

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.03.022

基于 N-Calculator 模型的城镇居民 氮足迹估算及动态分析

李娜^{1,2,3}, 宁默⁴, 吕光辉^{1,3,5}

1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;
2. 新疆维吾尔自治区林业生态监测总站, 乌鲁木齐 830006;
3. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046;
4. 水利部新疆水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000;
5. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 运用 N-Calculator 模型, 在 1995—2016 年乌鲁木齐市城镇居民各类食物消费统计量的基础上估算乌鲁木齐市城镇居民氮足迹, 并分析其氮足迹的动态变化特征和影响因素。结果表明: ① 1995—2016 年, 乌鲁木齐市区域总氮足迹和人均氮足迹均增长, 其中, 人均食物氮足迹占比大, 能源氮足迹占比小但增长最快; ② 城镇人均食物生产氮足迹在人均食物氮足迹中占主导地位, 畜肉类、粮食、蔬菜、水产品、蛋类和水果类生产氮足迹影响着食物氮足迹; ③ 柴油和汽油对乌鲁木齐市人均能源氮足迹贡献最大, 交通是能源氮足迹的主要影响因素; ④ 乌鲁木齐市氮足迹低于经济发达地区。

关键词: 氮足迹; 食物生产; N-Calculator 模型; 乌鲁木齐市城镇居民

中图分类号: F062.2; X22

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2022)03-0194-10

Estimation and Dynamic Analysis of Nitrogen Footprint of Urban Residents Based on N-Calculator Model

LI Na^{1,2,3}, NING Mo⁴, LYU Guanghui^{1,3,5}

1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. Xinjiang Forestry Ecological Monitoring Station, Urumqi 830006, China;
3. Institute of Arid Ecological Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
4. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Research Institute, Ministry of Water Resources, Urumqi 830000, China;
5. Key Laboratory of Oasis Ecology Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: This study used the N-Calculator model to estimate the nitrogen footprint of urban residents in Urumqi on the basis of various food consumption statistics of urban residents in Urumqi from 1995 to

收稿日期: 2021-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560131)。

作者简介: 李娜, 硕士研究生, 主要从事生态经济的研究。

通信作者: 吕光辉, 教授, 博士研究生导师。

2016, then analyzed the dynamic characteristics and influencing factors of nitrogen footprint. The results showed that: ① From 1995 to 2016, both the regional total nitrogen footprint and per capita nitrogen footprint of Urumqi City increased. Among them, per capita food nitrogen footprint accounted for a large proportion, energy nitrogen footprint accounted for a small proportion but the fastest growth; ② Urban per capita food production nitrogen footprint is dominant in the per capita food nitrogen footprint. The nitrogen footprint of livestock meat, grain, vegetables, aquatic products, eggs and fruits production affects the food nitrogen footprint; ③ Diesel and gasoline contribute the most to the per capita energy nitrogen footprint of Urumqi, and transportation is the main influencing factor of energy nitrogen footprint; ④ Urumqi's nitrogen footprint is lower than that of economically developed regions.

Key words: nitrogen footprint; food production; N-Calculator model; urban residents of Urumqi

氮不仅是影响陆地生态系统功能和过程的基本元素和重要因素,而且是难以控制的污染物^[1].到2010年,陆地上产生的氮有75%来源于人类活动,人类氮创造量是陆地天然氮的3倍多^[2].因此,人类活动显著地干扰了自然氮循环,导致酸雨、水体富营养化或土壤酸化等环境问题^[3-4]产生.然而,准确评估人类生产活动和生活方式对氮排放的负面影响仍然是一个严峻的挑战,人们很难确定一个最佳策略以减少人类活动造成的氮排放^[5].

氮足迹是在引入生态足迹、碳足迹和水足迹概念后发展起来的一个新的足迹概念^[6].通过对各种类型足迹的研究来优化人类活动,对环境保护措施的有效性产生了相当大的积极影响^[7].Leach等人^[8]将氮足迹定义为一个实体因资源消耗而释放到环境中的活性氮总量,以氮单位表示,并开发了用于氮足迹估算的氮计算器模型(N-Calculator, <http://n-print.org>).这种方法主要用于国家一级^[8]和城镇一级^[9-10]的估算.由于区域特征和人类活动的多样性,N-Calculator模型在不同实体中的应用比较困难,因此,不同的氮足迹计算模型和方法被开发出来,如Gu等人^[11]在氮质量平衡方法的基础上开发了一个新的国家氮足迹模型,估算人与自然耦合系统(CHANS)下中国的氮足迹;Leach等人^[12]和Leip等人^[13]开发了用于估算机构氮足迹的N-institution模型和用于估算事件和活动的N-neutrality模型;周涛等人^[14]使用改进的N-Calculator模型研究了广东农业氮足迹.然而,与N-Calculator模型相比,这些方法对消费者行为的关注较少.有研究表明,食品生产和消费产生的氮排在氮足迹中起到了重要作用,占其总价值的68.2%~91.1%^[8,15-16].因此,了解不同食物群体的氮足迹对于减缓人类活动所造成的氮排放至关重要^[17].

目前,国内对氮足迹的研究多集中于食物氮足迹,而忽略了能源对氮足迹的贡献,这会导致氮足迹估算结果偏低.本研究基于N-Calculator模型的主要框架估算1995—2016年乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹和人均食物氮足迹,并分析其动态变化特征,以期为居民合理饮食与消费提供科学依据,更好地理解城市生态-经济可持续发展.

