全桂杰, 陈东湘, 吴绍华, 等. 水稻和蔬菜的膳食结构变化对农村居民镉摄入健康风险的影响——以珠海市斗门区为例[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 2002-2010.

TONG Gui-jie, CHEN Dong-xiang, WU Shao-hua, et al. Effects of changes in rice- and vegetable-based dietary structure on health risk from cadmium intake for rural residents: A case study of Doumen District, Zhuhai City, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 2002–2010.

水稻和蔬菜的膳食结构变化对农村居民镉摄入 健康风险的影响——以珠海市斗门区为例

全桂杰1,陈东湘2,吴绍华3*,颜道浩1,袁毓婕1,李富富1,王院民1

(1.南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023; 2.浙江财经大学东方学院,浙江 海宁 314408; 3.浙江财经大学土地与城乡发展研究院,杭州 310018)

摘 要:为了研究膳食结构(水稻、蔬菜)变化对农村居民镉(Cd)摄入健康风险的影响,本文选取珠海市斗门区为研究区,分析了研究区内水稻和蔬菜的Cd含量现状,分别构建了2000年以来Cd含量与膳食结构的变化趋势,并采用靶标危害系数法(THQ)评价了研究区农村居民的Cd摄入健康风险。研究结果表明,研究区内水稻的Cd污染风险高于蔬菜,少量水稻样点存在超标,蔬菜无超标。2000—2017年,研究区水稻籽粒中的Cd含量在0.1 mg·kg⁻¹附近波动,蔬菜可食部分的Cd含量逐渐降低。在膳食结构中,水稻的比例降低了8.7%,年消费量降低了27%,蔬菜的占比和年消费量都较为稳定。在Cd含量变化和膳食结构改变的双重作用下,2002—2017年居民通过水稻、蔬菜的年摄入Cd总量降低了49%,Cd摄入健康风险降低了56%,其中膳食结构变化对健康风险降低的贡献率为47%。研究结果表明,膳食结构(水稻、蔬菜)变化是影响农村居民Cd摄入健康风险的重要因素。

关键词:膳食结构;健康风险;镉;农村;水稻;蔬菜

中图分类号:X503.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)08-2002-09 doi:10.11654/jaes.2019-0116

Effects of changes in rice- and vegetable-based dietary structure on health risk from cadmium intake for rural residents: A case study of Doumen District, Zhuhai City, China

TONG Gui-jie¹, CHEN Dong-xiang², WU Shao-hua^{3*}, YAN Dao-hao¹, YUAN Yu-jie¹, LI Fu-fu¹, WANG Yuan-min¹

(1.School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Dongfang College, Zhejiang University of Finance & Economics, Haining 314408, China; 3.Institute of Land and Urban-rural Development, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To identify the effects of changes in the dietary structure (rice and vegetables) on the health risk from cadmium (Cd) intake for rural residents, the Doumen District of Zhuhai City was selected as the study area. The existing situation with respect to Cd pollution in rice and vegetables in the study area was analyzed, the trend of Cd content and dietary structure changes since 2000 were determined, and the target hazard coefficient (THQ) method was used to evaluate the health risk from Cd intake for rural residents in the study area. The results showed that the risk from Cd pollution in rice was higher than that for vegetables; a few rice samples exceeded the standard while no vegetables did. From 2000 to 2017, the Cd content in rice grains fluctuated around 0.1 mg·kg⁻¹ and decreased gradually in the edible parts of vegetables. In the dietary structure, the proportion of rice decreased by 8.7% and annual consumption decreased by 27%, while the proportion and annual consumption of vegetables remained relatively stable. Under the dual effects of the changes in Cd content and dietary structure, the annual intake of Cd decreased by 49% and the health risk from Cd presence decreased by 56% from 2002 to 2017. Further, the contri-

收稿日期:2019-01-28 录用日期:2019-04-10

作者简介:全桂杰(1995—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事重金属的迁移与风险评价研究。E-mail:guijietong@163.com

^{*}通信作者:吴绍华 E-mail:shaohua@zufe.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800305);国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室开放基金(KF-2018-03-064)

bution rate of the change in dietary structure to the reduction in health risk was 47%. The results showed that the change in dietary structure (rice and vegetables) was an important factor affecting the health risk from Cd intake for rural residents.

Keywords: dietary structure; health risk; cadmium; rural areas; rice; vegetables

随着中国城市化与工业化的发展,日益增多的镉 (Cd)元素通过农业、工业和交通途径[1-3]排放到土壤 中,随着作物的生长发育而积累四,并通过食物链迁 移到人体中的。Cd元素不是人体生长发育的必需元 素,在微量的情况下也会对人体产生较大的危害[6]。 人体摄入过量的Cd元素时,骨骼会出现软化,肝脏和 肾脏也会受到损害[7]。

居民的膳食结构不同,通过饮食途径的重金属 (Cd、Pb、As等)摄入健康风险也存在着差异。在空间 方面,不同城市居民的膳食结构不同,所产生的重金 属摄入健康风险也不同(摄入途径差异、重金属种类 差异)。武汉市居民的主要膳食是谷物、蔬菜和水果, 居民通过谷物和蔬菜途径的Cd摄入健康风险较 高[8-9]。重庆市居民的主要膳食是谷物、蔬菜和肉类, 居民通过谷物、蔬菜和水果途径的Cd、Pb摄入健康风 险较高,通过谷物、蛋类和肉类途径的As摄入健康风 险也较高[10-12]。广东沿海地区居民的主要膳食是大 米、蔬菜和肉类,产生Pb、As摄入健康风险的主要途 径是大米、肉类和鱼虾贝类,而产生Cd摄入健康风险 的主要途径是大米和蔬菜,二者占居民饮食摄入Cd 总量的89%,肉类只占3%[13]。在时间方面,随着生活 条件的改善,居民的膳食结构发生着较大的变化,同 时各类食物中的重金属含量也不断地变化,导致居民 的重金属摄入健康风险也随着时间变化。2000年以 来珠三角农村居民的膳食结构发生了较大的变 化[14-18],同时政府相继出台了《广东省清洁生产联合 行动实施意见》和《畜禽规模养殖污染防治条例》等法 规条例,改善了珠三角地区的土壤和大气环境,降低 了当地水稻和蔬菜中的Cd含量[19-23]。在膳食结构改 变与食物中Cd含量变化的双重影响下,2000年以来 当地居民的 Cd 摄入健康风险可能发生了相应的变 化,但尚没有相关研究。

