

基于前瞻性队列研究植物性食物摄入与 2 型糖尿病发生风险的关联

徐铭婧, 应涛, 朱洋, 何更生, 刘雨薇

复旦大学, 公共卫生学院/公共卫生安全教育部重点实验室, 上海 200032



DOI 10.11836/JEOM23395

摘要:

[背景] 现阶段, 生活方式干预或饮食调整目前仍然是 2 型糖尿病 (T2D) 一级预防和管理的基石。

[目的] 探究植物性食物摄入与 T2D 发生风险的关系。

[方法] 系基于上海社区自然人群队列 (SSACB) 松江区居民开展的前瞻队列研究。基线调查时用经验证的食物频率问卷评估不同类型食物摄入状况并计算植物性膳食指数 (PDI)、健康植物性膳食指数 (hPDI) 和不健康植物性膳食指数 (uPDI), 借由绑定了居民医疗保险卡的电子信息系统获取队列建立后经医生诊断 [空腹血糖 $\geq 7.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 2 h 口服葡萄糖耐量试验 $\geq 11.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或糖化血红蛋白 $\geq 6.5\%$ 或具备典型的高血糖 (危象) 症状及随机血糖 $\geq 11.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的或存在用药记录的新发糖尿病病例。采用多因素校正的 Cox 比例风险回归模型, 结合限制性立方样条分析膳食摄入与 T2D 发生风险之间的关联。

[结果] 队列中共有 29016 名松江区居民被纳入分析 [基线年龄的 $\bar{x} \pm s$ 为 (55.3 ± 11.6) 岁], 截至 2022 年 9 月 21 日, 中位随访时间 5.688 年。结果显示, 当地居民植物性食物 (未加工) 摄入与新发 T2D 呈负相关 [HR (95%CI): 0.983 (0.969~0.998)]; 其中, 植物性食物每日摄入量最低四分位数组 ($< 500.9 \text{ g}$) 的 T2D 发生风险高于每日摄入量最高四分位数组 ($\geq 859.3 \text{ g}$) [HR (95%CI): 1.250 (1.012~1.544)]; 未发现动物性食物 [HR (95%CI): 1.006 (0.987~1.026)] 和加工食品 [HR (95%CI): 0.978 (0.944~1.014)] 摄入与 T2D 发生风险相关。用等量 (50 g) 的植物性食物替代动物性食物 [HR (95%CI): 0.982 (0.968~0.996)] 或加工食品 [HR (95%CI): 0.983 (0.969~0.998)], T2D 的发生风险下降。此外, 居民 PDI ($P_{\text{非线性}}=0.023$)、hPDI ($P_{\text{非线性}}=0.016$) 与新发 T2D 之间存在非线性相关。

[结论] 植物性食物, 特别是健康植物性食物摄入与新发 T2D 风险降低相关。

关键词: 植物性食物; 植物性膳食指数; 2 型糖尿病; 队列研究; Cox 比例风险回归模型

Plant foods intake and risk of type 2 diabetes: Findings from a registry-based prospective cohort study XU Mingjing, YING Tao, ZHU Yang, HE Gengsheng, LIU Yuwei (School of Public Health/Key Laboratory of Public Health Safety, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Abstract:

[Background] Lifestyle intervention or dietary modification has been the cornerstone of primary prevention and management of type 2 diabetes (T2D).

[Objective] To investigate the associations of plant foods intake with the risk of incident T2D.

[Methods] Based on a general population cohort, the Shanghai Suburban Adult Cohort and Biobank (SSACB), dietary data were collected for each participant in Songjiang District of Shanghai at enrollment with a validated Food Frequency Questionnaire (FFQ), and plant-based diet index (PDI), healthful plant-based diet index (hPDI), and unhealthful plant-based diet index (uPDI) were calculated. Incident T2D cases were identified according to physician diagnosis (fasting blood glucose $\geq 7.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, or 2 h value during a 75-g oral glucose tolerance test $\geq 11.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, or glycosylated hemoglobin $\geq 6.5\%$, or with typical symptoms of hyperglycemia or hyperglycemic crisis, accompanied by a random plasma glucose $\geq 11.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) or medication records, obtained from the electronic information system for residents' medical insurance. Multivariable-adjusted Cox proportional hazards models and restricted cubic splines were used to evaluate the associations of foods from different sources with the risk of incident T2D.

基金项目

上海市浦江人才计划项目 (21PJD005)

作者简介

徐铭婧 (1994—), 女, 硕士生;

E-mail: 20211020105@fudan.edu.cn

通信作者

刘雨薇, E-mail: ywliu@fudan.edu.cn

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2023-11-17

录用日期 2024-03-13

文章编号 2095-9982(2024)05-0497-08

中图分类号 R15

文献标志码 A

►引用

徐铭婧, 应涛, 朱洋, 等. 基于前瞻性队列研究植物性食物摄入与 2 型糖尿病发生风险的关联 [J]. 环境与职业医学, 2024, 41(5): 497-504.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM23395

Funding

This study was funded.

Correspondence to

LIU Yuwei; E-mail: ywliu@fudan.edu.cn

Editorial Board Members' authorship No

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2023-11-17

Accepted 2024-03-13

► To cite

XU Mingjing, YING Tao, ZHU Yang, et al. Plant foods intake and risk of type 2 diabetes: Findings from a registry-based prospective cohort study[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(5): 497-504.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM23395

[Results] A total of 29016 participants [age at baseline (55.3±11.6) years] with a median follow-up duration of 5.688 years until 21 September 2022 were included. Plant foods (unprocessed) intake was associated with a decreased risk of incident T2D [HR (95%CI): 0.983 (0.969, 0.998)]. In comparison with participants in the highest quartile (≥859.3 g) of plant foods daily intake, the risk of incident T2D for those in the lowest quartile (<500.9 g) was higher [HR (95%CI): 1.250 (1.012, 1.544)]. No significant associations of animal foods [HR (95%CI): 1.006 (0.987, 1.026)] and processed foods [HR (95%CI): 0.978 (0.944, 1.014)] intakes were found with the risk of incident T2D. Replacing 50 g animal foods [HR (95%CI): 0.982 (0.968, 0.996)] or processed foods [HR (95%CI): 0.983 (0.969, 0.998)] with 50 g plant foods was associated with significantly decreased risks of incident T2D. Additionally, non-linear associations of PDI ($P_{\text{nonlinear}}=0.023$) and hPDI ($P_{\text{nonlinear}}=0.016$) with the risk of incident T2D were found in the SSACB.