1 研究区概况和研究方法

乌鲁木齐市位于亚欧大陆腹地,地处北天山北麓、准噶尔盆地南缘,地处东经 $86^{\circ}37'33''$ — $88^{\circ}58'24''$,北纬 $42^{\circ}45'32''$ — $44^{\circ}08'00''$.全市面积为 $14\,216.3\text{ km}^2$,辖7区1县,天山区、沙依巴克区、高新技术开发区(新市区)、水磨沟区、经济技术开发区(头屯河区)、达坂城区、米东区和乌鲁木齐县^[18].

1995至2016年,乌鲁木齐市人均生产总值由10381元增长到69865元,以年均16%的速率平稳增长,人均可支配收入快速增长,由4851元增长到34190元.与此同时,人口增长迅速,1995年城市常住人口117.5万人,2016年达到218.46万人,人均食品消费量由1995年的330.37 kg增加到2016年的423 kg,而人均食品消费支出占生活消费支出的比重则由1995年的50%下降到2016年的29%^[18].

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究数据主要来源于 1996—2017 年的《乌鲁木齐市统计年鉴》^[18]和《中国能源统计年鉴》^[19], 由于 2000 年后乌鲁木齐城市居民禽肉类年人均消费量数据缺乏, 故采用《乌鲁木齐市统计年鉴》中“城市居民家庭按收入分组的人均消费性支出”上的购买肉禽类的总平均支出除以当年肉禽类价格得到. 2001—2017 年居民购买肉禽类的价格, 采用《2014 中国价格统计年鉴》^[20]中 2013 年乌鲁木齐市食物 12 个月份平均价格数据, 并利用历年《乌鲁木齐市统计年鉴》中居民消费价格分类指数推算得到^[10].

2.2 氮足迹计算方法

2.2.1 食物氮足迹计算方法

N-Calculator 模型是一种衡量个人在食物和能源消费活动中产生的氮污染的方法, 它是基于消费端的氮足迹, 并纳入了隐含的生产性氮足迹. N-Calculator 模型主要由个人的食物氮足迹和能源氮足迹组成, 食物氮足迹(FP_f)又分为食物消费氮足迹(FP_c)和食物生产氮足迹(FP_p).

$$FP_f = FP_c + FP_p \quad (1)$$

食物消费氮足迹(FP_c)指人类消费食品产生的氮足迹. 当前对于该足迹的计算普遍采用:

$$FP_c = \sum_{i=1}^n (A_i * N_i) \quad (2)$$

式中: A_i 表示第 i 类的人均食物消耗量, N_i 表示第 i 类食物的氮含量. 本研究假设人类消耗的所有氮都作为人类废物排放到环境中. 乌鲁木齐市居民消费的主要食物类型有: 素食(如谷类和蔬菜)、动物性食品(如畜肉、禽肉和鱼、虾等水产品)、副食(如鸡蛋、奶制品和水果). 人均食物消费量可通过查阅相关政府统计资料获得; 食物含氮量可查阅相关食品的蛋白质含量乘以 16% 计算(表 1)^[9].

这里的食物生产氮足迹(FP_p)我们称为虚拟氮足迹, 即在食物生产过程中产生的不会被人类直接消耗的任何氮, 包括在农田、牲畜养殖和食物加工上施用氮肥所损失的所有氮^[8]. 虚拟氮因子(VNF)是基于食物生命周期前端消耗所涉及的氮损失量. 为了明确界限, 避免重复计算, 在计算虚拟氮时, 一般不考虑食物生产过程中能源消耗造成的氮损失. 氮的损失归因于能量氮足迹. 食物生产氮足迹的计算公式为:

$$FP_p = \sum_{i=1}^n (A_i * VNF_i) \quad (3)$$

式中: A_i 表示第 i 类人均食物消耗量; VNF_i 表示第 i 类食物的虚拟氮因子(表 1)^[10].

表 1 不同食物氮含量与虚拟氮因子

种类	氮含量/(g · kg ⁻¹)	虚拟氮因子	种类	氮含量/(g · kg ⁻¹)	虚拟氮因子
粮食	14.40	1.40	禽肉类	29.90	3.40
蔬菜	1.76	10.60	水产品	28.77	3.00
瓜果	1.60	10.60	蛋类	20.48	3.4
畜肉类	29.22	4.70	奶类	5.28	5.7

2.2.2 能源氮足迹计算方法

能源氮足迹主要是指在家庭生活、交通运输以及商品和服务生产中, 石油、天然气和燃料的燃烧所排放的氮氧化物. 本研究通过自上而下法^[8](Top-down)进行能源氮足迹计算, 计算公式为:

$$FP_e = \sum_{i=1}^n (F_i * NE_i / P) \quad (4)$$

式中: FP_e 为 Top-down 法计算的能源氮足迹; F_i 为国家 i 类能源消耗量; NE_i 为 i 类能源的氮排放因子, P 为一个国家的人口数. 国家能源消耗和人口数据摘自《中国统计年鉴》^[21]和《中国能源统计年鉴》^[19]. 表 2 列出了不同能源的氮排放因子^[22].

表 2 分能源各部门的氮氧化物排放因子

类型	氮氧化物排放因子/(kg·t ⁻¹)							
	煤	焦炭	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气
生活消费	1.88	2.25	16.70	2.49	3.21	1.95	0.88	1.46
交通	7.50	9.00	21.20	27.40	39.27	39.27	18.10	2.09
商业与服务	3.75	4.50	16.70	4.48	5.77	3.50	1.58	1.46

注: 天然气的氮氧化物排放因子单位为 g·m⁻³.