Cd元素是农村居民健康风险的重要来源,且主 要通过水稻和蔬菜途径被摄入到人体中[13]。因此,本 研究选取2000年以来珠三角农村地区的水稻、蔬菜 为研究对象,采取人体健康风险评价的方法,探究 2000年以来在膳食结构改变和水稻蔬菜中Cd含量变 化的双重作用下,居民通过水稻和蔬菜途径的Cd摄

入健康风险的变化。该研究可以建立2000年以来珠 三角地区的居民膳食结构变化趋势,水稻、蔬菜Cd含 量的变化趋势,通过水稻蔬菜途径的Cd摄入健康风 险变化趋势,为居民的食物消费提供参考意见,为政 府有关部门制定食物和营养政策、治理环境污染提供 科学依据。

材料与方法

1.1 样品采集与分析

研究区为珠海市斗门区,地处珠江三角洲南端, 位于珠海、江门和中山市的交界处,面积674.8 km², 以低山丘陵和冲积平原为主,农村居民的主要食物来 源为大米和蔬菜[24]。2017年6—7月进行采样,共采 取了42个水稻籽粒样品和27个蔬菜样品(图1),并 在水稻和蔬菜植株处采取了61个土壤样品(0~15 cm),分别进行编号并用GPS定位。

将新鲜土样去除根系和动植物残体,室内风干后 粉碎并过尼龙筛(100目),使用HCl-HNO3-HClO4-HF消解,并使用王水(7 mL优级纯HNO3,21 mL优级 纯HCl,40 mL纯水)定容。将水稻样品洗净风干并剥 出籽粒,烘干至恒质量后,使用HNO3-HClO4-H2O2消 解,并使用5%HNO3定容。将蔬菜样品洗净风干并分 离出可食部分,切碎并烘干至恒质量,使用HNO3-HClO4消解并使用1% HNO3定容[25]。每3个样品设置 一个平行样和空白样,每隔10个样品添加一个土壤 标准样品(GSS-5),采用ICP-MS(Agilent 7700X,安捷 伦科技有限公司)测定土壤、水稻籽粒和蔬菜可食部 分Cd元素的全量(检出限为0.09 ng·L-1)。土壤标准 样品的回收率为96.9%,相对标准偏差(RSD)为 4.2%,符合测定的要求。

1.2 资料收集与整理

(1)2000-2017年水稻与蔬菜中的Cd含量。目 前针对当地作物Cd含量的研究较少,缺少水稻与蔬 菜的Cd含量历史数据,因此本文采用研究区及其毗 邻城市的数据来构建水稻、蔬菜的Cd含量历史变化。 通过查阅大量文献,共收集了27个水稻数据和36组 蔬菜数据(均为野外采集或市售的本地产 品)[19-23,26-61],将蔬菜数据按照蔬菜种类和采样个数进 2004 农业环境科学学报 第38卷第8期

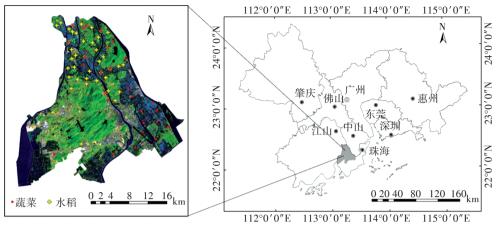


图1 采样点示意图

Figure 1 Sampling point

行加权,计算出每组蔬菜数据的平均Cd含量,并按年份进行记录。

(2)2000—2017年农村居民的膳食结构。由于研究区较小,缺少当地居民的膳食结构历史数据,因此本文采用广东省的居民膳食结构历史数据。通过查阅2001—2018年广东省统计年鉴,统计粮食、蔬菜、肉蛋奶等食品的人均消费量,按年份和食品种类记录。

1.3 摄入健康风险评价

根据美国环保署(USEPA)2000年提出的健康风险评价方法: 靶标危害系数法(Target hazard quotients, THQ)^[62],评价研究区居民通过摄入水稻、蔬菜产生的重金属健康风险,其计算公式如下:

$$THQ = \frac{E_f \times E_d \times F_{ir} \times C}{R_{fd} \times W_{ab} \times T_a}$$

式中: THQ为靶标危害系数, E_f 表示暴露频率, 365 d·a⁻¹; E_a 表示暴露时间(按照 2017 年居民人均预期寿命, 76.7 a^[63]; F_{ir} 表示食物摄取率, $kg \cdot d^{-1}$; C表示作物可食部分的重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$; R_{fa} 表示参考剂量, Cd为0.001 $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$; W_{ab} 表示人均体质量, 2000—2002年按照 58.67 kg, 2003—2012年按照 61.86 kg^[64-66]; T_a 表示非致癌情况下的平均暴露时间, 假设 76.7 a, 每年 365 d。其中 $E_f \times F_{ir}$ 即为食物的年摄入量, 文中采用食物的人均年消费量代替。 $THQ \times 1$ 表示通过摄入途径产生的重金属健康风险不明显, $THQ \times 1$ 表示存在较高的重金属健康风险, THQ越大健康风险越大。

