·环境与职业卫生·

模拟干预居住地绿色空间暴露对高血压患病率的收益评估

陈柯君[1],韩欣雨[2],杨勇新[1],赵星[3],汪鹏[1]
1.陆军军医大学第一附属医院医学大数据与人工智能中心,重庆 400038;
2.南方医科大学南方医院肾内科;
3.四川大学华西公共卫生学院 / 华西第四医院流行病与卫生统计学系

摘要:目的　量化模拟干预居住地绿色空间暴露对高血压患病的健康收益,为构建合理有效的健康城市规划体系提供科学证据。**方法**　基于中国区县级归一化植被指数(the normalized difference vegetation index,NDVI)暴露水平、人口分布及NDVI- 高血压相对风险数据,运用 Miettinen 公式,评估等量、静态、动态和修正干预 NDVI 导致高血压患病率降低的程度。**结果**　研究人群 NDVI 暴露每提升 0.10、0.20 和 0.30 个单位时,高血压病例数可对应减少 13.99%(13.97% ~ 14.01%)、25.97%(25.92% ~ 26.02%)和 36.00%(35.88% ~ 36.11%)。将 NDVI 提升到最大观察值(0.82)或≥P_{75}时,可预防 20.84%(17.11% ~ 24.58%)和 6.21%(5.82% ~ 6.59%)的高血压患病。**结论**　四种绿色空间干预方案均可降低 HTN 患病率,其中等量干预效应更好,未来可形成多元协同的高血压防控模式。

关键词:绿地;高血压;模拟干预;Miettinen 公式
中图分类号:R544.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1003-8507(2026)05-809-06
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202504468

Evaluation of the health benefits of simulated interventions to residential greenness exposure on hypertension prevalence

CHEN Ke-jun*, HAN Xin-yu, YANG Yong-xin, ZHAO Xing, WANG Peng
Center for Medical Big Data and Artificial Intelligence, The First Hospital Affiliated Army Medical University, Chongqing 400038, China

Abstract: Objective To quantify the health benefits of simulated interventions to residential greenness exposure on the prevalence of hypertension (HTN), and to provide scientific evidence for the construction of a reasonable and effective healthy city planning system. **Methods** Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) exposure levels at the county level in China, population distribution, and NDVI-HTN relative risk data, the Miettinen formula was used to evaluate the degree of reduction in HTN prevalence caused by equal amounts, static, dynamic and modified intervention NDVI. **Results** The number of prevalent HTN cases decreased by 13.99% (13.97%-14.01%), 25.97% (25.92%-26.02%) and 36.00% (35.88%-36.11%) for every 0.10, 0.20, or 0.30 units increase of NDVI exposure in the study population. When NDVI was elevated to the maximum observation value (0.82) or above P_{75}, 20.84% (17.11%-24.58%) and 6.21% (5.82%-6.59%) of HTN cases could be prevented. **Conclusion** All four greenness intervention schemes can reduce the prevalence of HTN. Among them, the equal intervention effect is better. In the future, a multi-dimensional and collaborative hypertension prevention and control strategy could be developed.

Keywords: Greenness; Hypertension; Simulated intervention; Miettinen formula

高血压是全球心血管疾病和过早死亡的主要危险因素之一[1]。据估计,全球范围内,2017 年因收缩压异常升高而导致的死亡病例高达 1 040 万例(占总死亡人数的 30.4%)[1]。与此同时,由高血压造成的经济损失约占全球整体医疗保健支出的 10%[2]。多项全国性调查表明,中国成年人高血压患病率约为 27.9%[3],且逐年上升。面对这一挑战,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)将降低高血压患病率作为非传染性疾病防控的重要目标之一,设定了 2030 年患病率下降 33%的目标[4]。鉴于此,采取切实有效的干预措施,以遏制高血压的进一步蔓延,已成为各国公共卫生领域亟待解决的关键问题。

基金项目:发热门诊智能化诊疗服务体系研究与应用(CSTB2022TIAD-KPX0167);重庆市技术创新与应用发展专项
作者简介:陈柯君(1999—),女,硕士,助理工程师,研究方向:流行病与卫生统计学
通信作者:汪鹏,E-mail:wangpeng@tmmu.edu.cn

高血压的病因包括遗传、环境和个人行为等因素[5]。其中,居住地绿色空间作为一个重要的生活环境因素,其对高血压的影响受到了极大的关注[6]。有研究发现,居住地绿化可能会降低高血压的患病率[1,7]。但这些研究仅局限于探索绿色环境暴露和高血压的关联性,对改善居住地绿色环境暴露对高血压患病的健康效益的评估不足。本研究基于 Miettinen 公式,量化模拟干预居住地绿色空间暴露水平对高血压患病率的影响,旨在为健康城市规划提供科学参考,从而显著降低高血压疾病负担。