3 结果与分析

3.1 乌鲁木齐市城镇区域氮足迹的动态变化

1995—2016 年乌鲁木齐市城镇区域氮足迹一直处于变化中(图 1), 由 18 225.35 t/a 增加到 48 039.11 t/a, 平均每年增加 1 355 t; 乌鲁木齐城镇区域食物氮足迹总量由 16 853.00 t/a 一直增加到 2016 年 35 521.42 t/a, 平均每年增加 849 t. 乌鲁木齐城镇区域氮足迹和食物氮足迹均呈逐步上升趋势, 在 2014 年到达峰值(52 338.54 t/a 和 38 417.89 t/a), 随后略有下降. 而能源氮足迹呈逐步上升趋势, 由 1 359.53 t/a 增加到 12 517.69 t/a, 平均每年增加 507 t. 我们发现食物氮足迹主导氮足迹的变化, 说明氮足迹的增长可能与食物消费有关. 1995—2016 年乌鲁木齐市的城镇居民由 128 万人增加到 218 万人, 居民食物消费量由 252 kg 增加到 423 kg, 从侧面证明了城镇人口的增长带来食物氮素需求的持续增长, 区域人口数量的变化, 也会引起区域内食物氮足迹总量的变化.

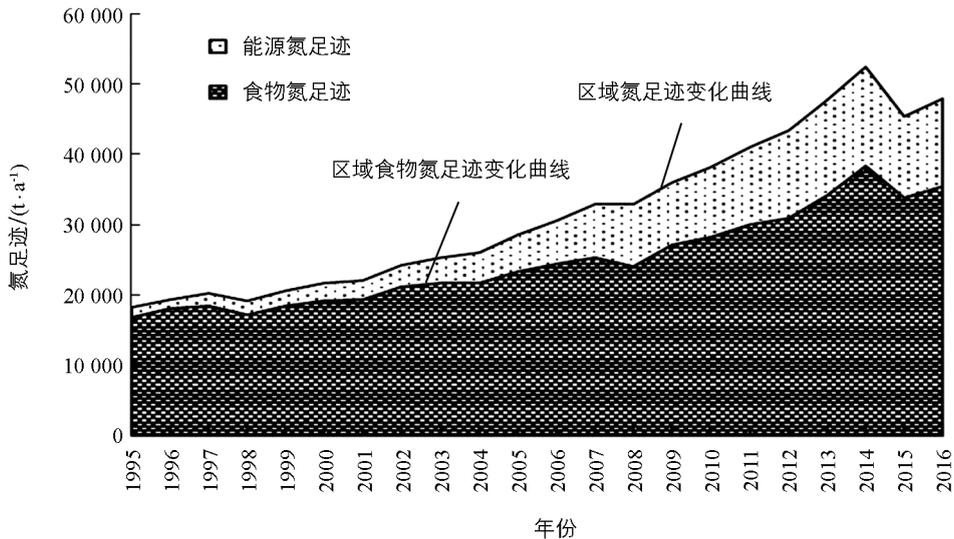


图 1 乌鲁木齐市城镇区域氮足迹和食物氮足迹总量的变化

1995—2016 年期间乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹组成及变化见图 2. 从图 2 中可以看出, 1995—2016 年, 乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹从 14.21 kg/a 增加到 21.99 kg/a, 呈波动式增长, 增幅为 54.75%; 其中, 人均食物消费氮足迹从 2.78 kg/a 增长到 3.39 kg/a, 增幅为 21.94%, 而人均食物生产氮足迹从 10.37 kg/a 增长到 12.87 kg/a, 增幅与人均食物消费氮足迹相近, 为 24.11%. 能源氮足迹增长最快, 从 1995 年的 1.06 kg/a 增长到 2016 年的 5.73 kg/a, 增长了 440.57%. 这些结果表明, 能源消耗引起的氮排放是造成乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹增长的主要原因.

如图 3 所示, 1995—2016 年, 乌鲁木齐市人均食物生产氮足迹和食物消费氮足迹所占比例呈逐年下降趋势, 平均比例分别为 64.57% 和 16.64%, 合计占氮足迹的 81.21%. 能源氮足迹在氮足迹中所占比例很低, 但其比例迅速增加(从 7.64% 上升到 26.06%). 虽然能源氮足迹的增长高于食物氮足迹, 但食物氮足迹仍然占氮足迹的主要部分, 1995—2016 年食物氮足迹平均占比约为能源氮足迹平均占比的 5 倍. 这意味

着排放到环境中的氮主要来自居民的食物生产和消费.

3.2 乌鲁木齐市城镇居民人均食物氮足迹的动态变化

如图 3 所示,食物氮足迹占氮足迹的比例较高. 因此,深入了解城镇居民食物氮足迹的动态变化特征和差异对减轻乌鲁木齐市氮负荷具有重要意义. 1995—2016 年乌鲁木齐市城镇居民人均食物氮足迹、人均食物生产氮足迹和人均食物消费氮足迹结构变化见图 4,乌鲁木齐市城镇居民人均食物氮足迹、人均食物生产氮足迹和人均食物消费氮足迹均以素食和动物性食品为主,在人均食物氮足迹中,平均 40% 的食物氮足迹来自动物性食品,其中 2/3 来自畜肉类(27.45%),其次为禽肉类和水产品;对于素食产品,粮食和蔬菜各占 1/2,分别为 18.71% 和 18.40%. 水果类、奶类和蛋类副食品平均占 9.61%,6.96% 和 6.32%;人均食物生产氮足迹与人均食物氮足迹相似,动物性食品占食物生产氮足迹的 40%,其中 2/3 来自畜肉类(28.41%),其次为禽肉类和水产品;对于素食产品,蔬菜占比大于粮食,分别为 21.16% 和 13.89%. 水果类、奶类和蛋类副食品平均占 11.07%,7.37% 和 6.11%;而人均食物消费氮足迹与人均氮足迹和人均生产氮足迹有所不同,素食(46.07%)占比大于动物性食品(37.75%),副食品中占比从大到小则依次为:蛋类(7.15%)、奶类(5%)、水果类(4.03%).