2 结果与分析

2.1 水稻和蔬菜的Cd含量统计特征

2.1.1 水稻和蔬菜的Cd含量现状

研究区内水稻籽粒和蔬菜可食部分的Cd含量测

试结果如表1所示。根据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)将蔬菜分为4类:新鲜蔬菜[叶类、豆类、块根块茎类、茎类(黄花菜除外)],叶类蔬菜,豆类、块根块茎类、茎类蔬菜(芹菜除外),芹菜/黄花菜,并根据标准中规定的水稻和各类蔬菜的限量标准,计算得出水稻和各类蔬菜的超标比例。研究区内水稻籽粒的Cd含量平均值为114 μg·kg⁻¹,共7个水稻籽粒样点超出国家限量标准,超标率为16.7%。蔬菜可食部分Cd含量的平均值为10.3 μg·kg⁻¹,蔬菜样品全部合格,各类蔬菜可食部分的平均Cd含量呈现出芹菜、黄花菜,叶菜类>豆类、块根块茎类、茎类,新鲜蔬菜的趋势。

2.1.2 水稻和蔬菜的 Cd 含量时间变化

2000年以来,珠三角地区水稻籽粒中的 Cd含量在 0.1 mg·kg⁻¹附近上下波动(图 2),蔬菜可食部分的 Cd含量(各类蔬菜 Cd含量的加权平均值)呈现出持续下降的趋势,近两年达到最低(图 3)。

2.2 农村居民膳食结构的变化

自2000年以来,随着经济条件的改善,农村居民

表1 水稻籽粒和蔬菜中的Cd含量

Table 1 Cadmium content in rice grains and vegetables

		蔬菜 Vegetables			
指标 Index	水稻 Rice	新鲜蔬菜[叶类、 豆类、块根块茎 类、茎类(黄花 菜除外)]	叶类	豆类、块根 块茎类、 茎类 (芹菜除外)	芹菜、 黄花菜
采样个数	42	9	6	11	1
平均值/µg·kg ⁻¹	114±93	9±9	16±12	7±7	22
最小值/µg·kg ⁻¹	0.3	1	5	1	22
最大值/µg·kg ⁻¹	357	28	35	22	22
国家标准/µg·kg ⁻¹	200	50	200	100	200
超标率/%	16.7	0	0	0	0

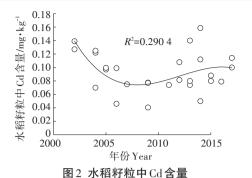


Figure 2 Cd content in rice grains

膳食中的粮食(谷物、薯类和豆类)比例逐渐下降,由56.21%下降为41.56%;蔬菜的比例保持稳定,在25.13%至29.78%之间小幅波动;肉蛋奶和鱼类的比例逐渐上升(图4)。

在粮食中,稻谷是主要的粮食作物,占85%以上的比例。2000年以来,农村居民的稻谷人均年消费量降低了27%,在膳食中所占的比例降低了8.7%,而蔬菜的人均年消费量及占比都较为稳定(图5~图6)。

2.3 农村居民的 Cd 摄入健康风险

2.3.1 年摄入Cd总量

2000年以来,研究区水稻中的 Cd含量较为波动,水稻的年消费量逐年下降(图3、图5);蔬菜中的 Cd含量持续下降而年消费量较为稳定(图4、图5)。将该地区水稻与蔬菜的 Cd含量与其年消费量相乘,可以得到通过水稻和蔬菜途径的居民年摄入 Cd总量,作趋势线并用虚线分别表示出 95% 的置信区间(图7,主坐标轴)。将每年的水稻和蔬菜 Cd摄入量的拟合值相加,得到 2002—2007年居民的年摄入 Cd总量,并将水稻、蔬菜的 95% 置信区间上下限分别相加,得到年摄入 Cd总量的误差线(图7,次坐标轴)。

2002-2017年,通过水稻、蔬菜途径的居民年摄

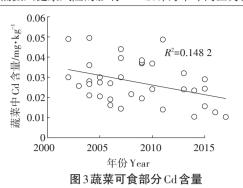


Figure 3 Cd content in edible parts of vegetables

入 Cd 总量总体上呈现逐渐下降的趋势,在 2011年达到最低点后略有升高,总体上由 34 mg 左右下降到 17.5 mg 左右,下降了 49%(图7,次坐标轴)。由于水稻在膳食中占有较高的比例,通过水稻途径的 Cd 摄入量与 Cd 摄入总量的趋势一致,2006年以前下降较快,此后较为稳定,摄入量总体上由 30 mg 左右下降到 16 mg 左右,下降了 47%。蔬菜与水稻不同,2002年以来呈现波动下降的趋势,摄入量由 2002年的 4.2 mg 左右下降为 2017年的 1.7 mg 左右,下降了 60%。

2.3.2 Cd摄入健康风险

采用靶标危害系数法(THQ)来评价通过水稻、蔬菜途径的农村居民Cd摄入健康风险,并用虚线标示出健康风险的95%置信区间(图8,主坐标轴)。将水稻蔬菜健康风险的拟合值相加,得到Cd的总摄入风险(THQ),将水稻、蔬菜健康风险95%置信区间的上下限分别相加,标示出Cd的总摄入风险的误差线(图8,次坐标轴)。2002年以来,水稻和蔬菜的总靶标危害系数(THQ)总体上呈现下降的趋势,其中2009年以前下降速度较快,此后略有波动,总体上由1.6降低到0.7左右,降低了56%。其中水稻THQ的变化趋势与总体一致,在2009年前下降较快,此后稳定在0.6