[Conclusion] Plant foods intake, especially healthful plant foods intake, is significantly associated with a decreased risk of incident T2D.

Keywords: plant foods; plant-based diet index; type 2 diabetes; cohort study; Cox proportional hazards model

国际糖尿病联合会最新报告显示, 2021 年, 全球患糖尿病的成年人(20~79 岁)已达 5.37 亿(约 10.5%), 由糖尿病引起的直接健康支出近 1 万亿美元^[1]。中国现已成为糖尿病成人患者最多的国家, 高达 1.4 亿, 占全球糖尿病人数的 1/4, 且未确诊率高达 51.7%^[1]。调查显示, 超过 95% 的糖尿病患者属于 2 型糖尿病(type 2 diabetes, T2D)^[2]。现阶段, 生活方式干预或饮食调整仍是 T2D 一级预防和管理的基石^[3-5]。健康饮食模式被证明与 T2D 风险降低相关^[6-8], 膳食与新发糖尿病之间的关系不仅局限于营养素, 更与食物组合相关。尽管前瞻性队列研究的荟萃分析结果 [包含在北美洲(美国、加拿大)、欧洲(英国、法国、希腊、荷兰、瑞典)和亚洲(新加坡、韩国、中国)开展的队列研究] 表明, 健康的植物性饮食(全谷物、蔬菜、水果、豆类、坚果和种子为主, 不鼓励摄入动物性食物的饮食模式)始终与较低的 T2D 风险相关^[9-10], 但其中开展于中国和亚洲的队列研究有限^[11-15]。

因此, 本研究基于上海社区自然人群队列(Shanghai Suburban Adult Cohort and Biobank, SSACB)^[16]松江区数据, 旨在探究植物性食物与 T2D 发生风险的关联, 以期提供更多针对上海市居民膳食摄入特征的 T2D 防治建议, 为 T2D 膳食防治的健康宣教提供更多直接的科学和实践依据, 降低居民糖尿病风险, 获得更多可持续性的健康收益。

1 对象与方法

1.1 研究对象

本研究纳入 SSACB 松江区 36605 名年龄合格(20~74 岁)参与者。基线调查时对所有参与者进行个人问卷 [包括人口学信息、既往疾病史及家族史、个人生活习惯、体力活动和经验证的食物频率问卷(Food Frequency Questionnaire, FFQ)等] 调查、家庭问卷(包括烹调用调味品和食用油的使用状况等)调查、医学

体格检查以及血液及尿液检测。本研究经复旦大学公共卫生学院医学研究伦理委员会批准(伦理审批号: IRB#2016-04-0586), 每位参与者均签署了书面知情同意书。

1.2 暴露评估

基于基线调查 FFQ 数据(共 29 个食物组, 及询问过去 12 个月中每个食物组的进食频率及每次进食量)。将调查所得摄入量的单位统一转换为 g(大米摄入依据调查所得分成生、熟重计算), 乘以进食频率得到食物组每日摄入量。利用中国食物成分表数据^[17]加权上海居民的食物消费结果^[18], 得出每个食物组的能量摄入量。所有食物组的能量摄入量相加获得每日总能量摄入量。利用家庭问卷调查所得估算松江区居民烹调用调味品(盐、糖和酱油)和食用油的每日能量摄入量均值。

基于研究目的, 将 FFQ 调查所得的 29 个食物组合并为 21 个以做后续分析。植物性食物包括大米及其制品、小麦面粉及其制品、杂粮类、薯类、新鲜蔬菜(含新鲜蔬菜和菌菇类)、新鲜水果、豆类及其制品(含豆浆或豆奶、豆腐及其豆制品)和坚果类, 共 8 组; 动物性食物包括蛋类、(发酵)奶类(将鲜奶、奶粉及奶酪类和酸奶类合并且基于蛋白质含量统一转化为牛奶的克重进行后续分析)、猪肉、其他畜肉类、禽肉类、动物内脏和水产品(含淡水鱼类、海水鱼类和虾蟹贝类), 共 7 组; 加工食品包括含糖饮料(含碳酸饮料、纯果蔬汁和其他含糖饮料)、糖果巧克力、油炸面食、泡菜和盐腌食品、加工肉制品和糕点冰淇淋, 共 6 组。

通过赋分每个食物组每日摄入量的五分位数计算植物性膳食指数(plant-based diet index, PDI)、健康植物性膳食指数(healthful plant-based diet index, hPDI)和不健康植物性膳食指数(unhealthful plant-based diet index, uPDI)^[19]。考虑到膳食指数计算的需

要,将加工食品按照其主要成分的食物来源分别划分至植物性食物(健康植物性食物:杂粮类、薯类、新鲜蔬菜、新鲜水果、豆类及其制品和坚果类;不健康植物性食物:大米及其制品、小麦面粉及其制品、含糖饮料、糖果巧克力、油炸面食、泡菜和盐腌食品)和动物性食物[蛋类、(发酵)奶类、猪肉、其他畜肉类、禽肉类、动物内脏、水产品、加工肉制品和糕点冰淇淋]。对植物性食物进行正向赋分(参与者的摄入量高于最高五分位数获得5分,处于最高和第二高五分位数之间时获得4分,依此类推,摄入量低于最低五分位数获得1分),对动物性食物进行反向赋分(参与者的摄入量高于最高五分位数获得1分,处于最高和第二高五分位数之间时获得2分,依此类推,摄入量低于最低五分位数获得5分),用于计算PDI;对健康植物性食物进行正向赋分,对不健康植物性食物和动物性食物进行反向赋分,用于计算hPDI;对不健康植物性食物进行正向赋分,对健康植物性食物和动物性食物进行反向赋分,用于计算uPDI^[19]。本研究还调查了饮茶情况,计算PDI和hPDI时,当前饮茶者获得5分而不饮茶者获得1分;计算uPDI时,得分相反。将21个食物组和饮茶情况的分值相加计算PDI、hPDI和uPDI,指数的理论范围为22~110。

