential environmental impacts on urban surroundings to feed the increasing population of a city with rapid urbanization. In this study, a modified N-Calculator model was developed to calculate the food nitrogen footprint of Shenzhen City from 2010 to 2015, the typical immigrant city with higher degree of urbanization in China. The related spatio-temporal variations in regional food nitrogen footprints within the city and their relationships with urbanization were then analyzed. The results showed as follows: (1) the food nitrogen footprints caused by different types of urban residents per capita presented

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71533005); 国家重点研发项目 (2017YFF0207303); 地方委托项目 (SZCG2017151338)

收稿日期: 2019-06-16; **网络出版日期:** 2020-08-26

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

variations. The trend in average food nitrogen footprints of urban permanent resident presented growing from 14.63—15.17 kg N per capita, which exceeded 13.09 kg N per capita of urban non-registered resident during study period, mainly due to the differences in daily consumption of meat, fruit and aquatic products. These data revealed the gradually strengthening of the gap between permanent and impermanent urban residents' food nitrogen footprints. (2) The entire food nitrogen footprint of Shenzhen City increased by 11.50% in 5 years, which was driven by growth of food nitrogen footprints produced by urban permanent residents, while urban non-registered residents' food consumption was the main contributor to current urban food nitrogen footprint. The variations in regional food nitrogen footprints within Shenzhen City presented spatial heterogeneity and aggregation, and the growths of those generated from the internal administrative districts and subdistricts were significantly different. The hotspots of food nitrogen footprints growing in the scale of subdistrict mainly located in the western coastal regions in Shenzhen City, the growths of their footprints were partially exceeded the magnitude of those created by some administrative districts. (3) The study found that there were no obvious relationships between the increases in urban food nitrogen footprints and population urbanization within the city, but to some extent correlations between smaller-scaled footprints and economic urbanization were witnessed. Current trends in immigrant population settlement and the personal preference for high nitrogen diet post barriers to further reductions in urban food nitrogen footprints, and the alleviation in the upstream reactive nitrogen loss from food production is the key measure for Shenzhen City to contribute to the sustainable development of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

Key Words: immigrant population; food consumption; nitrogen footprint; temporal and spatial characteristics; Shenzhen City

随着中国城市化水平不断提高,居民的饮食结构发生改变,城市食物供给与需求之间的关系日益紧张^[1]。城市化与食物消费结构转型加剧了因居民食物消费带来的生态环境压力,如生态足迹、水足迹、碳足迹及氮足迹等,其中氮足迹与城市化关系复杂^[2],且其环境污染潜力大,过量人类源活性氮素的环境排放威胁着大气、水体及土壤的生态环境健康,已成为全球面临的重大环境污染问题之一^[3]。作为重要活性氮源,城市食物消费为主导的环境氮排放已是造成全国氮环境负荷增加的主要原因^[4]。在此背景下,明确城市各区域的食物源氮排放对全城活性氮环境累积的影响规模对于实施差别化减排、提高食物源氮污染防控效率有重要的理论和实践意义。

作为反映人类生活消费对生态环境影响的重要指标之一^[5],城市食物氮足迹一直为氮足迹研究领域的热点。目前,国内外已有学者从不同尺度探讨了食物氮足迹的量级及其动态,但国外学者研究主要集中在国家尺度^[5-6],在城市尺度上,近年国内研究较多,包括北京、广州、兰州与南昌市等案例研究^[7-10],其城市食物氮足迹估算主要是基于 2010 年 Leach 等人开发的氮足迹核算模型(N-Calculator, <http://n-print.org>)^[11],并结合统计年鉴中的城市常住城乡居民人数与对应人均食物消费量换算得到整个城市的食物氮足迹结果。纵观现有的研究成果,尚存在一些不足,其主要聚焦于城市层面的常住人口食物氮足迹的汇总核算,少有研究关注不在常规统计范围内的流动人口及城市层面以下区域的食物氮足迹贡献,尤其是对于流动人口占比较大且城市内部发展差异较大的城市,传统的氮足迹核算模型不可避免导致最终估算结果误差性大,且无法进一步细化至区县尺度研究,揭示城市食物氮足迹内部异质性。为了克服上述局限,本文以典型移民城市深圳市为研究案例,基于氮足迹核算模型和城市人口普查数据等实地调查资料,分析 2010—2015 年深圳市食物氮足迹变化动态、探讨常住居民与流动人口在食物氮足迹中扮演的差异性角色,并进一步揭示城市内部食物氮足迹产生的时空特征,在城市化人口流动的大背景下,为精准缓解城市食物消费带来的氮污染风险提供科学的建议。

1 研究方法

1.1 研究地区

本研究选取广东省深圳市为研究区域,截止 2015 年,其下辖十个行政区(福田区、罗湖区、盐田区、南山

区、宝安区、龙岗区、龙华新区、坪山新区、光明新区及大鹏新区)共 58 个街道。作为城市化程度较高的典型沿海移民城市,深圳市在短短 30 年时间内从南海边陲渔村发展成为国内四大一线城市之一,其在 2004 年时已基本完成市域人口城市化^[12],成为全国第一个“无农民”的城市。大量外来人口的流入使深圳城区变得异常拥挤,其城市人口密度远远高于发达国家和国内主要大城市的水平^[13]。城市的过度膨胀对城市区域环境造成巨大影响,主要体现在高人口密度城市区域的居民食物消费方面^[13],其加大对食物源氮消费的需求,进而直接或间接造成更多活性氮向环境流失,故有必要对深圳城市食物氮足迹进行分析评估。