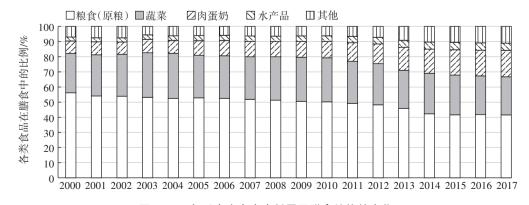


图 4 2000 年以来广东省农村居民膳食结构的变化

Figure 4 Changes in dietary structure of rural residences in Guangdong Province since 2000

2006 农业环境科学学报 第 38 卷第 8 期

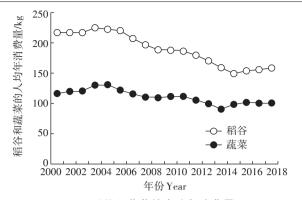
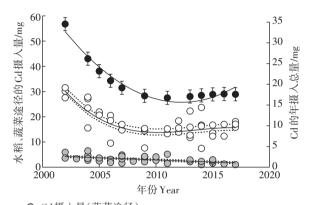


图 5 稻谷和蔬菜的人均年消费量

Figure 5 Per capita annual consumption of rice and vegetables



- ··○·· Cd摄入量(蔬菜途径) y=-0.167 7x+340.01 R²=0.297 1
- --○-- Cd 摄入量(水稻途径) y=-0.01x³+80.61x²-162 313.00x+108 940 140.10 R²=0.52
- Cd(摄入总量) y=0.162 1x²-652.53x+656 543 R²=0.954 1

图 7 研究区农村居民 Cd 的年摄入量

Figure 7 Annual Cd intake of rural residents in the study area

左右,下降了57%;蔬菜呈现持续下降的趋势,由0.2 左右下降到0.07左右,下降了65%。2002年以来,居 民通过水稻途径的Cd摄入健康风险高于蔬菜途径, 水稻的平均THQ(0.75)是蔬菜(0.13)的5.8倍。

当 THQ>1时,表明居民存在着较高的健康风险。总体来看,2002—2005年居民摄入水稻和蔬菜的健康风险较高,但风险呈现逐年降低的趋势,2006年后健康风险保持在较低的水平。其中2002—2004年居民单独摄入水稻时存在较高的健康风险,而所有年份居民单独摄入蔬菜的健康风险都较低。

为了进一步分离膳食结构变化(水稻、蔬菜)对居民健康风险变化的贡献率,我们采用变量控制的方法。假设两种情景:一是2002—2017年农村居民的膳食结构不变,食物中Cd含量变化;二是2002—2017年的食物中的Cd含量不变,膳食结构变化。计算得出2002年以来居民的Cd摄入健康风险分别降低了

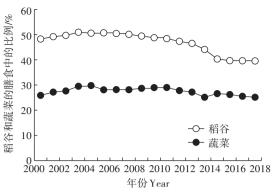
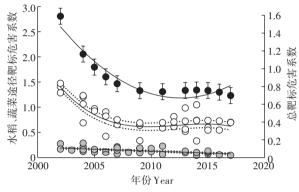


图 6 稻谷和蔬菜年消费量占总膳食的比例

Figure 6 Percentage of annual consumption of rice and vegetables



- ··○··*THQ*(蔬菜途径) γ=-0.01x+15.52 R²=0.31
- ··○·*THQ*(水稻途径) y=-0.001x³+5.169x²-10 401.620x+6 976 891.887 R²=0.572
- $\rlap{\ }$ \rlap

图 8 研究区水稻和蔬菜的靶标危害系数(THQ)

Figure 8 Target hazard coefficient (THQ) of rice and vegetables in the study area

34%和30%,即食物中Cd含量变化对农村居民健康风险的贡献率为53%,膳食结构变化的贡献率为47%。结果表明,膳食结构与水稻、蔬菜Cd含量一样,都是影响农村居民Cd摄入健康风险的重要因素。

3 讨论

研究区内水稻的 Cd 污染风险高于蔬菜,其中水稻籽粒中 Cd 的平均含量为 0.114 mg·kg⁻¹,超标率为 16.7%;蔬菜可食部分 Cd 的平均含量为 0.010 3 mg·kg⁻¹,蔬菜样品全部合格。此前王硕等^[55]和杨淋清等^[40]分别对研究区附近水稻、蔬菜的 Cd 含量进行了测试,水稻中 Cd 的平均含量为 0.1 mg·kg⁻¹,蔬菜中为 0.012 6 mg·kg⁻¹,与本研究的结果较为一致。

本研究采用了试验数据、文献数据与统计数据, 计算得出时间序列上农村居民Cd摄入健康风险的变 化。本研究参考的文献数据均引自较为权威的刊物, 文献中对水稻蔬菜的前处理与测试方法均符合国家 标准,并都进行了较好的质量控制,确保数据准确可 靠。本研究主要存在3个方面的不确定性:(1)水稻 蔬菜中Cd含量数据的不确定性。研究区为斗门区, 而文献数据中该区域的研究很少,因此将范围扩大为 地理环境和田间管理方式相似的邻近城市,建立起 Cd含量变化的时间序列。(2)文献中Cd含量数据的 波动性。Cd含量的历史数据并不是一条拟合较好的 线,而是存在着较大的波动。因此我们不能只选取每 年的平均值来计算Cd摄入总量和THO,而应该将所 有文献数据考虑在内,计算并拟合出带有95%置信 区间的趋势线,并添加误差线表示出它们的不确定度 (Cd摄入总量:±1.58左右,THO:±0.1左右)。(3)试验、 文献数据与统计数据的对应问题。试验、文献数据中 的蔬菜Cd含量常按类别统计,而统计年鉴中采用的 加权平均值。因此我们将试验、文献中的蔬菜Cd浓 度按照蔬菜种类和采样个数加权计算出平均值,与统 计年鉴中的蔬菜标准相统一。总体而言,通过选取相 近地区的文献数据,确保文献数据科学可靠,考虑数 据的波动性并统一试验/文献数据与统计年鉴的蔬菜 标准,可以有效降低研究结果的不确定性,增加研究 的严谨性。