1.3 新发T2D病例的识别

借由绑定了居民医疗保险卡的电子信息系统获取基线调查参与者的门诊就诊、住院记录、处方开具和死亡情况。将随访期间被医生诊断为T2D(空腹血糖 $\geq 7.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或2 h口服葡萄糖耐量试验 $\geq 11.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或糖化血红蛋白 $\geq 6.5\%$ 或具备典型的高血糖(危象)症状及随机血糖 $\geq 11.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)^[20]或者无医生诊断但本人具备T2D用药记录的参与者定义为新发T2D患者,首诊为T2D的时间和首次开具糖尿病药物的时间作为T2D的发病时间。如果随访期间参与者新发T2D,随访时间是基线调查与T2D发病之间的时间间隔;如果随访期间参与者未新发T2D,则被定义为删失数据,随访时间是基线调查与死亡/研究截止之间的时间间隔。随访截止时间为2022年9月21日。

1.4 混杂因素的评估

将每天至少一支烟,连续吸烟6个月以上定义为当前吸烟;将每周至少三次,连续饮酒(饮茶)6个月以上定义为当前饮酒(饮茶);基于国际体力活动量表调查并计算每周体育锻炼活动量(以下简称“体育锻炼活动量”),本量表使用能量代谢当量(metabolic equivalent of energy, MET)作为单位^[21];

基线体格检查身体质量指数(body mass index, BMI) $< 18.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 被认为偏瘦, $18.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} \leq \text{BMI} < 24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 被认为正常, $24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} \leq \text{BMI} < 28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 被认为超重, $\text{BMI} \geq 28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 被认为肥胖^[22];基线腰围男性 $\geq 90 \text{ cm}$ 或女性 $\geq 85 \text{ cm}$ ^[22-23]时被视为存在中心性肥胖;基线血检结果中总胆固醇 $\geq 6.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或甘油三酯 $\geq 2.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或低密度脂蛋白胆固醇 $\geq 4.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或高密度脂蛋白胆固醇 $< 1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[24]被视为存在血脂异常;基线调查时自我报告高血压或医学体格检查收缩压 $\geq 140 \text{ mmHg}$ 或舒张压 $\geq 90 \text{ mmHg}$ ^[25]被视为患高血压。

1.5 统计学分析

符合正态分布的连续变量以均值 $\pm$ 标准差的形式表示,依据方差齐性检验结果采用独立样本 t 检验或 t' 检验比较组间差异;不符合正态分布的连续变量以中位数和第25、75百分位数 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示,采用Wilcoxon秩和检验比较组间差异;分类变量以频数(百分比)表示,采用卡方检验比较组间差异。

采用多变量调整的Cox比例风险回归模型估计食物组摄入量、健康植物性膳食指数与T2D发生风险的关联,结合限制性立方样条(restricted cubic spline, RCS)探索两者之间的非线性关联(P 值经由似然比检验估计)。在拟合Cox比例风险回归模型前通过schoenfeld残差法对植物性食物摄入量、PDI、hPDI和uPDI进行等比例风险假设检验,未提示不满足假设检验的因素。

此外,研究采用剔除模型进行替代效应分析,其基本原理是:因为本研究定义三类食物组(植物性食物、动物性食物和加工食品)不存在食物类别交叉且FFQ问卷所涉及的29种食物组涵盖了研究对象日常摄入的所有食物种类,在控制总能量和某一类型食物组摄入量不变的情况下,剩余两种类型食物组摄入量的变化定为等比例的此消彼长。

本研究中双侧 $P < 0.05$ 时差异有统计学意义,数据采用R 4.0.5进行统计分析。

2 结果

2.1 队列一般人口学特征

本研究排除无膳食摄入或随访数据的参与者,排除基线自报患癌和已患糖尿病(基线调查时已被诊断为糖尿病或者基线体检结果显示其糖化血红蛋白 $\geq 6.5\%$)^[20]的参与者,不考虑1型糖尿病患者。此外,每日膳食总能量摄入(含烹调用品摄入量)极端者(即男性

的每日总能量摄入 > 16 720 kJ 或 < 3 344 kJ, 女性的每日总能量摄入 > 14 630 kJ 或 < 2 090 kJ^[26] 亦被排除。最终, 29 016 名研究对象被纳入本次分析, 筛选流程见图 1。

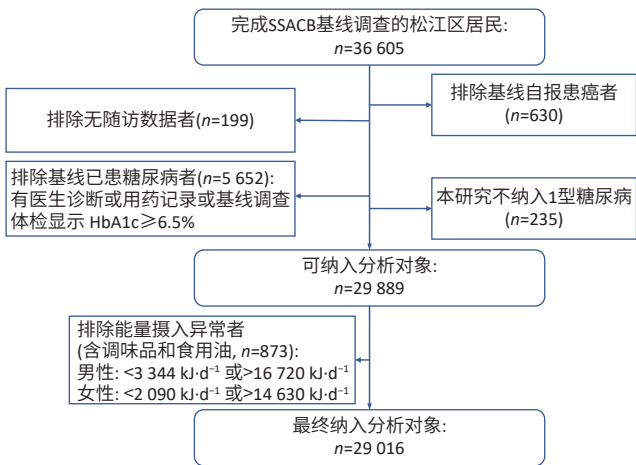


图 1 研究对象筛选流程

Figure 1 Flowchart for SSACB study participants' selection

纳入本研究的对象在基线调查时年龄为(55.3±11.6)岁。在随访期间, 有 1 501 名(5.2%)新发 T2D 患者, 人群的中位随访时间为 5.688 年(95%CI: 5.688~5.707 年)。与未患 T2D 的参与者相比, 新发 T2D 者年龄更大、受教育年限更低、已婚、当前饮酒、睡眠时间更短、体育锻炼活动量更高, 更高比例的居民有糖尿病家族史、超重肥胖、中心性肥胖、血脂异常和高血压(所有 $P < 0.05$, 表 1)。

2.2 膳食摄入概况

本研究人群的人均每日总能量摄入量(7 309.9±2 725.4)kJ, 植物性食物每日摄入量中位数为 669.0 g [四分位数范围: (500.9, 859.3)]。较未患 T2D 的参与者, 新发 T2D 居民每日摄入的植物性食物更少($P = 0.032$), 尤其是小麦面粉及其制品、杂粮类和新鲜水果(所有 $P < 0.001$), 但大米及其制品摄入较多($P = 0.001$), 见表 2。