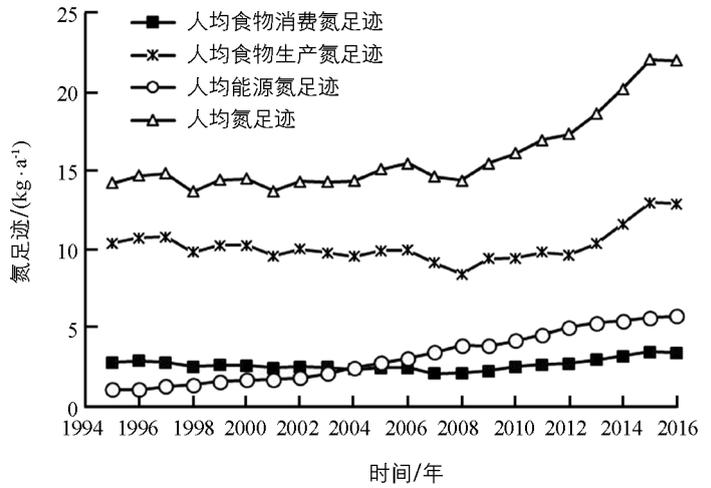


图 2 乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹的变化

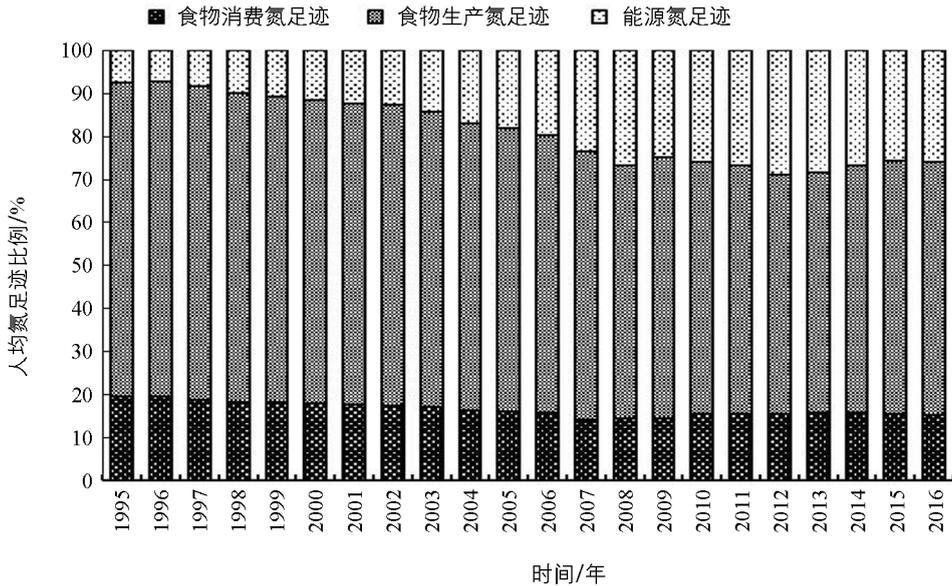
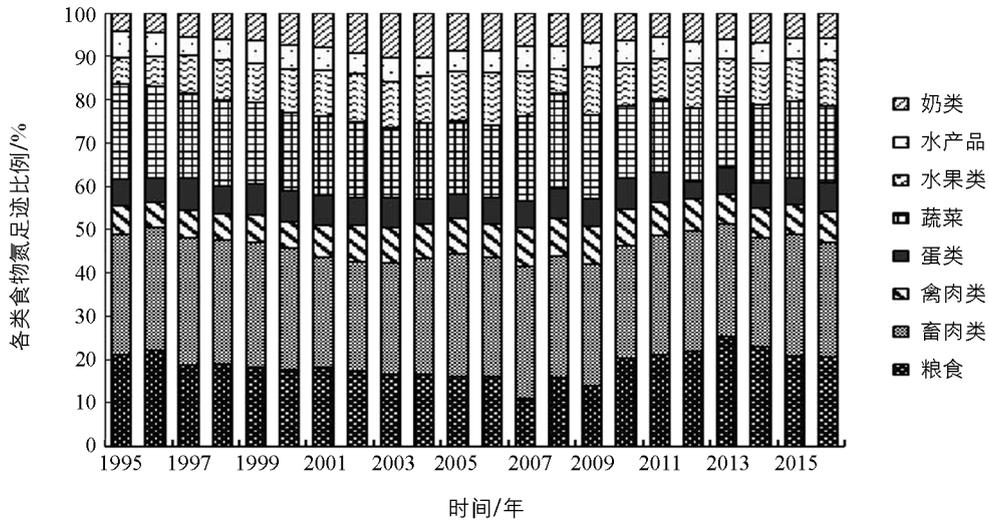
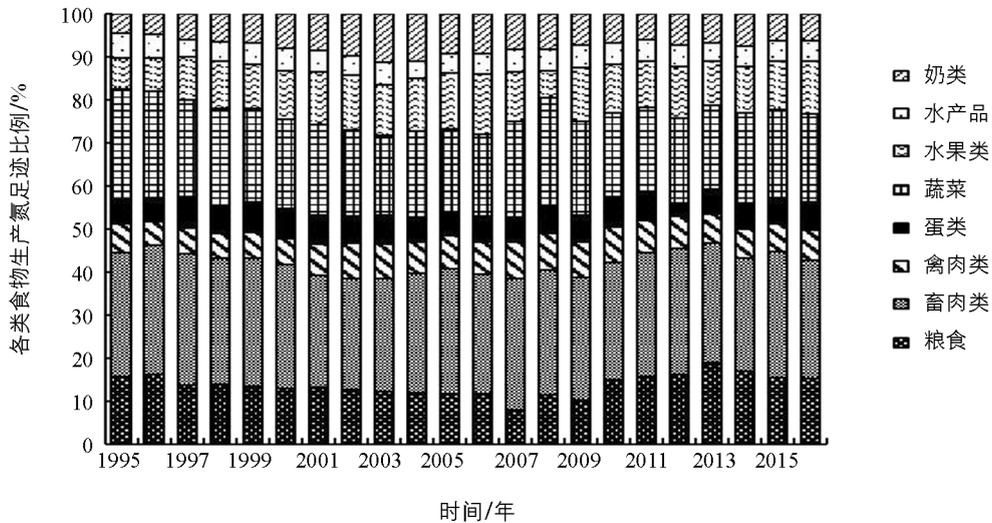