1.2 数据来源

由于深圳市统计年鉴未包含针对居民食物日常消费量等相关数据信息,本研究所涉及的居民食物消费数据,均来源于基于本市实地调查的居民膳食日摄入量调查报告。其中,2010 年食物消费量采取 2009 年针对深圳各区的常住户籍家庭以及外来务工膳食调查数据,而在 2015 年类似上述详细调查数据缺乏,故采用 2015 年针对区级常住户籍家庭膳食调查数据作为 2015 年全市常住户籍人口食物消费量,而非户籍流动人口膳食数据默认恒定^[14-16]。

人口数据主要来源于城市统计年鉴与人口普查数据,其中,2010 年深圳市人口数据参照第六次人口普查数据,包括常住户籍人口,常住非本地户籍人口及流动户籍待定人口等,因第七次人口普查尚未开始,2015 年人口数则根据深圳市 2015 年全国 1%人口抽样调查主要数据结果^[17]换算可得,这可克服统计年鉴中人口统计无法区分常住与流动人口的缺陷,同时人口数据统计可细分至街道尺度,揭示城市内居民人口分布的异质性。此外,其余相关计算分析参数均来源于相关文献及统计年鉴数据。由于外出就餐数据难以获取,因此本研究只针对城市居民家庭的食物消费,不包括居民市内与市外的外出就餐。

1.3 食物氮足迹估算方法

本研究城市居民食物氮足迹估算方法主要基于 N-Calculator 计算框架^[11]及其在中国城市案例中的算法模型^[8],默认食物氮素经成人人体消费后全部最终以粪尿氮形式进入城市排水管网^[6,8],最终被输往污水处理(2010—2015 年深圳市生活污水处理率年均均为 93%)^[18]。此外,从食物消费阶段氮素流动的生命周期角度考虑,食物氮足迹估算过程中还考虑食物消费的厨余比例及污水处理反硝化率,食物厨余垃圾(包括食物不可使用部分和被丢弃的可食用部分)一般会被收集以填埋和焚烧方式处理(2010—2015 年深圳市生活垃圾处理率年均均为 97%)^[18],处理过程活性氮流失量约为厨余垃圾处理量的 0.03%^[19]。同时,城市人均食物消费氮足迹与食物消费强度以及废水处理效率有关^[11],深圳市污水处理工艺以 AO(厌氧好氧工艺)法及 MSBR(改良型序批反应器工艺)法为主要发展方向^[20],前者活性氮去除率为 68.85%^[21],后者为 72.12%^[22],本研究取其平均数 70%,高于全国的 60%^[4]。

同样,在本文计算中,虚拟氮部分不包括食物生产和运输过程中因能源消耗而导致的活性氮素泄漏^[8],因国内外研究都发现其所占食物氮足迹的比例都特别小^[6]。因此,可以通过城市居民食物氮素消费与虚拟氮的关系,结合各区域对应的人口数量,得出城市食物氮足迹,居民人均食物氮足迹可由以下公式可得:

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

$$FP_C = \sum_{i=1}^{j=1} FD_i^j \times (1 - p_w) \times (1 - p_N) + \sum_{i=1}^{j=1} FD_i^j \times p_w \times p_L \quad (2)$$

$$FP_P = \sum_{i=1}^{j=1} FD_i^j \times EF_i \quad (3)$$

式中, FP_T 、 FP_C 、 FP_P 分别为居民食物氮足迹、食物消费氮足迹和食物生产氮足迹。 i 代表深圳市居民食物消费种类(本研究中涵盖的主要人均消费食物包括粮食、蔬菜、瓜果、畜禽肉、水产品、蛋类、奶类、豆类与油脂九类),不同食物的消费量及氮折算系数参见表 1。 FD_i 为 j 区域居民消费 i 食物的数量, p_w 、 p_N 、 p_L 分别为家庭食物消费厨余比率 33.33%^[4]、污水处理氮去除率 70%和厨余垃圾处理氮流失率 0.03%,而 EF_i 为对应食物虚拟氮因子,默认 2010—2015 年间各类食物虚拟氮因子恒定(表 1)。

表 1 深圳市居民食物消费量及不同食物的氮含量与虚拟氮因子^[23]

Table 1 Nitrogen contents and the virtual N factors in daily food amount consumed by urban residents in Shenzhen City

种类 Items	氮含量 Nitrogen content/%	虚拟氮因子 Virtual N Factor	2010 城市常住户籍 居民食物消费量 Food consumption by urban permanent residents in 2010/ (g/d)	2015 年城市常住户 籍居民食物消费量 Food consumption by urban permanent residents in 2015/ (g/d)	2010 和 2015 年非户籍居民食物消费量 Food consumption by urban non-registered residents in 2010 and 2015			
					宝安区与 龙华新区/ (g/d)	龙岗区与 大鹏新区/ (g/d)	南山区/ (g/d)	其他区域/ (g/d)
粮食 Grain	1.36	2.1	300	341.6	472.1	477.2	550	485.7
蔬菜 Vegetable	0.21	7	321.1	286.8	303.8	343.7	265.2	317.6
瓜果 Fruit	0.2	21	154.3	118.1	28.1	42	57.8	39.3
畜禽肉 Meat	1.77	3.1	169.3	202.5	123.2	126.2	117.8	124
水产品 Aquatic Product	1.41	4.2	58.3	54	15.6	17.3	22.2	17.4
蛋类 Egg	1.83	0.77	31.4	29.7	21.2	26.3	32.4	25.4
奶类 Dairy	0.55	5.6	95.4	39.5	23.2	18.3	40.7	23.2
豆类 Bean	4.67	0.95	15.4	62.8	50	58	85.3	59.2
油脂 Oil	3.11	0.87	41.1	35.9	28.7	27.8	27.5	28.1