2.3 不同类型食物摄入量与 T2D 发生风险的关联

多因素 Cox 比例风险回归模型拟合结果显示(图 2), 植物性食物摄入量与新发 T2D 呈负相关 [校正 HR(95%CI): 0.983(0.969~0.998), $P_{趋势} = 0.037$], 额外校正基线吸烟情况、BMI 和高血压患病情况后植物性食物摄入与新发 T2D 仍然呈负相关(所有 $P < 0.05$, 表 3); 分段拟合结果进一步提示植物性食物每日摄入量低于 500.9 g 者的 T2D 发生风险高于每日摄入量高于 859.3 g 者 [校正 HR(95%CI): 1.250(1.012~1.544)]; 未发现动物性食物 [校正 HR(95%CI): 1.006(0.987~

1.026)] 和加工食品 [校正 HR(95%CI): 0.978(0.944~1.014)] 摄入与 T2D 发生风险相关(图 2), 额外校正基线吸烟情况、BMI 和高血压患病情况后结论无显著改变(表 3)。此外, 交互作用结果显示, 植物性食物摄入量与 T2D 发生风险的关联在不同特征人群中的差异无统计学意义(所有 $P > 0.05$, 详见表 4)。

表 1 SSACB 松江区居民的一般人口学特征 (n=29 016)
Table 1 Baseline characteristics of participants in Songjiang District from SSACB (n=29 016)

变量	全人群	未患T2D	新发T2D	P
n(%)	29 016	27 515	1 501	—
年龄/岁	55.3±11.6	55.1±11.7	59.8±9.1	<0.001
性别				
女性	17 418	16 535(94.9)	883(5.1)	0.343
男性	11 598	10 980(94.7)	618(5.3)	
受教育年限/年				<0.001
<6	3 931	3 637(92.5)	294(7.5)	
6~<9	8 922	8 365(93.8)	557(6.2)	
9~<12	13 958	13 342(95.6)	616(4.4)	
≥12	1 511	1 488(98.5)	23(1.5)	
婚姻状况				0.003
已婚	26 946	25 534(94.8)	1 412(5.2)	
离异/丧偶	1 627	1 547(95.1)	80(4.9)	
未婚	429	422(98.4)	7(1.6)	
当前饮酒	3 650	3 429(93.9)	221(6.1)	0.011
当前吸烟	5 762	5 459(94.7)	303(5.3)	0.768
当前饮茶	8 479	8 034(94.8)	445(5.2)	0.732
睡眠时长/(h·d ⁻¹)				0.008
<6	5 031	4 728(94.0)	303(6.0)	
6~<8	17 732	16 834(94.9)	898(5.1)	
≥8	6 253	5 953(95.2)	300(4.8)	
体育锻炼活动量/MET				0.018
<600	3 738	3 570(95.5)	168(4.5)	
600~<4 000	19 156	18 176(94.9)	980(5.1)	
4 000~<8 000	5 616	5 299(94.4)	317(5.6)	
≥8 000	506	470(92.9)	36(7.1)	
BMI				<0.001
偏瘦	835	816(97.7)	19(2.3)	
正常	13 555	13 012(96.0)	543(4.0)	
超重	10 881	10 273(94.4)	608(5.6)	
肥胖	3 257	2 956(90.8)	301(9.2)	
腰围/cm	80.9 ± 9.3	80.7±9.2	84.1±9.1	<0.001
糖尿病家族史	2 867	2 662(92.8)	205(7.2)	<0.001
中心性肥胖	3 023	2 813(93.1)	210(6.9)	<0.001
血脂异常	7 309	6 808(93.1)	501(6.9)	<0.001
高血压	14 037	13 026(92.8)	1 011(7.2)	<0.001

[注] 年龄和腰围以均数±标准差表示, 采用独立样本 t 检验比较组间差异; 其余分类变量均以频数(百分比)表示, 采用卡方检验比较组间差异。

表 2 SSACB 松江区居民每日膳食摄入概况 ($n=29016$)

Table 2 Daily intakes of different food sources of 29016 participants in Songjiang District from SSACB ($n=29016$)

变量	全人群	未患T2D	新发T2D	<i>P</i>
<i>n</i> (%)	29016	27515	1501	—
总能量摄入量/ ($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)	7309.9 $\pm$ 2725.4	7311.7 $\pm$ 2726.5	7277.0 $\pm$ 2705.4	0.628
植物性食物/($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	669.0(500.9, 859.3)	669.5(501.2, 860.5)	656.5(490.5, 841.6)	0.032
大米及其制品	300.0(150.0, 400.0)	300.0(150.0, 400.0)	300.0(150.0, 450.0)	0.001
小麦面粉及其制品	23.2(7.0, 29.0)	23.2(7.0, 29.0)	14.5(3.5, 29.0)	<0.001
杂粮类	7.0(1.0, 18.0)	7.0(1.0, 20.3)	4.0(0.0, 14.5)	<0.001
薯类	14.5(5.6, 29.0)	14.5(5.6, 29.0)	14.5(3.5, 29.0)	0.082
新鲜蔬菜	171.1(100.0, 289.6)	171.1(100.0, 290.6)	171.1(87.0, 283.7)	0.086
新鲜水果	58.0(29.0, 142.0)	60.0(29.0, 145.0)	50.0(29.0, 100.0)	<0.001
豆类及其制品	14.5(7.0, 30.5)	14.5(7.0, 31.0)	14.5(3.5, 29.0)	<0.001
坚果类	3.5(0.8, 14.5)	3.5(1.0, 14.5)	3.5(0.2, 14.5)	0.001
动物性食物/($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	171.1(102.3, 277.2)	171.7(103.0, 278.0)	156.1(91.4, 260.7)	<0.001
蛋类	14.5(14.5, 35.5)	14.5(14.5, 35.5)	14.5(14.50, 35.5)	0.001
(发酵)奶类	14.0(0.0, 99.2)	15.5(0.0, 99.2)	4.0(0.0, 92.1)	<0.001
猪肉	29.0(14.5, 36.5)	29.0(14.5, 37.7)	29.0(14.5, 35.5)	0.355
其他畜肉类	3.5(1.0, 8.0)	3.5(1.0, 8.4)	3.5(0.4, 7.0)	<0.001
禽肉类	7.0(3.5, 21.8)	7.0(3.5, 21.8)	7.0(3.5, 14.5)	0.001
动物内脏	0.4(0.0, 3.5)	0.5(0.0, 3.5)	0.00(0.0, 3.5)	<0.001
水产品	43.0(21.5, 66.4)	43.0(21.5, 68.0)	39.5(19.5, 65.0)	0.001
加工食品/($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	33.8(14.9, 69.5)	34.0(15.0, 70.3)	32.0(14.5, 60.7)	<0.001
含糖饮料	0.0(0.0, 16.0)	0.0(0.0, 16.8)	0.0(0.0, 10.0)	<0.001
糖果巧克力	0.0(0.0, 1.0)	0.0(0.0, 1.0)	0.0(0.0, 0.6)	<0.001
油炸面食	1.0(0.0, 7.0)	1.0(0.0, 7.0)	0.6(0.0, 6.0)	0.021
泡菜和盐腌食品	4.4(0.8, 14.5)	4.4(0.8, 14.5)	5.8(1.0, 14.5)	0.175
加工肉制品	0.0(0.0, 3.5)	0.0(0.0, 3.5)	0.0(0.0, 2.8)	0.001
糕点冰淇淋	7.00(1.0, 14.5)	7.0(1.1, 14.5)	7.0(1.0, 14.5)	0.248