图 3 乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹结构的变化

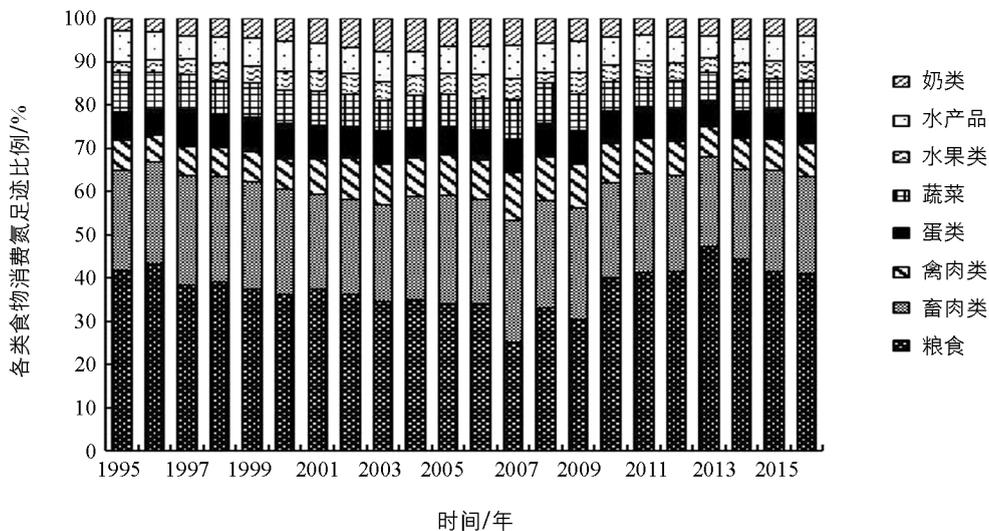
人均食物氮足迹中人均食物生产氮足迹平均占比最高(图 3),为 64.57%,将各类食物生产氮足迹年变化做分析后发现(图 5),1995—2016 年水产品、蛋类和禽肉类食物生产氮足迹均呈平稳趋势,粮食、蔬菜和畜肉类先波动下降后波动上升,水果类呈上升—下降—上升趋势,而奶类则为先上升后下降趋势. Person 相关分析结果表明,畜肉类、粮食、蔬菜、水产品、蛋类和水果类生产氮足迹与人均食物生产氮足迹呈正相关,相关系数分别为 0.911,0.803,0.739,0.724,0.635,0.598($p < 0.01$),说明人均食物生产氮足迹随着畜肉类、粮食、蔬菜、水产品、蛋类和水果类生产氮足迹的增长而增长,这在一定程度上揭示了高氮食物的生产对食物氮足迹的变化具有显著的影响.