膳食结构的改变与家庭经济收入的变化息息相 关[67-69], 2000—2017年, 广东农村居民的人均实际收 入增长了221%[14],同时反映在膳食结构中,粮食的比 例逐渐减小,蔬菜的比例较为稳定,肉蛋奶的比例逐 渐增加。在广东沿海地区,水稻和蔬菜是居民食物中 Cd 富集的主要对象[13], 2002年以来研究区居民通过 水稻蔬菜途径的年摄入Cd总量降低了49%,Cd摄入 健康风险降低了56%,其中膳食结构(水稻、蔬菜)改 变对降低居民 Cd 摄入健康风险的贡献率为47%,这 表明膳食结构的改变是影响居民Cd摄入风险的重要 因素。在膳食结构改变和食物中Cd含量变化的双重 影响下,农村居民通过食用水稻、蔬菜途径的Cd摄入 健康风险逐渐降低。

研究区内水稻的污染风险高于蔬菜,居民通过水 稻途径的Cd摄入健康风险是蔬菜途径的5.8倍,这表 明在饮食中多食用蔬菜[尤其是豆类、块根块茎类、茎 类(芹菜除外)]有助于降低研究区居民Cd的摄入健 康风险。环保政策的出台可以有效改善环境质量,降 低食品中的Cd含量,而膳食结构的改变使得居民食 用Cd含量更低的食物。在政策和膳食结构改变的双

重作用下,农村居民通过水稻、蔬菜途径的Cd摄入健 康风险逐渐降低,农村居民的饮食越来越安全。

结论

- (1)研究区内水稻的Cd污染风险高于蔬菜,其中 豆类/块根块茎类/茎类蔬菜(芹菜除外)的Cd含量较 低,食用最为安全。
- (2)2000年以来,珠三角作物中的Cd含量及农村 居民膳食结构都发生了较大的变化。其中水稻籽粒 中的Cd含量较为波动,而蔬菜中的Cd含量逐渐降 低;同时在膳食结构中,水稻的比例逐渐降低,蔬菜的 比例较为稳定。
- (3)膳食结构(水稻、蔬菜)的改变是影响农村居 民 Cd 摄入健康风险的重要因素。2002年以来,农村 居民通过水稻蔬菜涂径的Cd摄入健康风险逐渐降 低,其中膳食结构(水稻、蔬菜)变化对健康风险降低 的贡献率为47%,是影响农村居民Cd摄入健康风险 的重要因素。

参考文献:

- [1] Hong Y, Bonhomme C, Van den Bout B, et al. Integrating atmospheric deposition, soil erosion and sewer transport models to assess the transfer of traffic-related pollutants in urban areas[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 96:158-171.
- [2] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical Journal, 2010, 94(2):99-107.
- [3] Duruibe J O, Ogwuegbu M O C. Heavy metal pollution and human biotoxic effects[J]. International Journal of Physical Sciences, 2007, 2(5):
- [4] Tong G, Wu S, Yuan Y, et al. Modeling of trace metal migration and accumulation processes in a soil-wheat system in Lihe watershed, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11):2432.
- [5] Gall J E, Boyd R S, Rajakaruna N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: A review[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(4):201.
- [6] 吕建树. 江苏典型海岸带土壤及沉积物重金属环境地球化学研究 [D]. 南京:南京大学, 2015.
 - LÜ Jian-shu. Environmental geochemistry of heavy metals in soils and sediments of typical coastal zones in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [7] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京:中国环境科学出版社,
 - FAN Shuan-xi. Pollution and control of heavy metals in soil[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [8] 梁高道, 革丽亚, 谭 慧, 等. 武汉市城市成人居民总膳食中镉的健 康风险评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(12):2715-2716.

- LIANG Gao-dao, GE Li-ya, TAN Hui, et al. Health risk assessment of cadmium via diet for adults in Wuhan[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2008, 18(12):2715-2716.
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 湖北统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
 - National Bureau of Statistics. Hubei statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [10] 蒋冬梅, 阿丽娅, 王定勇, 等. 三峡库区居民膳食结构与重金属摄 人水平研究[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):83-87.
 - JIANG Dong-mei, A Li-ya, WANG Ding-yong, et al. Investigation on dietary patterns and intake level of heavy metals of inhabitants in Three Gorges Reservoir area[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1):83–87.
- [11] 蒋冬梅. 重庆市城乡居民膳食结构与重金属摄入水平研究[D]. 重庆:西南大学, 2007.
 - JIANG Dong-mei. Investigation on dietary patterns and intake level of heavy metals of inhabitants in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [12] 刘先锋, 刘达伟, 杨小伶, 等. 重庆市城乡居民膳食结构分析[J]. 现代预防医学, 2007, 34(17): 3321-3323.
 - LIU Xian-feng, LIU Da-wei, YANG Xiao-ling, et al. Analysis on dietary pattern and nutritional status of Chongqing residents[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2007, 34(17):3321-3323.
- [13] 唐洪磊, 郭 英, 孟祥周, 等. 广东省沿海城市居民膳食结构及食物污染状况的调研——对持久性卤代烃和重金属的人体暴露水平评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2):329-336.
 - TANG Hong-lei, GUO Ying, MENG Xiang-zhou, et al. Nutritional status in dietary intake and pollutants via food in coastal cities of Guangdong Province, China: Assessment of human exposure to persistent halogenated hydrocarbons and heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2):329–336.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计 出版社 2018
 - National Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [15] 中华人民共和国国家统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计 出版社, 2001.
 - National Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计 出版社, 2006.
 - National Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006.
- [17] 中华人民共和国国家统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计 出版社. 2011.
 - National Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing; China Statistics Press, 2011.
- [18] 中华人民共和国国家统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计 出版社. 2016.
 - National Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [19] 梁春穗, 邓 峰, 黄伟雄, 等. 广东省食物中化学污染物的网点监测与动态分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2003, 15(5):395-401.