1.4 空间自相关分析

为探讨城市食物氮足迹的空间关联性,采用空间探索性分析技术 ESDA(Exploratory Spatial Data Analysis)中全域空间相关性分析对深圳城市区域食物氮足迹的空间相关性进行分析,若相关性检验显著则说明区域食物氮足迹存在空间性特征。此方法已多被用于省市乃至城市群县域碳排放空间分析研究^[24-25],但在更小尺度的城市区域的应用尚少。全域空间自相关一般采用 Moran's *I* 指数分析研究范围内观测值的空间关联及差异性^[25],其表达式如下:

$$I = \frac{[n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})]}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}]} \quad (4)$$

式中,*I* 为 Moran's *I* 指数;*n* 为研究城市街道个数,因空间自相关分析准确性对研究区域有样本个数要求,本研究仅分析街道尺度食物氮足迹的空间聚集与分散特征。*i* 和 *j* 分别为 *i* 区域和 *j* 区域的食物氮足迹;*W_{ij}* 为空间权重矩阵,本研究主要采用 Queen 邻接空间权重矩阵。Moran's *I* 值位于 $[-1, 1]$ 之间,可通过 *Z* 值大小对 Moran's *I* 指数的显著程度进行检验,若其显著结果为正,表示街道食物氮足迹存在空间正相关关系,若显著为负则表明存在空间负相关性,为零则为随机分布不存在任何相关性,如果 *Z* 值绝对值大于或等于 2.58 ($P < 0.01$),则表明区域存在极为显著的空间自相关关系^[24]。

2 结果与分析

2.1 居民食物消费及其氮足迹变化

深圳市 2010—2015 年城市居民人均食物氮足迹变化如表 2 所示,对于常住户籍居民而言,其食物氮足迹总体有所增加,从 14.63 kg N a⁻¹ 增加至 15.17 kg N a⁻¹,增幅约 4%,畜禽肉类消费仍是食物氮足迹主要贡献源,且其所占比例从 25% 升至 28%。同时,粮食消费导致的食物氮足迹不容忽视,所占比例也从 23% 升至 26%。瓜果与奶类消费产生的氮足迹呈下降趋势。与前者不一致,非户籍居民(包括常住非本地户籍与流动人口)的食物氮足迹主要来源于粮食消费(43%),其人均食物氮足迹 13.09 kg N a⁻¹ 低于户籍居民,主要体现在瓜果、畜禽肉类、水产品等食物消费上。究其原因,非户籍居民可能因为食物支出受限原因(如其需承担着房租压力等),日常饮食消费一般不倾向于上述单价更贵的食物。与中国农村居民素食消费倾向一致^[4],城市非户籍居民食物消费仍是处于植物性食物为主的生存型阶段,除了蔬菜消费,其粮食消费远超户

籍居民,尤其是其中的劳务工群体^[15]。截至 2015 年,户籍与非户籍居民副食(蛋类、奶类和豆类)消费导致氮足迹相似。深圳城市居民食物消费并不完全与中国居民膳食推荐量范围一致^[26],与推荐量导致的食物氮足迹相比,深圳市居民粮食、畜禽肉、豆类(2015 年)消费均显著高于食物氮足迹合理范围,瓜果、蛋类、奶类消费明显低于合理范围。其中,非户籍居民水产品消费低于合理范围,户籍居民油脂消费高于合理范围。整体而言,与国内其他地级市相比,2015 年深圳全市城市居民平均食物氮足迹为 14.13 kg N a⁻¹,低于 2012 年北京城镇居民水平 20.00 kg N a⁻¹,高于其农村居民水平 12.80 kg N a⁻¹^[8],整体低于南昌市城乡居民水平^[9],但高于兰州市城乡居民水平^[10]。由上可知,城市居民食物结构调整在降低个人食物氮足迹方面上仍具有很大潜力,尽管 2010—2015 年深圳户籍与非户籍居民总体食物氮足迹仍处于理论合理范围内。

表 2 深圳市居民食物氮足迹及中国居民理论合理足迹范围

Table 2 The annual food nitrogen footprints of urban residents in Shenzhen City and the ranges of reasonable footprints for Chinese residents

食物类别 Food category	常住户籍居民人均 食物氮足迹/(kg N) Average food nitrogen footprints per capita of urban permanent residents	非户籍居民人均食 物氮足迹/(kg N) Average food nitrogen footprints per capita of urban non-registered residents	中国居民人均食物氮 足迹合理范围/(kg N) Suggested ranges of food nitrogen footprints per capita of Chinese residents	
	2010	2015	2010—2015	2016
粮食 Grain	3.43	3.90	5.67	0.57—1.71
蔬菜 Vegetable	1.77	1.58	1.70	1.66—2.76
瓜果 Fruit	2.39	1.83	0.65	3.10—5.42
畜禽肉 Meat	3.61	4.32	2.62	0.85—1.60
水产品 Aquatic Product	1.32	1.22	0.41	0.91—1.70
蛋类 Egg	0.20	0.19	0.17	0.26—0.32
奶类 Dairy	1.11	0.46	0.31	3.49
豆类 Bean	0.30	1.23	1.24	0.49—0.69
油脂 Oil	0.50	0.44	0.34	0.30—0.36
总量 Total	14.63	15.17	13.09	11.63—18.05