a. 乌鲁木齐市城镇居民人均食物氮足迹结构变化



b. 乌鲁木齐市城镇居民人均食物生产氮足迹结构变化



c. 乌鲁木齐市城镇居民人均食物消费氮足迹结构变化

图4 1995—2016年乌鲁木齐市城镇居民人均食物氮足迹、人均食物生产氮足迹和人均食物消费氮足迹结构变化

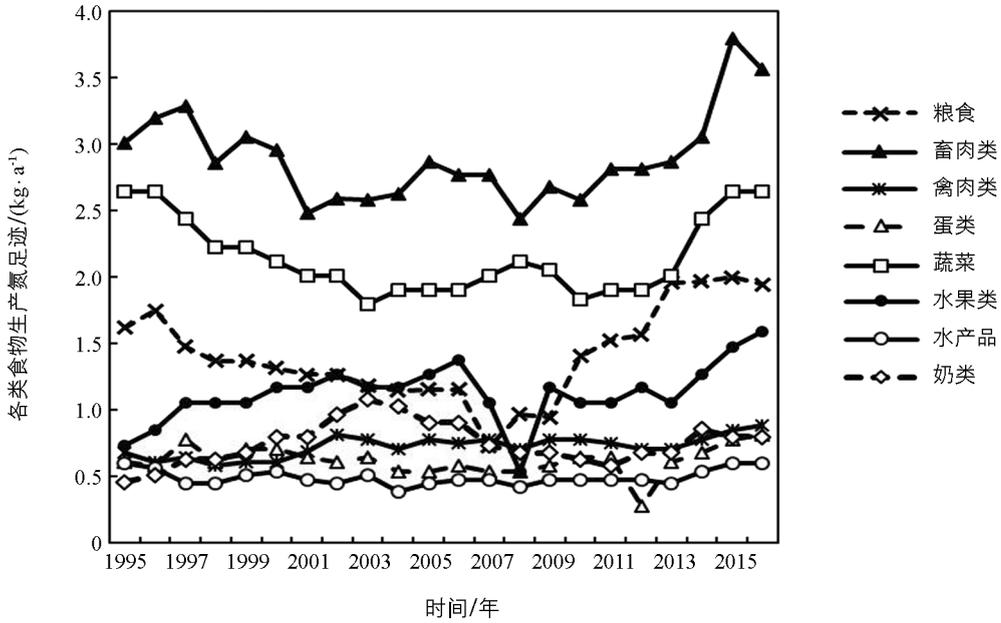


图 5 1995—2016 年乌鲁木齐市城镇居民各类食物生产氮足迹变化

3.3 乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹的动态变化

从图 6 得知，乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹随着城市化的不断发展，呈波动上升趋势，人均能源氮足迹逐年增长，增长率为 8.39%，其中，柴油和汽油一直是对其影响最大的两个因素，其年均增长率分别为 1.71% 和 0.43%；煤油、燃料油、液化石油气和天然气的能源氮足迹逐年增长，其年增长率分别为 2.76%、0.33%、1.83% 和 20.10%；焦炭的能源氮足迹则逐年下降，年增长率出现了负增长，为 -11.15%，这可能与产业结构调整 and 能源优化有关。

能源对能源氮足迹的贡献率从大到小依次为：柴油(53.12%)，汽油(17.67%)，燃料油(11.13%)，煤(9.54%)，煤油(7.23%)，天然气(0.63%)，液化石油气(0.52%)，焦炭(0.16%)。由此可知，柴油和汽油是能源氮足迹增长的主要因素，二者对能源氮足迹贡献率达到了 70.79%。

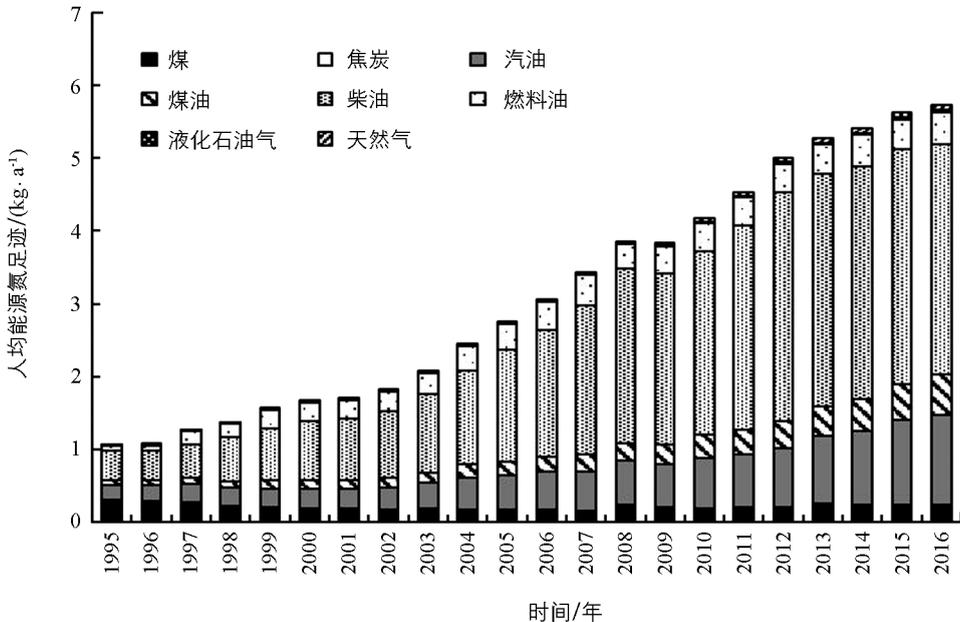


图 6 1995—2016 年乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹

根据学者们的研究，能源氮足迹的计算被划分为 3 个类型：生活消费、交通、商业与服务业。对比 1995 年和 2016 年乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹的 3 个类型所占比例发现(图 7)，交通占比最大，其

次为生活消费,商业与服务业占比最小。而1995—2016年,交通占比变大,而生活消费、商业与服务业所占占比变小,由此可见,交通是能源氮足迹的主要影响因素,而柴油与汽油又是交通运输工具的主要燃料,因此,交通在能源氮足迹中占主导地位。