- LIANG Chun-sui, DENG Feng, HUANG Wei-xiong, et al. Network monitoring and dynamic analysis of chemical contaminants in agricultural products in Guangdong[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2003, 15(5):395-401.
- [20] 窦 飞. 珠三角稻田铜、镉和砷有效性的地球化学机制[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
 - DOU Fei. Geochemical mechanism of availability of copper, cadmium and arsenic in paddy fields of the Pearl River Delta[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [21] Zhang H, Chen J, Zhu L, et al. Transfer of cadmium from soil to vegetable in the Pearl River Delta area, South China[J]. PLoS One, 2014, 9 (9):e108572.
- [22] 付红波, 李取生, 骆承程, 等. 珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物重金属污染[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1142-1146. FU Hong-bo, LI Qu-sheng, LUO Cheng-cheng, et al. Heavy metal pollution in the reclaimed tidal flat soils and crops in the Pearl River Delta[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6):1142-1146
- [23] 蔡文华, 胡曙光, 苏祖俭, 等. 2014年广东省居民重点食品中金属污染物的健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(6):536-540
 - CAI Wen-hua, HU Shu-guang, SU Zu-jian, et al. Health risk assessment of metals contamination in main food in Guangdong in 2014[J]. *Journal of Environment and Health*, 2016, 33(6):536-540.
- [24] 曹彦芹. 珠海斗门区生态环境信息图谱构建研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
 - CAO Yan-qin. Study on the construction of ecological environment information atlas in Doumen District of Zhuhai City[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2016.
- [25] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定 GB 5009.15—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.

 National health and family planning commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of Cadmium in food GB 5009.15—2014[S]. Beijing: Standards Press of China. 2015.
- [26] Cai L, Jin M A, Zhou Y, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 20(1):121-134.
- [27] 黄 勇, 郭庆荣, 任 海, 等. 珠江三角洲典型地区蔬菜重金属污染现状研究: 以中山市和东莞市为例[J]. 生态环境学报, 2005, 14 (4):559-561.
 - HUANG Yong, GUO Qing-rong, REN Hai, et al. Investigation of heavy metal pollution in vegetables in the Pearl River delta: A case study of Zhongshan and Dongguan[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4):559-561.
- [28] 李传红, 朱文转, 谭 镇. 广东省惠州市蔬菜重金属污染状况研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(5):1448-1449.
 - LI Chuan-hong, ZHU Wen-zhuan, TAN Zhen. Study on heavy metal pollution of vegetable in Huizhou[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(5):1448–1449.
- [29] 李 慧, 黄 薇, 黄海雄, 等. 深圳市 2004年部分食品中镉污染情况分析[J]. 现代预防医学, 2005, 32(6):609-610.
 - LI Hui, HUANG Wei, HUANG Hai-xiong, et al. Modern preventive

1638-1642.

- medicine, surveillance and analysis of cadmium contamination of foods in Shenzhen[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2005, 32(6):609–610.
- [30] 杨国义, 罗 薇, 高家俊, 等. 广东省典型区域蔬菜重金属含量特征与污染评价[J]. 土壤通报, 2008, 39(1):133-136.
 - YANG Guo-yi, LUO Wei, GAO Jia-jun, et al. Heavy metal contents and pollution evaluation in vegetables in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1):133-136.
- [31] 秦文淑, 邹晓锦, 仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1638–1642.