2.2 城市食物氮足迹时空分析

深圳市 2010—2015 年间城市氮足迹呈增长趋势,由 13.64 万 t N a⁻¹增至 15.21 万 t N a⁻¹,增幅 11.50%。其中,常住非户籍居民食物消费为城市食物氮足迹主要构成部分,其增幅为 4.27%,即目前深圳非本市居民的食物消费主导着城市食物氮足迹。然而,增幅最大为常住户籍居民食物氮足迹,其高达 42.82%,约为前者的十倍(图 1)。究其原因,主要是深圳市下辖各行政区食物氮足迹增长主要是由常住户籍居民食物消费导致(除了龙华新区)。就区域居民食物氮足迹增加而言,深圳市内各行政区增长量差异明显,新区增长量远远低于其他各区,各行政区增长量大小顺序如图 1 所示,其中,宝安区户籍与非户籍居民食物氮足迹增长最明显,其与龙岗区居民食物氮足迹增长总量比其余各区加和总量还多。由此可见,随着深圳市落户政策放开^[27],除了户籍居民人均食物氮足迹提高因素之外,深圳市非户籍人口落户比重上升及流动人口迁入持续增多也是推动深圳市食物氮足迹整体增长的驱动力,按此趋势,未来户籍居民食物消费会逐渐取代非户籍居民成为城市食物氮足迹的主要贡献源。

从空间上看,较早成立行政区的氮污染贡献更大,这些区域主要位于深圳城市的西部与中部,但从更小的街道尺度上分析,城市食物氮足迹增长热点分布具有与区级尺度不一致的特征,其并不完全位于增长量最大的宝安区与龙岗区内。同时,某些街道区域单位增长量数量级甚至比肩区级尺度单位增长量,如图 2 所示,研究期间有 11 个街道区域增长量高于 400 t N,高于同时期坪山新区、盐田区与大鹏新区等区域增长量。其中,有 5 个街道区域增长量甚至高于 550 t N,而同期光明新区增长量也只有 505 t N,说明街道尺度区域的食物源氮污染物排放量不一定比更大的区级尺度区域少。这些食物氮足迹增长热点主要分布在城市的西部沿海区域,东部区域的氮污染贡献较少。

基于邻接空间权重矩阵计算各街道尺度区域食物氮足迹的 Moran's I 值, 可知 2010—2015 年 Moran's I 值从 0.6454 ($Z=7.3904$, $P<0.001$) 略降为 0.6260 ($Z=7.1701$, $P<0.001$)。总体上, 街道尺度区域食物氮足迹在 2010 和 2015 两年呈现出高度空间聚集特征, 即食物氮足迹高的街道区域与其他食物氮足迹高的区域邻近, 反之食物氮足迹低的街道区域之间趋于邻近。尽管 5 年来 Moran's I 值出现轻微降幅, 总体上空间高度聚集特征仍然保持在稳定的状态, 这侧面说明了今后城市内部易出现更多范围更大的食物氮足迹增长热点集中片区 (图 2), 因毗邻街道区域的食物氮足迹趋向协同增长, 这可能与深圳市产业布局有关, 地域聚集性较强的城市中心与工业产区对外来移民占多数的劳工吸引较大, 导致此区域人口密度较高且增速较快, 从而形成中部商住导向型“福田—莲花—梅林”, 以及西部产业导向型“粤海—南头—新安—西乡—沙井”两大食物氮足迹增长热点集中片区。未来氮污染防治手段应着重实施于这些重点片区, 如优先扩容改造老区的污水处理厂来应对日益增长的生活污水产生量, 避免因污水处理超荷导致尾水氮含量超标, 同时升级污水处理工艺来提高污水反硝化率及污泥无害处理率。

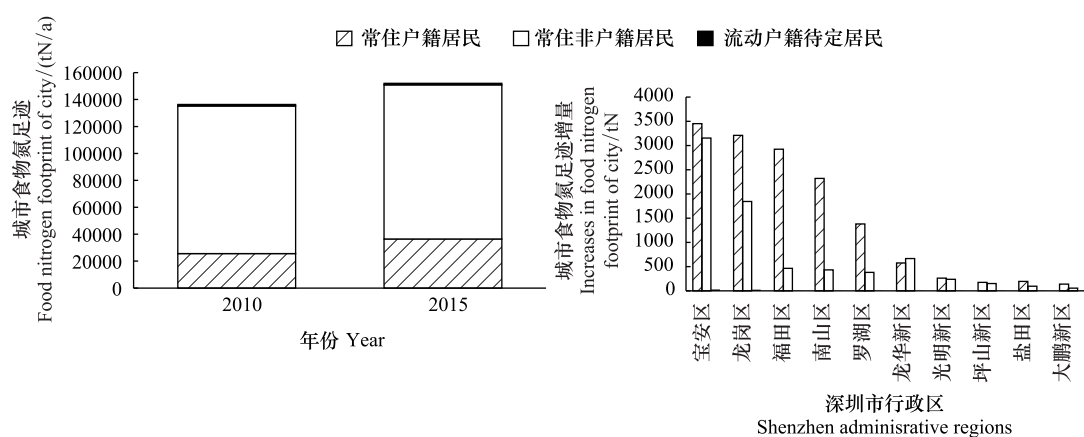


图 1 2010—2015 年深圳城市及其内部行政区食物氮足迹增量

Fig.1 The internal heterogeneity of increases in urban food nitrogen footprints by Shenzhen City from 2010 to 2015