1 资料与方法

1.1 研究数据

1.1.1 NDVI 暴露 归一化植被指数(the normalized difference vegetation index, NDVI)主要反映植被在红光波段(red band, RED)和可见光波段(near-infrared, NIR)的反射值与土壤背景值的差异[1]。其计算公式为[7]:

$$NDVI=\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

本研究利用基于卫星影像的植被指数——NDVI 来评估居住地绿色空间暴露[7]。理论上,NDVI 的有效取值范围为 -1 ~ 1,负值表示存在独立的水、云或雪;值在 0 左右表示贫瘠区域,即岩石、沙子或建筑物;正值表示草地或灌木林。数值越接近 1 代表植被越茂密[7]。

本研究 NDVI 暴露数据源自美国国家航天航空局提供的有关中分辨率成像光谱仪卫星监测的公共数据库(MOD13A3)[8](https://search.earthdata.nasa.gov/search),其空间分辨率为 1km。为区分绿地暴露和生活在邻近水域的潜在影响,本文基于原始的栅格数据,将 NDVI 负值视为缺失值。在此基础上,按照中国区县级行政边界进行求平均数处理得到区县统计口径的逐年 NDVI 平均值。计算 2022—2024 年的年平均 NDVI 水平作为暴露。

1.1.2 人口数量 本研究采用的人口数据来源于官方发布的 2020 年第七次全国人口普查(简称"七普")区县级常住人口统计数据(中国经济社会大数据研究平台[9],https://data.cnki.net/yearbook/)。考虑到七普数据采集时点(2020 年 11 月 1 日)与研究基准年(2025 年)的时间跨度,以及国家统计局公布的近几年间中国人口自然增长率持续走低(年均增长率<0.3‰)的客观现实,认为最新各区县人口规模普查结果对研究期间区域人口分布特征仍具有代表性,因此未对基础人口数据进行动态调整。

1.1.3 NDVI- 高血压暴露 - 反应关系 既往研究表明,NDVI 的升高与高血压患病风险降低存在关联。本文的调整和未调整风险比分别来自一项系统综述和一项中国人群研究[7, 10]中 NDVI 分辨率为 1 km 的结果,参照相关文献,当效应量较小时,使用优势比近似替代相对风险比(risk ratio, *RR*)[6]。为确保数据尺度的一致性,基于线性暴露 - 反应关系的理论假设,运用以下公式将原始数据转换为 NDVI 每增加 0.1 单位所对应的相对风险值 *RR* 及其 95% 置信区间(confidence interval, *CI*)[6]:

$$RR_{convert}=\exp\left[\frac{\ln(RR_{original})}{original\ increment}\times converted\ increment\right] \quad 公式(1)$$

其中 $RR_{original}$ 为原始文献的风险比数据,*original increment* 对应原始尺度,*converted increment* 为 0.1。经过转换,未调整 *RR* 表示为 RR_u,调整 *RR* 为 RR_c。

根据以上获得的各区县 NDVI 暴露和人口数据,将任一数据缺失的区县排除,最终纳入 2 779 个区县的人群参与后续分析。

1.2 统计分析

1.2.1 描述性分析 统计描述各区县 NDVI 暴露和人口的分布范围、平均水平等。为更准确地展示人口分布对 NDVI 暴露的影响,计算人口数量加权的 NDVI 特征值。通过计算,描述转换前后的 NDVI 与高血压患病风险之间的暴露 - 反应关系,以符合后续分析的需求。

1.2.2 模拟干预效应评估

1.2.2.1 干预效应衡量指标 由于暴露因素为连续型变量,本文使用人群归因分数(population attributable fraction, PAF)的扩展概念——广义影响分数(generalized impact fraction, GIF)[11]来评估模拟干预效应。该指标定义为将当前的暴露水平改变至某一特定感兴趣的水平时,能够减少的人群中疾病病例的比例[11]。

1.2.2.2 干预方案 本文设置如下四种干预方案:等量、静态、动态和修正干预。(1)等量干预:指同时将研究人群的 NDVI 暴露水平增加相同值,即同时增加 0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30,若增加后值>1,则取 1;(2)静态干预:指将所有观察值控制在某个固定值,即研究人群 NDVI 观察值的第 100、第 75、第 50 和第 25 百分位数(P_{100}、P_{75}、P_{50} 和 P_{25});(3)动态干预:指将低于界值的观察值提升至界值,大于等于界值的不变,即以研究人群暴露水平的第 75、第 50、第 25 百分位数作为界值进行干预;(4)修正干预:指干预后的暴露水平取决于观察值,即将研究人群的 NDVI 暴露值提升(1- 观察值)5%、10%、15%或 20%。

1.2.2.3　干预效应估计　人群模拟干预效应方法学中，Miettinen 提出的估算公式考虑了暴露因素的人群分布和相对风险[12]，从而更准确地评估了某种暴露因素对于特定健康结果的影响[13]。基于前文所获取的数据，运用如下 Miettinen 公式对多种干预方案的广义影响分数（GIF）进行估算[13]，：

$$GIF=\frac{\int RR_U(x)\frac{RR_C(x)-1}{RR_C(x)}P(x)dx}{\int RR_U(x)P(x)dx} \quad 公式(2)$$