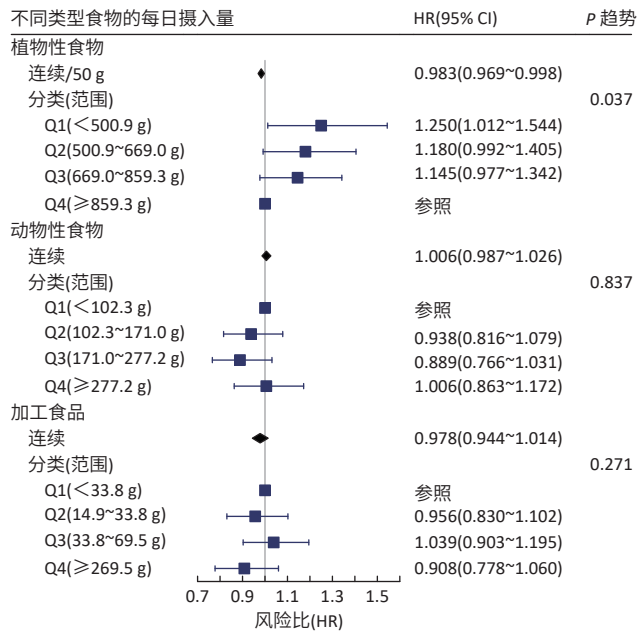
[注] 总能量每日摄入量以均值 $\pm$ 标准差表示,采用独立样本 *t* 检验比较组间差异,其余食物组的每日摄入量均以中位数(四分位数范围)表示,采用 Wilcoxon 秩和检验比较组间差异。

替代分析结果显示(表 5),用等量(50 g)的植物性食物替代动物性食物和加工食品均可显著降低 T2D 的发生风险,校正 HR(95%CI)分别为 0.982(0.968~0.996)和 0.983(0.969~0.998),该结果在补充模型中仍然成立。

2.4 PDI、hPDI 和 uPDI 与 T2D 发生风险的关联

本研究人群 PDI(42~91)、hPDI(36~85)和 uPDI(35~97)的均值分别为 66.5 $\pm$ 5.8、60.1 $\pm$ 6.0 和 66.0 $\pm$ 8.7。RCS 拟合结果显示(图 3),PDI 与 T2D 发生风险非线性相关,得分高于 64.5 时显著负相关($P_{\text{非线性}}=0.023$);hPDI 与新发 T2D 之间亦存在非线性关联($P_{\text{非线性}}=0.016$),

整体显著负相关($P=0.029$);未发现 uPDI 与 T2D 发生风险显著相关($P=0.05$);额外校正基线吸烟和高血压患病情况后,结果无明显变化。



[注] 采用多因素校正的 Cox 比例风险回归模型进行拟合分析。校正因素包括基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、体育锻炼活动量(MET)和腰围(cm)。

图 2 不同类型食物摄入量与 T2D 发生风险的关联

Figure 2 Associations of intakes of different food sources with the risk of incident T2D

表 3 不同类型食物摄入量与 T2D 发生风险的关联(补充模型)

Table 3 Associations of intakes of different food sources with the risk of incident T2D (supplementary models)

每日摄入量/50 g	HR(95%CI)	<i>P</i>
补充模型1		
植物性食物	0.982(0.968~0.996)	0.011
动物性食物	1.007(0.988~1.027)	0.461
加工食品	0.980(0.946~1.016)	0.269
补充模型2		
植物性食物	0.981(0.967~0.995)	0.008
动物性食物	1.006(0.987~1.026)	0.540
加工食品	0.981(0.946~1.016)	0.283

[注] 补充模型 1 校正因素: 基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、吸烟、体育锻炼活动量(MET)、腰围(cm)和高血压患病情况;补充模型 2 基于补充模型 1 将腰围替换为 BMI($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。

此外,交互作用结果显示,uPDI 与 T2D 发生风险的关联在是否存在中心性肥胖($P_{\text{交互}}=0.017$)和血脂异常($P_{\text{交互}}=0.032$)的人群中差异有统计学意义(详见表 6)。uPDI 的亚组分析结果显示,uPDI 与 T2D 发生风险的正相关仅在无中心性肥胖($P=0.041$)或血脂异常($P=0.005$)的人群中显著(详见图 4)。

表 4 不同人群特征与植物性食物摄入量的交互作用

Table 4 Interactions of selected characteristics and plant foods intake on the risk of incident T2D

人群特征	$P_{交互}$
年龄/岁	0.705
性别	0.881
当前饮酒	0.398
当前吸烟	0.575
体育锻炼活动量/MET	0.142
糖尿病家族史	0.104
中心性肥胖	0.257
血脂异常	0.722
高血压	0.611