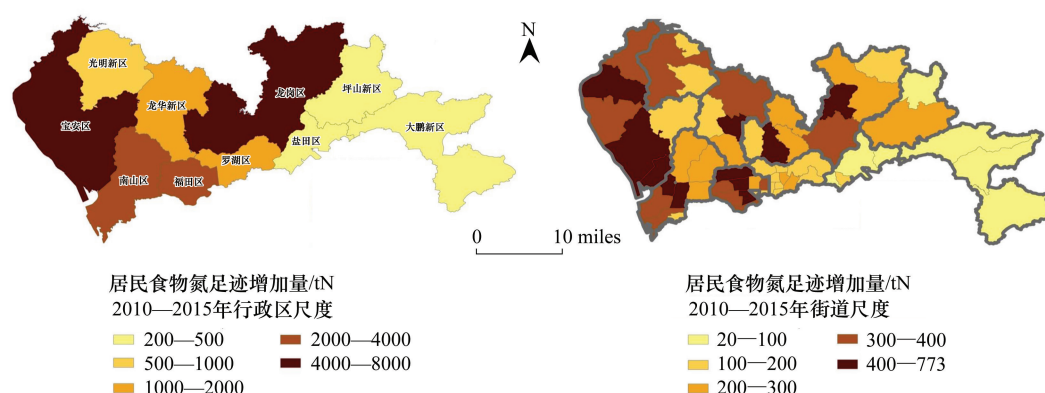


图 2 2010—2015 年深圳城市食物氮足迹增量空间分布

Fig.2 The spatial distribution of increases in urban food nitrogen footprints by Shenzhen City from 2010 to 2015

2.3 城市化对食物氮足迹的影响

随着中国城市化不断发展, 人均收入的提高驱动着居民生活源活性氮排放的增加^[28], 而对城市居民食物氮消费的影响仅见于不同规模城市的案例研究^[7-10, 29], 涉及城市内部区域的研究尚缺。同时, 人口密度是影响区域氮素消费的主要因素, 氮素输入随着流域人口密度的增加而上升, 但其具体影响程度在高人口密度地

区有待于进一步考证^[30]。鉴于目前深圳市域已完成居民城市化,本研究选取城市区域人口密度与人均国内生产总值(人均 GDP)为体现人口城市化和经济城市化的主要指标^[31],采用线性回归分析方法^[30]探讨城市化对深圳城市区域食物氮足迹增加的影响。

从城市尺度角度来看,近十年中国城市人均食物氮足迹与人均 GDP 并未呈现明显的相关关系(图 3)。尽管深圳 2010—2015 年城市食物氮足迹总量增加,但其实现人均 GDP 翻一番的同时,人均食物氮足迹并没有显著提高,侧面说明城市人口增加是深圳城市食物氮足迹增长的主要驱动力。对于更小的城市区域尺度而言,以深圳市为例,2010 与 2015 两年城市区域人均食物氮足迹都与对应人均 GDP 存在明显相关关系(图 3),即随着经济城市化带来的人均 GDP 提高,人均食物消费导致的氮足迹也越高。针对城市人口密度增加,采用指数的方法进行拟合发现,区级尺度城市人口密度增量与对应食物氮足迹增量呈一定的非线性相关关系,其能够解释 66%的变异(图 4)。而在街道尺度上的分析却没有呈现同样的相关关系,尽管样本数远远大于前者(图 4),这说明了人口城市化发展与食物氮足迹变化不一定存在非线性相关关系,尤其是对于城市内部区域而言,这与前人研究表明中国城市化与食物氮足迹广泛存在非线性关系的结论有所不一致^[2]。