 QIN Wen-shu, ZOU Xiao-jin, QIU Rong-liang. Health risk of heavy metals to the general public in Guangzhou, China via consumption of vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):
- [32] 刘钰钗, 陈 婷, 周金森, 等. 广州市黄埔区蔬菜重金属污染调查研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(6):1085-1087.
 - LIU Yu-chai, CHEN Ting, ZHOU Jin-sen, et al. Investigation on heavy metal pollution condition in vegetables from Huangpu District in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2007, 17(6):1085-1087.
- [33] 胡小玲, 张 瑰, 陈剑刚, 等. 珠海市蔬菜重金属污染的调查研究 [J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(8): 980-981.
 - HU Xiao-ling, ZHANG Gui, CHEN Jian-gang, et al. Investigation on heavy metal pollution of vegetables in Zhuhai City[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2006, 16(8):980–981.
- [34] 王 舟, 黄 薇, 潘柳波, 等. 深圳市食品中镉污染的暴露量评估 [J]. 国外医学(医学地理分册), 2010, 20(2):117-120.
 - WANG Zhou, HUANG Wei, PAN Liu-bo, et al. Exposure assessment of pollution of dietary cadmium in foods in Shenzhen City[J]. Foreign Medical Sciences (Section of Medgeography), 2010, 20(2):117-120.
- [35] 王晓波, 陈海珍, 刘冬英, 等. 广州市蔬菜重金属污染状况及健康 风险评估[J]. 中国公共卫生, 2011, 27(5):549-551.
 - WANG Xiao-bo, CHEN Hai-zhen, LIU Dong-ying, et al. Contents of heavy metal in vegetables and their potential risks to human health in Guangzhou City[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2011, 27(5): 549-551.
- [36] 潘柳渡, 王 舟, 吴小敏, 等. 深圳市蔬菜中铅和镉的含量与污染状况[J]. 职业与健康, 2013, 29(1):69-70.
 - PAN Liu-du, WANG Zhou, WU Xiao-min, et al. Contents and pollution status of lead and cadmium in vegetables of Shenzhen City[J]. *Occupation and Health*, 2013, 29(1):69–70.
- [37] 闻 剑,梁 辉, 胡曙光,等. 2013—2014年广东省基地蔬菜重金属污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(2):159-164. WEN Jian, LIANG Hui, HU Shu-guang, et al. Investigation of heavy metal contamination of vegetables from vegetable base of Guangdong Province from 2013 to 2014[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2015, 27(2):159-164.
- [38] 王佛娇, 邓敬颂, 程小会, 等. 广东省部分基地蔬菜重金属污染评价[J]. 农业资源与环境学报, 2014(5):446-449.
 WANG Fo-jiao, DENG Jing-song, CHENG Xiao-hui, et al. Assess
 - ment on the contamination status of heavy metals in some vegetables growing areas of Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014(5):446–449.

- [39] 陈志良, 黄 玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 389-398.
 - CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2017, 38(1):389–398.
- [40] 杨淋清,潘柳波,王 舟,等.深圳市居民通过蔬菜对镉的暴露风险评估[J],中国食品卫生杂志,2018,30(4):436-440.
 - YANG Lin-qing, PAN Liu-bo, WANG Zhou, et al. Risk assessment of cadmium exposure of Shenzhen residents through vegetables[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2018, 30(4):436-440.
- [41] 贺小平. 大米中镉含量的调查[J]. 中国卫生检验杂志, 2002, 12 (5):590.
 - HE Xiao-ping. Investigation of cadmium content in rice[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2002, 12(5):590.
- [42] 王 蒙. 广东省典型区域水稻有机与常规栽培的对比分析研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
 - WANG Meng. Comparison of organic and conventional rice cultivation in typical regions of Guangdong[D]. Guangzhou; South China Agricultural University, 2016.
- [43] 陆秀明, 黄 庆, 刘怀珍, 等. 不同肥料对稻米产量和食用安全的影响[J]. 广东农业科学, 2007(6):39-41.
 - LU Xiu-ming, HUANG Qing, LIU Huai-zhen, et al. Effects of different fertilizers on rice yield and food safety[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2007(6):39-41.
- [44] 关共凑, 徐 颂, 黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境, 2006, 15(2):315-318.
 - GUAN Gong-cou, XU Song, HUANG Jin-guo. The regularity of distribution, change and migration of heavy metals in soil-rice plant system [J]. *Ecology and Environmet*, 2006, 15(2):315-318.
- [45] 杨 菲, 白卢哲, 梁春穗, 等. 2009 年广东省市售大米及其制品镉污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2011, 23(4):358-362.
 - YANG Fei, BAI Lu-xi, LIANG Chun-sui, et al. Investigation of the cadmium contamination on retailed rice and rice products in Guangdong Province in 2009[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2011, 23 (4):358-362.
- [46] 王永强, 肖立中, 李诗殷, 等. 铅镉复合污染对水稻生长及产量的 影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23):12653-12655.
 - WANG Yong-qiang, XIAO Li-zhong, LI Shi-yin, et al. Effects of combined pollution of Pb and Cd on growth and yield of rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23):12653-12655.
- [47] 王国莉. 商品大米中 Cd、Pb、Cr的污染状况及健康风险评价[J]. 基因组学与应用生物学, 2012, 31(3):295-302.
 - WANG Guo-li. Evaluation of the pollution and health risk caused by Cd, Pb and Cr in rice samples from open markets[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2012, 31(3):295–302.
- [48] 刘冬英, 王晓波, 陈海珍, 等. 广州市部分市售大米铅镉污染状况 调查及健康风险评价[J]. 华南预防医学, 2013(1):86-88.
 - LIU Dong-ying, WANG Xiao-bo, CHEN Hai-zhen, et al. Investigation on lead and cadmium pollution of rice in Guangzhou and health risk assessment[J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2013 (1):86-88.
- [49] 周少君,邓小玲,梁 辉,等. 2012年广东省市售大米镉含量调查