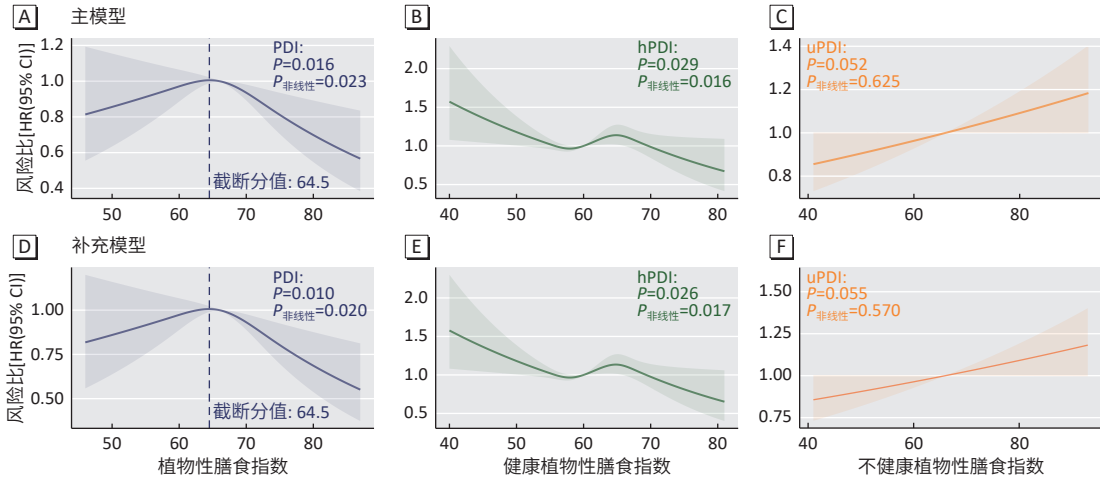
[注] 采用多因素校正的 Cox 比例风险回归模型进行交互作用分析, 结局为新发 T2D, 模型纳入的因素包含基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、吸烟、体育锻炼活动量(MET)、腰围(cm)、是否患高血压和植物性食物摄入量($50\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$)及其与不同人群特征的交互项。

表 5 不同类型食物的等量 (50 g) 替代分析

Table 5 Risk of incident T2D associated with isometric (50 g) replacement between different food sources

替代食物组	被替代的食物组	
	动物性食物	加工食品
主模型		
植物性食物	0.982(0.968~0.996)	0.983(0.969~0.998)
动物性食物	—	1.006(0.987~1.025)
加工食品	0.973(0.938~1.009)	—
补充模型1		
植物性食物	0.980(0.966~0.995)	0.982(0.968~0.996)
动物性食物	—	1.007(0.988~1.027)
加工食品	0.974(0.940~1.010)	—
补充模型2		
植物性食物	0.980(0.965~0.994)	0.981(0.967~0.995)
动物性食物	—	1.006(0.987~1.026)
加工食品	0.975(0.940~1.011)	—

[注] 表中数据为校正 HR(95%CI)。主模型校正因素包括基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、体育锻炼活动量(MET)和腰围(cm); 补充模型 1 额外校正基线吸烟和高血压患病情况; 补充模型 2 基于补充模型 1 将腰围替换为 BMI($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。



[注] 实线代表 HR 值, 阴影部分表示 95%CI。HR(95%CI)通过拟合基于 COX 比例风险回归模型的限制性立方样条计算得到。A、B 和 C 的校正因素: 基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、体育锻炼活动量(MET)和腰围(cm); D、E 和 F 额外校正了基线吸烟和高血压患病情况。

图 3 PDI、hPDI 和 uPDI 与 T2D 发生风险的关联

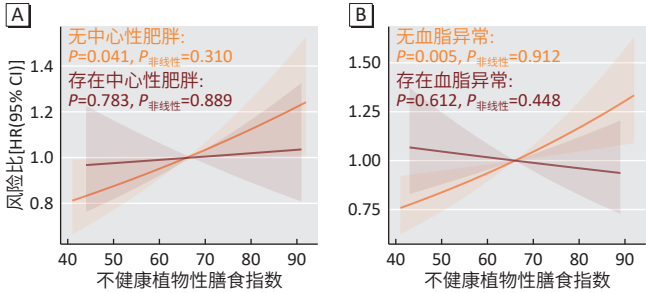
Figure 3 Associations of PDI, hPDI and uPDI with the risk of incident T2D

表 6 不同人群特征与 PDI、hPDI 和 uPDI 的交互作用

Table 6 Interactions of selected characteristics and PDI, hPDI and uPDI on the risk of incident T2D

人群特征	$P_{交互}$		
	PDI	hPDI	uPDI
年龄/岁	0.943	0.851	0.409
性别	0.110	0.732	0.802
当前饮酒	0.301	0.896	0.720
当前吸烟	0.616	0.560	0.540
体育锻炼活动量/(MET)	0.863	0.895	0.374
糖尿病家族史	0.858	0.806	0.297
中心性肥胖	0.944	0.091	0.017
血脂异常	0.223	0.257	0.032
高血压	0.066	0.153	0.704

[注] 表中数据为 $P_{交互}$ 值。采用多因素校正的 Cox 比例风险回归模型进行交互作用分析, 结局为新发 T2D, 模型纳入的因素包含基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、吸烟、体育锻炼活动量(MET)、腰围(cm)、是否患高血压和 PDI/hPDI/uPDI 及其与不同人群特征的交互项。



[注] A: 中心性肥胖; B: 血脂异常。实线表示 HR 值, 阴影部分表示 95%CI; 橘红色代表无中心性肥胖/血脂异常人群, 深红色代表存在中心性肥胖/血脂异常人群。HR(95%CI)通过拟合基于 COX 比例风险回归模型的限制性立方样条计算得到; 校正因素: 基线年龄、性别、糖尿病家族史、总能量摄入量($\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$)、饮酒、吸烟、体育锻炼活动量(MET)、腰围(cm)和高血压患病情况。

图 4 uPDI 与 T2D 发生风险关联的亚组分析

Figure 4 Subgroup analyses of the associations between uPDI and the risk of incident T2D

3 讨论

本研究结果显示,在 SSACB 队列中,植物性食物(未加工)摄入量与 T2D 发生风险降低显著相关[HR(95%CI): 0.983(0.969~0.998)];用等量(50 g)的植物性食物替代动物性食物[HR(95%CI): 0.982(0.968~0.996)]或加工食品[HR(95%CI): 0.983(0.969~0.998)]均可显著降低 T2D 的发生风险;hPDI 与新发 T2D 之间存在非线性负相关($P_{\text{非线性}}=0.016$, $P_{\text{整体}}=0.029$)。