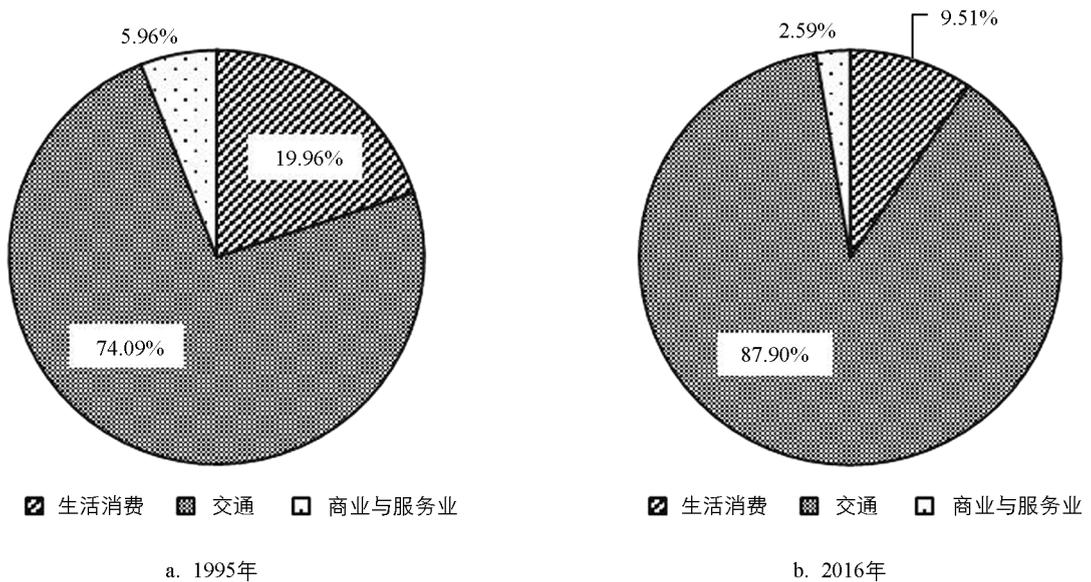


图7 1995年和2016年乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹占比

3.4 不同地区氮足迹的比较

将乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹与其他地区进行比较(图8)。乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹为15.96 kg/a,这一数值低于广州(30.15 kg/a)和闽江流域(31.90 kg/a),仅高于遵义(13.47 kg/a)^[9,17,24]。

各区域食物氮足迹范围从10.1 kg/a(遵义)到22.61 kg/a(广州),乌鲁木齐市食物氮足迹为12.84 kg/a,较接近遵义的食物氮足迹,但低于其他地区。食物氮足迹占各地区氮足迹的比例大(74.98%~80.45%),这说明,在这些地区,粮食生产过程中产生的氮排放量最大。

乌鲁木齐市城镇居民人均能源氮足迹为3.12 kg/a,比遵义(3.37 kg/a)、闽江流域(5.3 kg/a)和广州(7.54 kg/a)的人均能源氮足迹小。这可能是由于这3个地区的工业较乌鲁木齐发达,能源消耗造成的氮排放量较大导致的。人均能源氮足迹占各地区人均氮足迹的比例小(19.55%~25%),但增长很快。在1995—2016年期间,乌鲁木齐市人均能源氮足迹增加了5倍,并且比人均食物氮足迹的增长更快。可以看出,随着社会的不断发展,人类活动越来越依赖能源。

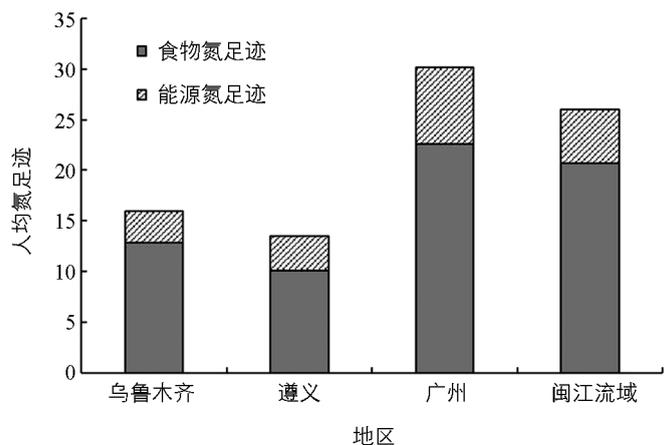


图8 不同地区人均氮足迹比较

4 讨论

乌鲁木齐市城镇居民人均氮足迹22年来增幅为54.75%,其中人均能源氮足迹增幅最大,为440.57%,但食物氮足迹依然是氮足迹的主要部分,其平均占比约为能源氮足迹平均占比的5倍。这与Galloway对全球的氮研究发现食物生产的氮生成量是能源生产的5倍的结果相似^[3]。因此,控制食物生产过程中的氮排放,提高食物生产中氮的利用率,减少食物浪费,将是减少氮足迹的主要策略。对食物和氮

足迹的快速增长缺乏适当的控制可能会进一步加剧对乌鲁木齐市脆弱环境的威胁。此外,有研究发现,随着工业的不断发展,人类活动越来越依赖能源^[31-32]。能源氮足迹占氮足迹的比例小,但增长很快,许多国家注意到这一点并开始使用氮排放量较低的能源。荷兰拥有世界上最发达的风力发电^[33],日本拥有最高的核能利用率^[34]。此外,德国对绿色能源的利用率很高^[35]。因此,大力发展绿色能源应是减少乌鲁木齐市氮足迹的有效途径^[36]。

本研究估算的氮足迹结果低于李玉炫等人^[9]估算的广州人均食物氮足迹和 Zeng 等人^[17]估算的闽江流域人均食物氮足迹。这可能是因为乌鲁木齐市作为一个二线城市,其城市化水平和人口远远低于国内一线城市广州和经济发达的闽江流域。另一方面,李玉炫等人^[9]对能源氮足迹的估算方法与本研究不同,其默认能源氮足迹为总氮足迹的 25%,本研究则运用 Top-down 法对能源氮足迹进行估算,相较前者,估算结果可能更为准确,具有一定的参考价值。

5 结论

本研究运用 N-Calculator 模型对乌鲁木齐市 1995—2016 年的氮足迹进行了估算,并对其特征进行了综合分析。乌鲁木齐市氮足迹由 14.21 kg/a 波动至 21.99 kg/a,平均值为 15.95 kg/a。相比之下,能源氮足迹所占比例很小,但增长很快。乌鲁木齐城镇居民人均食物氮足迹、人均食物生产氮足迹和人均食物消费氮足迹均以素食和动物性食品为主。食物生产氮足迹在食物氮足迹中占主导地位,畜肉类、粮食、蔬菜、水产品、蛋类和水果类生产氮足迹影响着食物氮足迹。能源中柴油和汽油是对乌鲁木齐市人均能源氮足迹贡献最大的两个因素,交通是能源氮足迹的主要影响因素。随着城市化进程的加快和人口的增长,乌鲁木齐市氮足迹以 1 355 t/a 的速度增长,这表明,控制食物生产过程中的氮排放,提高粮食生产中的氮利用率,优化居民的饮食结构,保持合理的低氮饮食习惯,使用清洁能源,是缓解乌鲁木齐市的足迹增长,解决这一问题的重要途径。