- 及初步膳食暴露评估[J]. 华南预防医学, 2013(6):4-9.
- ZHOU Shao-jun, DENG Xiao-ling, LIANG Hui, et al. Cadmium contamination and dietary exposure assessment in retailed rice in Guangdong Province, 2012[J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2013(6);4-9.
- [50] 梁炼华, 古艳卿, 李卓强, 等. 2013 年鹤山市市售大米镉含量的调查分析[J]. 职业与健康, 2015, 31(18):2488-2490.
 - LIANG Lian-hua, GU Yan-qing, LI Zhuo-qiang, et al. Investigation and analysis on cadmium content of commercially available rice in Heshan City in 2013[J]. *Occupation and Health*, 2015, 31(18):2488-2490
- [51] 孙亚莉, 徐庆国, 刘红梅, 等. 不同品种和地区对稻米镉含量与品质的耦合影响[J]. 中国农学通报, 2016, 33(17):1-7.
 - SUN Ya-li, XU Qing-guo, LIU Hong-mei, et al. Coupling effect of different rice cultivars and regions on rice cadmium content and quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 33(17):1-7.
- [52] 赵委托. 东莞地区电镀厂重金属污染与风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016.
 - ZHAO Wei-tuo. Study on pollution and risk assessment of heavy metals surrounding electroplating plants in Dongguan[D]. Wuhan; China University of Geosciences, 2016.
- [53] 陈能场, 张晓霞, 郑煜基. 广州大米的镉含量调查分析及其对弱势群体健康风险的探讨(英文)[J]. 资源与生态学报: 英文版, 2018, 1:85-91.
 - CHEN Neng-chang, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji. Heavy metal concentrations in rice from Guangzhou and associated health risks[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 1:85–91.
- [54] 焦泽鹏, 李焕勇. 广东省市售大米中镉的污染水平及其健康风险评估[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(4):104-108.
 - JIAO Ze-peng, LI Huan-yong. The Contamination level and cadmium in retailed rice health risk assessment of in Guangdong Province [J]. Sichuan Food and Fermentation, 2017, 53(4):104–108.
- [55] 王 硕,罗 杰,蔡立梅,等.土壤-水稻系统中重金属的富集特征及对土壤元素标准限的判定[J]. 环境化学,2018,37(7):1508-1514
 - WANG Shuo, LUO Jie, CAI Li-mei, et al. Enrichment characteristics of heavy metals in soil-rice system and determination of the standard range of soil elements[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37 (7): 1508–1514
- [56] 郑惠华, 彭寨玉, 徐淑暖, 等. 2004—2007年东莞市食品化学污染物连续监测与危害分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(10): 2085-2090
 - ZHENG Hui-hua, PENG Zhai-yu, XU Shu-nuan, et al. Food chemical contaminants continuous monitoring and hazard analysis from 2004 to 2007 in Dongguan[J]. *Chinses Journal of Health Laboratory Technology*, 2008, 18(10):2085–2090.
- [57] 孟宇航, 宋慧坚, 吕晓虹, 等. 江门市 2004 年食品化学污染物监测 结果分析[J]. 华南预防医学, 2005, 31(6):53-55.
 - MENG Yu-hang, SONG Hui-jian, LÜ Xiao-hong, et al. Chemical contamination in food in Jiangmen, 2004[J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2005, 31(6):53-55.
- [58] 江素红, 王普生, 吴耀波, 等. 2004—2006年汕头市食品中镉污染

- 调查[J]. 中国热带医学, 2007, 7(6):1012-1013.
- JIANG Su-hong, WANG Pu-sheng, WU Yao-bo, et al. Survey of status of contamination of food with cadmium in Shantou City in 2004—2006[J]. *China Tropical Medicine*, 2007, 7(6):1012–1013.
- [59] 闻 剑, 李 海, 戴昌芳, 等. 广东省食品中镉的危险性评估[J]. 华 南预防医学, 2008, 34(1):63-64.
 - WEN Jian, LI Hai, DAI Chang-fang, et al. Risk assessment of cadmium in food in Guangdong Province[J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 2008, 34(1):63-64.
- [60] 王桂安, 梁春穗, 黄 琼, 等. 广东省居民主要膳食镉暴露风险的 初步评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, 24(4):353-357.
 - WANG Gui-an, LIANG Chun-sui, HUANG Qiong, et al. Preliminary risk assessment on the dietary exposure of Cd in Guangdong residents [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2012, 24(4):353–357.
- [61] 张维蔚, 侯建荣, 余 超, 等. 广州市居民膳食镉含量监测及暴露评估[J]. 职业与健康, 2017, 33(4):477-480.
 - ZHANG Wei-wei, HOU Jian-rong, YU Chao, et al. Surveillance and dietary exposure assessment on cadmium in Guangzhou residents[J]. *Occupation and Health*, 2017, 33(4):477-480.
- [62] USEPA. Risk-based concentration table[R]. Philadelphia PA, Washington DC: Agency U S E P, 2000.
- [63] 栗 征.《2017年我国卫生健康事业发展统计公报》出炉[J]. 中医药管理杂志, 2018, 26(12):205.

 LI Zheng. Publication of the "Statistical bulletin on the development of health careers in China in 2017"[J]. Management of Traditional
- [64] 顾景范.《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》解读[J]. 营养学报, 2016, 38(6):525-529. GU Jing-fan. Interpretation of the "Report on nutrition and chronic diseases of Chinese residents (2015)" [J]. Acta Nutrimenta Sinica,

Chinese Medicine, 2018, 26(12):205.

2016, 38(6):525-529.

- [65] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2003.

 National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2003.
- [66] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.

 National Bureau of Statistics. China statistical vearbook[M]. Beijing.
 - National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [67] Du S, Mroz T A, Zhai F, et al. Rapid income growth adversely affects diet quality in China: Particularly for the poor! [J]. Social Science & Medicine, 2004, 59(7):1505–1515.
- [68] 李国景, 陈永福. 收入水平、老龄化与营养摄入——基于广东省城镇住户数据的研究[J]. 南方经济, 2018(2):103-119.

 LI Guo-jing, CHEN Yong-fu. Income level, aging and nutrient intake: A study based on urban household data in Guangdong Province [J]. South China Journal of Economics, 2018(2):103-119.
- [69] 王志宏, 翟凤英, 何宇纳, 等. 经济收入水平对中国城乡居民膳食营养素摄入及膳食结构的影响[J]. 卫生研究, 2008, 37(1):62-64. WANG Zhi-hong, ZHAI Feng-ying, HE Yu-na, et al. Influence of family income on dietary nutrients intake and dietary structure in China[J]. Journal of Hygiene Research, 2008, 37(1):62-64.