多个国家的前瞻性队列研究结果表明,摄入植物性食物,尤其是健康植物性食物(如全谷物、蔬菜、水果、坚果和豆类)与 T2D 风险降低有关^[12, 15, 19, 27-28];前瞻性队列研究的荟萃分析结果亦表明,遵循植物性饮食,特别是健康植物性饮食,与 T2D 风险降低相关^[9-10];与在 SSACB 队列中观察到的结果一致。植物性饮食的健康效益可能是多因素共同作用的结果,现有研究表明其机制包括但不限于:(1)植物性食物的能量密度低于动物性食物和加工食品,易产生饱腹感,降低总能量摄入^[29-30];(2)健康植物性食物中含有微生物可及碳水化合物(包括抗性淀粉、 β 葡聚糖、果胶、菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖),肠道细菌可通过代谢微生物可及碳水化合物促进短链脂肪酸的生成,触发胰高血糖素样肽-1 的产生,进而降低血糖^[31-32]。其富含的 α -亚麻酸、亚油酸等不饱和脂肪酸可预防肝脏脂肪生成、脂肪变性^[33]以及胰岛素抵抗^[34],同时其不含膳食胆固醇和反式脂肪且饱和脂肪酸含量低^[35]。此外,来源于植物蛋白质的氨基酸谱有益于葡萄糖代谢^[36-39];(3)健康植物性食物中富含多种植物化学物(如多酚、类胡萝卜素和皂苷)^[40-45],可以通过减少脂质过氧化、DNA 氧化损伤、炎症并增强抗氧化防御来促进 β 细胞存活^[46]。

本研究尽管基于经验证的 FFQ 开展,但仍可能低估研究对象的膳食摄入量,且随着随访时间的延长,人群改变膳食结构的可能性增大,个体变异可能影响结果的准确性;此外,研究的中位随访时间为 5.69 年,仍需继续随访收集参与者的结局数据,进一步验证现有研究结果。

综上所述,植物性食物尤其是健康植物性食物摄入有利于 T2D 发生风险的降低。为预防 T2D,可建议上海市居民提高植物性食物(未加工)的每日摄入量,用植物性食物替代动物性食物和加工食品,增加健康植物性食物的摄入。

参考文献

[1] International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas, 10th edn. Brussels,

Belgium: 2021. Available at: <https://www.diabetesatlas.org>

- [2] World Health Organization. Global report on diabetes[R]. Geneva: World Health Organization, 2016.
- [3] NEUENSCHWANDER M, BALLON A, WEBER KS, et al. Role of diet in type 2 diabetes incidence: umbrella review of meta-analyses of prospective observational studies[J]. *BMJ*, 2019, 366: l2368.
- [4] OZA MJ, LADDHA AP, GAIKWAD AB, et al. Role of dietary modifications in the management of type 2 diabetic complications[J]. *Pharmacol Res*, 2021, 168: 105602.
- [5] 中华医学会糖尿病学分会. 中国2型糖尿病防治指南(2020年版)[J]. 中华糖尿病杂志, 2021, 13(4): 315-409.
- Chinese Diabetes Society. Guideline for the prevention and treatment of type 2 diabetes mellitus in China (2020 edition)[J]. *Chin J Diabetes Mellitus*, 2021, 13(4): 315-409.
- [6] BLOOMFIELD HE, KOELLER E, GREER N, et al. Effects on health outcomes of a Mediterranean diet with no restriction on fat intake: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Intern Med*, 2016, 165(7): 491-500.
- [7] SARSANGI P, SALEHI-ABARGOUEI A, EBRAHIMPOUR-KOUJAN S, et al. Association between adherence to the mediterranean diet and risk of type 2 diabetes: an updated systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies[J]. *Adv Nutr*, 2022, 13(5): 1787-1798.
- [8] JANNASCH F, KRÖGER J, SCHULZE MB. Dietary patterns and type 2 diabetes: a systematic literature review and meta-analysis of prospective studies[J]. *J Nutr*, 2017, 147(6): 1174-1182.
- [9] WANG Y, LIU B, HAN H, et al. Associations between plant-based dietary patterns and risks of type 2 diabetes, cardiovascular disease, cancer, and mortality—a systematic review and meta-analysis[J]. *Nutr J*, 2023, 22(1): 46.
- [10] QIAN F, LIU G, HU FB, et al. Association between plant-based dietary patterns and risk of type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. *JAMA Intern Med*, 2019, 179(10): 1335-1344.
- [11] CHIU TH T, PAN WH, LIN MN, et al. Vegetarian diet, change in dietary patterns, and diabetes risk: a prospective study[J]. *Nutr Diabetes*, 2018, 8(1): 12.
- [12] YANG X, LI Y, WANG C, et al. Association of plant-based diet and type 2 diabetes mellitus in Chinese rural adults: the Henan Rural Cohort Study[J]. *J Diabetes Invest*, 2021, 12(9): 1569-1576.
- [13] CHEN B, ZENG J, QIN M, et al. The association between plant-based diet indices and obesity and metabolic diseases in Chinese adults: longitudinal analyses from the China health and nutrition survey[J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 881901.
- [14] Chen GC, Koh WP, Neelakantan N, et al. Diet Quality Indices and Risk of Type 2 Diabetes Mellitus: The Singapore Chinese Health Study[J]. *Am J Epidemiol*, 2018, 187(12): 2651-2661.
- [15] KIM J, GIOVANNUCCI E. Healthful plant-based diet and incidence of type 2 diabetes in Asian population[J]. *Nutrients*, 2022, 14(15): 3078.
- [16] ZHAO Q, CHEN B, WANG R, et al. Cohort profile: protocol and baseline survey for the Shanghai Suburban Adult Cohort and Biobank (SSACB) study[J]. *BMJ Open*, 2020, 10(7): e035430.
- [17] 杨月欣. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2005.
- YANG Y X. China food composition tables[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2005.
- [18] YUAN Y Q, LI F, MENG P, et al. Gender difference on the association between dietary patterns and obesity in Chinese middle-aged and elderly populations[J]. *Nutrients*, 2016, 8(8): 448.
- [19] SATIJA A, BHUPATHIRAJU SN, RIMM EB, et al. Plant-based dietary patterns