最后,通过本研究,可以得出一个结论,随着城市化的不断发展,氮势必会成为人类生活与城市生态系统的重要组成部分,并影响着城市可持续发展,因此,运用城市个人氮足迹的概念来引导人们低氮生活对其他城市也具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions [J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [2] GALLOWAY J N, WINIWARTER W, LEIP A, et al. Nitrogen Footprints: Past, Present and Future [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11): 115003.
- [3] GALLOWAY J N, ABER J D, ERISMAN J W, et al. The Nitrogen Cascade [J]. *BioScience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [4] 徐昌城,曾悦. 氮足迹模型应用进展研究 [J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(8): 47-51.
- [5] MARTINELLI L A, HOWARTH R W, CUEVAS E, et al. Sources of Reactive Nitrogen Affecting Ecosystems in Latin America and the Caribbean: Current Trends and Future Perspectives [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 79(1/2): 3-24.
- [6] 方恺. 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.
- [7] GEPHART J A, DAVIS K F, EMERY K A, et al. The Environmental Cost of Subsistence: Optimizing Diets to Minimize Footprints [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 120-127.
- [8] 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.
- [9] 李玉炫,王俊能,许振成,等. 广州食物氮足迹估算与分析 [J]. *广东农业科学*, 2012, 39(6): 137-140.
- [10] 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*, 2016, 36(8): 2413-2421.
- [11] GU B J, LEACH A M, MA L, et al. Nitrogen Footprint in China: Food, Energy, and Nonfood Goods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16): 9217-9224.

- [12] LEACH A M, MAJIDI A N, GALLOWAY J N, et al. Toward Institutional Sustainability: a Nitrogen Footprint Model for a University [J]. Sustainability: the Journal of Record, 2013, 6(4): 211-219.
- [13] LEIP A, LEACH A, MUSINGUZI P, et al. Nitrogen-Neutrality: a Step towards Sustainability [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(11): 115001-1-115001-10.
- [14] 周涛,王云鹏,王芳,等. 广东省农业氮足迹分析 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2430-2438.
- [15] 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.
- [16] SHIBATA H, GALLOWAY J N, LEACH A M, et al. Nitrogen Footprints: Regional Realities and Options to Reduce Nitrogen Loss to the Environment [J]. Ambio, 2017, 46(2): 129-142.
- [17] ZENG Y, XU C C, WANG Q F, et al. Basin-Scale Estimation of Nitrogen Footprint and Corresponding Dynamic Change Characteristics: a Case Study [J]. Environmental Development, 2019, 29: 81-93.
- [18] 乌鲁木齐市统计局. 乌鲁木齐市统计年鉴(1996-2017) [M]. 北京: 中国统计出版社, 1996-2017.
- [19] 国家统计局能源统计司, 中国能源统计年鉴(1996-2017) [M]. 北京: 中国统计出版社, 1996-2017.
- [20] 国家统计局城市社会经济调查司. 2014 中国价格统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [21] 国家统计局. 中国统计年鉴(1996-2017) [M]. 北京: 中国统计出版社, 1996-2017.
- [22] KATO N, AKIMOTO H. Anthropogenic Emissions of SO₂ and NO_x in Asia: Emission Inventories [J]. Atmospheric Environment Part A General Topics, 1992, 26(16): 2997-3017.
- [23] 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.
- [24] 张宝成,李德辉,丁奎婷,等. 2000-2015 年遵义市城乡居民氮消费足迹分析 [J]. 现代农业科技, 2019(8): 169-171, 177.
- [25] 于洋,崔胜辉,赵胜男,等. 城市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.
- [26] 李彦旻,冼超凡,肖强,等. 城市居民食物氮消费变化特征与趋势预测——以重庆市为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 131-135.
- [27] PIERER M, WINIWARTER W, LEACH A M, et al. The Nitrogen Footprint of Food Products and General Consumption Patterns in Austria [J]. Food Policy, 2014, 49: 128-136.
- [28] HUTTON M O, LEACH A M, LEIP A, et al. Toward a Nitrogen Footprint Calculator for Tanzania [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(3): 034016-1-034016-11.
- [29] 刘萍,刘国勇. 乌鲁木齐市居民牛羊肉消费及其影响因素分析 [J]. 江苏科技信息, 2015(3): 20-22.
- [30] CLEMENTS B, DYBCZAK K, GASPAR V, et al. The Fiscal Consequences of Shrinking and Ageing Populations [J]. Ageing International, 2018, 43(4): 391-414.
- [31] 冼超凡,欧阳志云. 城市生态系统氮代谢研究进展 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2548-2557.
- [32] 钱萍,马彩虹. 中国能源消费碳排放时空动态变化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(10): 93-100.
- [33] TALEGHANI M, TENPIERIK M, VAN DEN DOBBELSTEEN A, et al. Energy Use Impact of and Thermal Comfort in Different Urban Block Types in the Netherlands [J]. Energy and Buildings, 2013, 67: 166-175.
- [34] DUFFIELD J S, WOODALL B. Japan's New Basic Energy Plan [J]. Energy Policy, 2011, 39(6): 3741-3749.
- [35] KNAUT A, TODE C, LINDENBERGER D, et al. The Reference Forecast of the German Energy Transition-An Outlook on Electricity Markets [J]. Energy Policy, 2016, 92: 477-491.
- [36] 韩红蕾. 可持续绿色经济发展的影响因素和转化路径 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 74-79.