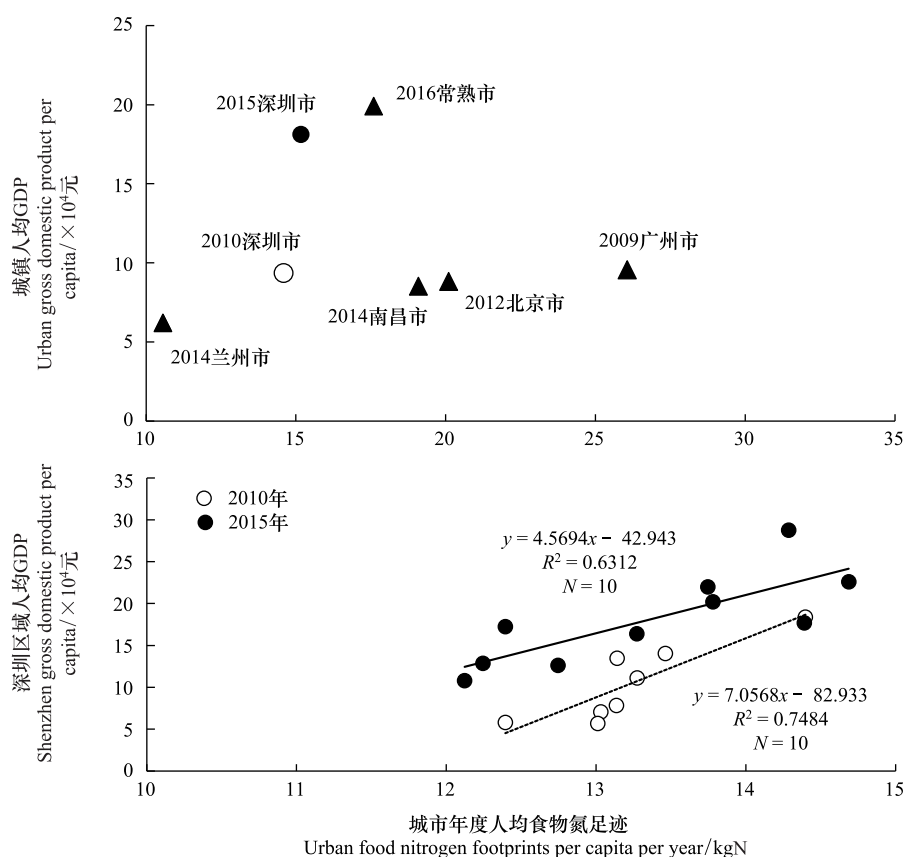


图 3 城市年度人均食物氮足迹与人均 GDP 相关分析

Fig.3 Correlation analysis of urban food nitrogen footprints per capita and GDP per capita per year

随着研究尺度缩小,城市食物氮足迹与人口城市化的关联性越低,但与经济城市化存在一定的关联性。以往研究中,城市化率的提高(即城市人口占总人口比例越高)意味着个人食物氮足迹越高的城镇居民人口增加,因其高氮荤食类食物消费远高于农村居民^[4,8],故城市总体食物氮足迹会随之增加,一般情况下两者会呈现一定的相关关系。然而,深入探讨经济城市化对居民食物消费的影响就不能局限于城镇与农村居民食物消费的对比^[32],对于城市化程度较高的城市而言,其食物氮足迹不再是受城镇与乡村居民人口数量改变而驱动,而更大程度上受不同类型的城镇居民人口数量及其食物消费结构影响,这类城市较少存在城镇与农村居

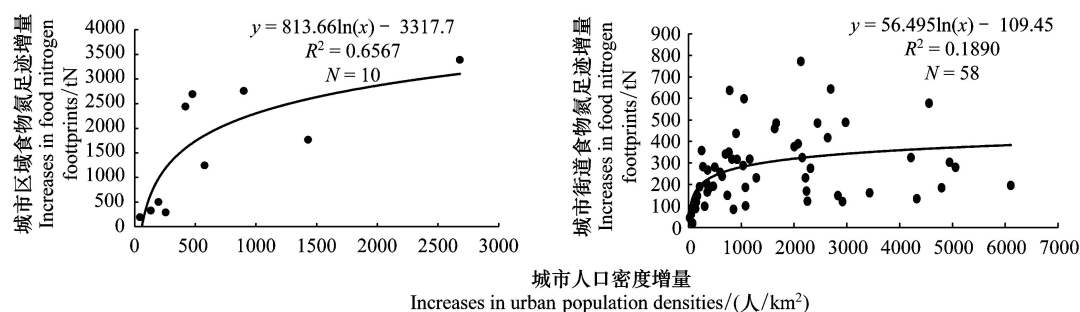


图4 2010—2015年食物氮足迹增量与城市人口密度增量相关分析

Fig.4 Correlation analysis of increases in urban food nitrogen footprints and urban population densities from 2010 to 2015

民人口比例此消彼长的情况,其主要存在着市内城镇居民身份的改变,以及移民迁入或市民迁出等不确定因素,而城市化率及城市人口密度等指标很难整体反映以上情况,但人均GDP等经济指标可不受人口成分的影响,其可反映居民可支配收入水平进而指示不同类型城镇居民的饮食倾向,高收入居民往往偏向高氮价高的食物消费^[4,8,32],故人均GDP可作为反映人均食物氮足迹变化趋势的主要指标之一,本文研究对象深圳市即为典型例子。在全国城市化快速发展的大背景下,这种情况将会逐渐普遍,尤其是在沿海人口流动频繁的较发达城市区域。

3 讨论

基于N-Calculator模型计算框架,本研究城市食物氮足迹估算考虑了城市固废与污水处理因素,同时采用更小尺度的实地参数,估算结果与用传统算法^[8,11]的结果相比,即采用统计年鉴上的城市行政区年末人口数以及外国食物虚拟氮因子,且不考虑不同区域及不同类型城市居民食物消费的差异性,忽略城市厨余垃圾与污水处理过程,可以得出2010—2015年深圳市食物氮足迹由24.49万t N a⁻¹增至29.77万t N a⁻¹,增幅21.55%,无论是城市食物氮足迹的总量还是多年增幅量,都分别远比本文估算结果大79.55%,95.73%和87.39%。本研究强调了城市生活垃圾与污水处理设施的氮污染物去除功能,其为导致以上两种估算方法结果巨大差距的重要因素,从而可能导致本文估算结果比相关城市案例研究结果低。对于三废处理设施较为完善的深圳市而言,这部分人工设施在城市生态系统中的“废物分解”功能不容忽视,2010—2015年间其削减了约80%食物消费氮足迹,但在深圳城市食物氮足迹的构成中,食物消费氮足迹多年仅占总足迹约8%,其大幅削减对城市食物氮足迹的整体降低贡献有限。在过去半个世纪,中国食物生产氮足迹增量及增速一直远超食物消费氮足迹^[6],故城市食物氮足迹的降低关键在于食物生产氮足迹的削减。