- and incidence of type 2 diabetes in US men and women: results from three prospective cohort studies[J]. *PLoS Med*, 2016, 13(6): e1002039.
- [20] ELSAYED N A, ALEPPO G, ARODA V R, et al. 2. Classification and diagnosis of diabetes: *standards of care in diabetes-2023* [J]. *Diabetes Care*, 2023, 46(Suppl 1): S19-S40.
- [21] 樊萌语, 吕筠, 何平平. 国际体力活动问卷中体力活动水平的计算方法[J]. *中华流行病学杂志*, 2014, 35(8): 961-964.
- FANG M Y, LYU J, HE P P. Chinese guidelines for data processing and analysis concerning the International Physical Activity Questionnaire[J]. *Chin J Epidemiol*, 2014, 35(8): 961-964.
- [22] 中华医学会, 中华医学会杂志社, 中华医学会全科医学分会, 等. 肥胖症基层诊疗指南(实践版·2019)[J]. *中华全科医师杂志*, 2020, 19(2): 102-107.
- Chinese Medical Association, Chinese Medical Journals Publishing House, Chinese Society of General Practice, et al. Guideline for primary care of obesity: practice version (2019)[J]. *Chin J Gen Pract*, 2020, 19(2): 102-107.
- [23] LIU M M, LIU Q J, WEN J, et al. Waist-to-hip ratio is the most relevant obesity index at each phase of insulin secretion among obese patients[J]. *J Diabetes Complications*, 2018, 32(7): 670-676.
- [24] 中华医学会, 中华医学会杂志社, 中华医学会全科医学分会, 等. 血脂异常基层诊疗指南(实践版·2019)[J]. *中华全科医师杂志*, 2019, 18(5): 417-421.
- Chinese Medical Association, Chinese Medical Journals Publishing House, Chinese Society of General Practice, et al. Guideline for primary care of dyslipidemias: practice version (2019)[J]. *Chin J Gen Pract*, 2019, 18(5): 417-421.
- [25] 中华医学会, 中华医学会杂志社, 中华医学会全科医学分会, 等. 高血压基层诊疗指南(实践版·2019)[J]. *中华全科医师杂志*, 2019, 18(8): 723-731.
- Chinese Medical Association, Chinese Medical Journals Publishing House, Chinese Society of General Practice, et al. Guideline for primary care of hypertension: practice version (2019)[J]. *Chin J Gen Pract*, 2019, 18(8): 723-731.
- [26] WILKENS L R, LEE J. Nutritional epidemiology[M]. *Nutritional Epidemiology*, 1990.
- [27] CHEN Z, ZUURMOND M G, VAN DER SCHAFT N, et al. Plant versus animal based diets and insulin resistance, prediabetes and type 2 diabetes: the Rotterdam Study[J]. *Eur J Epidemiol*, 2018, 33(9): 883-893.
- [28] TONSTAD S, STEWART K, ODA K, et al. Vegetarian diets and incidence of diabetes in the Adventist Health Study-2[J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2013, 23(4): 292-299.
- [29] NAJJAR R S, FERESIN R G. Plant-based diets in the reduction of body fat: physiological effects and biochemical insights[J]. *Nutrients*, 2019, 11(11): 2712.
- [30] 尹仕红. 植物性食物为主的膳食对肥胖和糖尿病的影响[J]. *慢性病学杂志*, 2019, 20(7): 1004-1006.
- YIN S H. Effects of plant-based diet on obesity and diabetes[J]. *Chronic Pathematol J*, 2019, 20(7): 1004-1006.
- [31] KOH A, DE VADDER F, KOVATCHEVA-DATCHARY P, et al. From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites[J]. *Cell*, 2016, 165(6): 1332-1345.
- [32] DRUCKER D J. Mechanisms of action and therapeutic application of glucagon-like peptide-1[J]. *Cell Metab*, 2018, 27(4): 740-756.
- [33] ROSQVIST F, IGGMAN D, KULLBERG J, et al. Overfeeding polyunsaturated and saturated fat causes distinct effects on liver and visceral fat accumulation in humans[J]. *Diabetes*, 2014, 63(7): 2356-2368.
- [34] RISÉRUS U, WILLETT W C, HU F B. Dietary fats and prevention of type 2 diabetes[J]. *Prog Lipid Res*, 2009, 48(1): 44-51.
- [35] U. S. Department of Agriculture. DRI calculator for healthcare professionals [EB/OL]. [2023-10-20]. <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search>.
- [36] KAHLEOVA H, FLEEMAN R, HLOZKOVA A, et al. A plant-based diet in overweight individuals in a 16-week randomized clinical trial: metabolic benefits of plant protein[J]. *Nutr Diabetes*, 2018, 8(1): 58.
- [37] HOSSEINPOUR-NIAZI S, MIRMIRAN P, HEDAYATI M, et al. Substitution of red meat with legumes in the therapeutic lifestyle change diet based on dietary advice improves cardiometabolic risk factors in overweight type 2 diabetes patients: a cross-over randomized clinical trial[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2015, 69(5): 592-597.
- [38] HOSSEINPOUR-NIAZI S, MIRMIRAN P, HADAEGH F, et al. Improvement of glycemic indices by a hypocaloric legume-based DASH diet in adults with type 2 diabetes: a randomized controlled trial[J]. *Eur J Nutr*, 2022, 61(6): 3037-3049.
- [39] SCHWINGSHACKL L, HOFFMANN G, IQBAL K, et al. Food groups and intermediate disease markers: a systematic review and network meta-analysis of randomized trials[J]. *Am J Clin Nutr*, 2018, 108(3): 576-586.
- [40] LIU R H. Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet [J]. *Adv Nutr*, 2013, 4(3): 384S-392S.
- [41] SLAVIN J. Why whole grains are protective: biological mechanisms[J]. *Proc Nutr Soc*, 2003, 62(1): 129-134.
- [42] MULLINS A P, ARJMANDI B H. Health benefits of plant-based nutrition: focus on beans in cardiometabolic diseases[J]. *Nutrients*, 2021, 13(2): 519.
- [43] ALASALVAR C, SALVADÓ J S, ROS E. Bioactives and health benefits of nuts and dried fruits[J]. *Food Chem*, 2020, 314: 126192.
- [44] WILLEMS M E T, ŞAHIN M A, COOK M D. Matcha green tea drinks enhance fat oxidation during brisk walking in females[J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2018, 28(5): 536-541.
- [45] SOLVERSON P M, RUMPLER W V, LEGER J L, et al. Blackberry feeding increases fat oxidation and improves insulin sensitivity in overweight and obese males[J]. *Nutrients*, 2018, 10(8): 1048.
- [46] DEL CARMEN FERNÁNDEZ-FÍGARES JIMÉNEZ M. Plant foods, healthy plant-based diets, and type 2 diabetes: a review of the evidence[J]. *Nutr Rev*, 2023, 7: nuad099.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 顾心怡, 汪源)