因深圳高度城市化及土地资源稀缺,其农业用地基本被完全占用为城市用地,只保留极少数畜禽养殖,居民食物消费所需农产品主要来源于市外陆续建立的农产品生产基地,故深圳居民食物消费导致的食物生产氮足迹便“外包于”这些食物原产地。以毗邻城市惠州市为例,其承接了深圳市外大部分粮蔬肉类生产活动^[33],2010—2015年间,惠州市农用化肥施用量及农业用电量分别剧增8.93%与3.99%^[34],农业面源氮流失以及能耗氮氧化物排放加重当地环境氮污染风险。从粤港澳大湾区角度而言,深圳农产品消费力强,可引领区域食用农产品消费,但其农产品供给能力处于湾区城市末位^[35],而拥有区位优势及丰富土地资源的惠州市便成为深圳主要粮食供应地区的不二之选,随着其农业结构调整和区域布局优化,渐渐成为继肇庆市之后大湾区农产品供给优势区域^[35]。根据《粤港澳大湾区发展规划纲要》^[36]要求,惠州需打造成粤港澳大湾区绿色农产品生产供应基地,未来其大规模推进农产品输出不可避免导致本区域面源污染压力增大,同时可能会抑制本地区城市化进展(研究期间惠州人口城市化率由59%降至50%,农业人口增加比例远高于城镇人口),这不仅不利于大湾区农业面源污染联合防控,也加深大湾区内部发展差距^[36]。在中国城市化过程这种情况并

不少见,如京津冀区域协同发展过程中,北京城市食物氮足迹大部分“外包于”扮演粮仓角色的河北省内各市,其食物生产氮足迹加重了食物原产地的氮污染风险,进而影响整体区域环境质量^[37]。对于市内农用地稀缺的深圳市而言,其无法在城郊地区发展“近郊农业”^[4]承担部分城市食物生产氮足迹来减少食物原产地过重的氮包袱,故深圳城市食物生产氮足迹的削减主要在于食物生产供应地区如惠州市的化肥使用及粪肥回用效率的提高,其可基于“氮补偿”机制跨市协助惠州市活性氮减排工作或专款财政支持惠州市发展现代农业^[37],同时可承接和扶持惠州高新技术产业,基于各自优势建立互联互通的食物与科技供需格局,保障惠州通过科技革新和现代农业满足城市经济发展需求的同时有足够资源针对面源污染防治,才能实质性促进深圳城市食物氮足迹的减少,进而达到大湾区内协调发展,协同减排的效果。

核算氮足迹为决策制定服务为氮足迹研究热点^[38]。因基于实地情况(如粮食生产地惠州等城市)的各类食物虚拟氮因子缺乏,本研究估算过程采用的是中国国家尺度的食物虚拟氮因子,不可避免给食物生产氮足迹估算结果带来误差。同时,鉴于深圳城市人口流动频繁,相当大部分暂留及住宿不稳定的居民可能未纳入人口普查,导致人口普查数据与现实城市生活消费人口数量仍有一定的差距,加之缺乏居民在外就餐数据相关统计数据,可能造成整体城市食物氮足迹的低估。但本研究首次将城市食物氮足迹分析尺度细化至城市内部行政区及街道区域尺度,并开展空间相关分析,揭示城市内部食物氮足迹变化的时空特征及其与城市化的关系,从城市管理角度能更为直观地为政府食物源氮污染防治提供科学与合理的建议。

4 结论

(1)2010—2015年,深圳市常住户籍居民人均食物氮足迹从 14.63 kg N a^{-1} 增加至 15.17 kg N a^{-1} ,高于非户籍居民食物氮足迹 13.09 kg N a^{-1} ,主要体现在瓜果、畜禽肉类、水产品等食物消费上。整体而言,2015年深圳市城市居民平均食物氮足迹为 14.13 kg N a^{-1} ,处于理论合理范围内,食物结构调整在降低个人食物氮足迹方面上仍具有很大潜力。

(2)深圳城市氮足迹呈增长趋势,5年增幅11.50%,增幅最大为常住户籍居民食物氮足迹,但目前深圳非户籍居民的食物消费主导着城市食物氮足迹。深圳城市内部食物氮足迹呈高度空间异质性和空间聚集性,城市内各区域增长量差异明显,新区增长量远远低于其他各区。街道尺度城市食物氮足迹增长热点分布具有与区级尺度不一致的特征,其主要分布在城市的西部沿海,部分热点区域增长数量级比肩区级尺度单位的增长量。城市内部区域食物氮足迹与人口城市化的关联性不明显,但与经济城市化存在一定的关联性。

(3)在外来移民落户增加及居民高氮饮食倾向的双重压力下,城市食物氮足迹的降低关键在于城外食物生产源活性氮流失的减少。在技术、财政、管理和规划整体层面上,开展城市区域间协同氮减排,同时注重城内食物氮足迹增长热点集中区域的三废处理设施升级及低氮饮食宣传,这些措施将有助于深圳市低氮发展,贯彻粤港澳大湾区协同可持续发展路线,同时也能为同类型高密度城市氮污染防治提供参考。

参考文献(References):

- [1] 孟繁盈,许月卿,张立金.中国城乡居民食物消费演变及政策启示.资源科学,2010,32(7):1333-1341.
- [2] 张少春,闵师,马瑞.城市化、食物消费转型及其生态环境影响.城市发展研究,2018,25(3):13-20.
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erisman 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] 赵宇,齐涛,葛汝冰,施亚岚,张国钦,叶红,李新虎,孙彩歌.中国食品源氮消费环境排放及其城乡差异.生态学报,2017,37(13):4573-4586.
- [5] Shibata H, Galloway J N, Leach A M, Cattaneo L R, Noll L C, Erisman J W, Gu B J, Liang X, Hayashi K, Ma L, Dalgaard T, Graversgaard M, Chen D L, Nansai K, Shindo J, Matsubae K, Oita A, Su M C, Mishima S I, Bleeker A. Nitrogen footprints: regional realities and options to reduce nitrogen loss to the environment. Ambio, 2017, 46(2): 129-142.
- [6] Guo M C, Chen X H, Bai Z H, Jiang R F, Galloway J N, Leach A M, Cattaneo L R, Oenema O, Ma L, Zhang F S. How China's nitrogen footprint of food has changed from 1961 to 2010. Environmental Research Letters, 2017, 12(10): 104006.

- [7] 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.
- [8] 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): 2413-2421.
- [9] 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. 江西科学, 2016, 34(4): 429-433.
- [10] 蔡建辉, 颜七笙. 兰州市城乡居民食物氮足迹测度及其动态分析. 湖北农业科学, 2017, 56(13): 2451-2454.
- [11] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, Erismann J M, 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.
- [12] Zhang Y, Yang Z F. Eco-efficiency of urban material metabolism: a case study in Shenzhen, China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3124-3131.
- [13] 吕永龙, 曹祥会, 王尘辰. 实现城市可持续发展的系统转型. 生态学报, 2019, 39(4): 1125-1134.
- [14] 雷林, 周海滨, 熊静帆, 徐健, 彭绩, 刘小立. 深圳居民膳食结构与膳食营养素摄入状况研究. 华南预防医学, 2011, 37(1): 25-28.
- [15] 罗贤如, 刘建平, 黄薇, 张锦周, 黄海雄, 李斌, 孙群露, 李维克. 深圳市外来务工人员营养与膳食调查. 中国热带医学, 2013, 13(5): 584-587.
- [16] 符茂真, 吴能简, 黄薇, 罗琼琳, 王红. 深圳坪山新区居民膳食营养状况. 公共卫生与预防医学, 2016, 27(3): 94-96.
- [17] 深圳市统计局. 深圳市 2015 年全国 1% 人口抽样调查主要数据公报. [2019-04-18]. http://www.sz.gov.cn/tjj/tjsj/tjgb1/201606/t20160614_3697000.htm.
- [18] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴(2010-2016). 北京: 中国统计出版社, 2010-2016.
- [19] 洗超凡, 潘雪莲, 甄泉, 韩宝龙, 姜亚琼, 周伟奇, 欧阳志云. 城市生态系统污染氮足迹与灰水足迹综合评价. 环境科学学报, 2019, 39(3): 985-995.
- [20] 邹启贤, 张金松, 曲志军. 深圳市三家污水处理厂的除磷脱氮工艺设计. 中国给水排水, 2003, 19(6): 79-81.
- [21] 李彦旻, 洗超凡, 徐刚, 欧阳志云. 城市污水氮污染排放特征及来源探讨——以北京市海淀区为例. 环境科学学报, 2017, 37(1): 146-153.
- [22] 周率. 污水—污泥处理系统氮足迹模型构建及实证分析[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [23] Cui S H, Shi Y L, Malik A, Lenzen M, Gao B, Huang W. A hybrid method for quantifying China's nitrogen footprint during urbanisation from 1990 to 2009. Environment International, 2016, 97: 137-145.
- [24] 孙秀峰, 施开放, 吴健平. 县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态. 环境科学, 2018, 39(6): 2971-2981.
- [25] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的实证. 环境科学学报, 2020, 40(2): 697-706.
- [26] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2016). 北京: 人民卫生出版社, 2016.
- [27] 代迪尔. 深圳市流动人口现状与趋势研究. 现代商贸工业, 2016, 37(32): 17-18.
- [28] Xian C F, Zhang X L, Zhang J J, Fan Y P, Zheng H, Salzman J, Ouyang Z Y. Recent patterns of anthropogenic reactive nitrogen emissions with urbanization in China: Dynamics, major problems, and potential solutions. Science of the Total Environment, 2019, 656: 1071-1081.
- [29] 张雅娟, 王延华, 杨浩, 蔡祖聪. 常熟市食物氮足迹的量化及其影响因素研究. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 62-69.
- [30] 张汪寿, 李叙勇, 杜新忠, 郝韶楠. 流域人类活动净氮输入量的估算、不确定性及影响因素. 生态学报, 2014, 34(24): 7454-7464.
- [31] 刘巧婧, 王莉红. 城市化与生态环境耦合协调关系研究——以杭州市为例. 环境科学学报, 2018, 38(10): 4214-4222.
- [32] Seto K C, Ramankutty N. Hidden linkages between urbanization and food systems. Science, 2016, 352(6288): 943-945.
- [33] 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举. 珠江三角洲人为氮源排放清单及特征. 环境科学, 2010, 31(5): 1146-1151.
- [34] 惠州市统计局. 惠州统计年鉴(2010-2016). 北京: 中国统计出版社, 2010-2016.
- [35] 万俊毅, 韩亚丽. 粤港澳大湾区食用农产品供给能力与农业产业链功能的市域比较. 华南理工大学学报: 社会科学版, 2019, 21(6): 9-20.
- [36] 新华社. 中共中央 国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》. [2020-03-01]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-02/18/c_1124131474_3.htm.
- [37] 洗超凡, 王莉雁, 逮非, 郑华, 欧阳志云. 基于“氮补偿”机制及数据包络分析的活性氮减排评价——以京津冀区域为例. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2545-2553.
- [38] 徐昌城, 曾悦. 氮足迹模型应用进展研究. 环境科学与管理, 2016, 41(8): 47-51.