式中，x 为观察值，$P(x)$表示人群中暴露于 x 水平的人的比例，即某区县的人口数量 / 所有区县总人口数量。$RR_U(x)=RR_u^{(x-cutoff)/10}$ 为未调整混杂变量的相对风险比，$RR_C(x)=RR_c^{(x-cutoff)/10}$ 表示调整混杂变量的相对风险比[14]，RR_U 和 RR_C 来自于前文，$cutoff$ 表示相应干预方案的界值。GIF 对比了自然情况下和暴露于特定感兴趣水平时人群中的疾病患病率。95%CI 是在线性暴露 – 反应关系的理论假设下[15]，通过 1 000 次蒙特卡罗模拟估算得出。模拟干预效应估计流程见图 1。

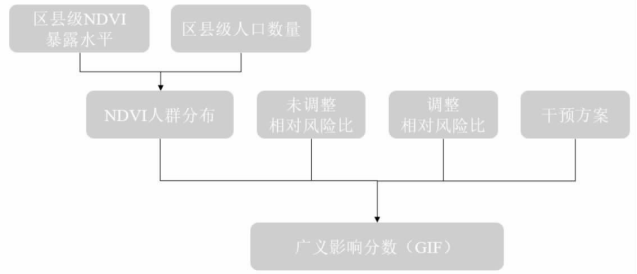


图 1　估算模拟干预 NDVI 对高血压患病影响的流程图

Figure 1　Flowchart for estimating the impact of simulated NDVI interventions on hypertension prevalence

1.2.3　敏感性分析　本研究还进行了如下敏感性分析以验证结果的稳定性：改变暴露 – 反应关系数据来源，选取一项基于中国社区人群研究得到的未调整和调整风险比数据[16]。原始数据为 NDVI 每 0.15 个单位增量所对应的风险比，未调整风险比为 0.83（0.80 ~ 0.86），调整风险比是 0.94（0.91 ~ 0.98）。

本研究分析均在 R 4.4.2 中进行，采用双侧检验，检验水准 α=0.05。

2　结　果

2.1　各区县 NDVI 暴露和人口数量分布情况　各区县 2022—2024 年平均 NDVI 均值为 0.50（标准差 = 0.16），数值分布区间为 0.05 ~ 0.82。超过半数（50%）区县的常住人口规模低于 38 万人，见表 1。经人口数量加权的三年平均 NDVI 均值提升至 0.51（标准差 = 0.13），P_1、P_{25}、P_{50}、P_{75} 和 P_{100} 分别是 0.05、0.42、0.51、0.61 和 0.82，见表 2。上述百分位数值已被确定为相应干预方案的划分依据。

表 1　2022—2024 年全国各区县 NDVI 和人口数量特征

Table 1　NDVI and population characteristics by county in China, 2022—2024

分布	NDVI	人口数量
均数	0.50	481 450
标准差	0.16	455 628
P_1	0.05	8 454
P_{25}	0.40	206 914
P_{50}	0.50	375 206
P_{75}	0.63	646 457
P_{100}	0.82	10 466 625

表 2　2022—2024 年全国人口加权的 NDVI 暴露特征

Table 2　Population-weighted exposure characteristics of NDVI in China, 2022—2024

分布	NDVI
均数	0.51
标准差	0.13
P_1	0.05
P_{25}	0.42
P_{50}	0.51
P_{75}	0.61
P_{100}	0.82

2.2　NDVI 与高血压暴露 – 反应关系　未调整协变量模型中，NDVI 每增加 0.06，高血压患病风险比降低 0.912（0.847 ~ 0.982），将 NDVI 尺度转换为 0.1 时，其对应的 RR（95%CI）为 0.86（0.76 ~ 0.97）。调整协变量模型结果显示，NDVI 每增加 0.1 个单位，患病风险比为 0.95（0.90 ~ 0.99）。见表 3。

表 3　NDVI 与高血压暴露 – 反应关系

Table 3　Exposure-response relationship between NDVI and HTN

类型	未调整	尺度	调整	尺度
	RR_u (95%CI)		RR_c (95%CI)	
原始	0.91 (0.85 ~ 0.98)	0.06	0.95 (0.90 ~ 0.99)	0.10
转换后	0.86 (0.76 ~ 0.97)	0.10	0.95 (0.90 ~ 0.99)	0.10

2.3　模拟干预 NDVI 对高血压患病的影响　当研究人群 NDVI 暴露量分别增加 0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30 个单位时，高血压病例数将对应减少 13.99%（13.97% ~ 14.01%）、20.22%（20.19% ~ 20.25%）、25.97%（25.92% ~ 26.02%）、31.24%（31.16% ~ 31.31%）和 36.00%（35.88% ~ 36.11%）。提升 NDVI 暴露到人群最大值（0.82）时，高血压患病的潜在可预防比例为 20.84%（17.11% ~ 24.58%）。控制 NDVI 为 P_{75}、P_{50} 时，对应的 GIF 为 5.61%（5.19% ~ 6.03%）和

1.14%(0.79%～1.48%)。而控制 NDVI 暴露为 P_{25} 时，可能引发高血压病例数增加 3.55%(3.91%～3.20%)。动态干预方案中，以 NDVI 的 P_{75}、P_{50}、P_{25} 为调控基准可分别预防 6.21%(5.82%～6.59%)、3.11%(2.87%～3.36%)和 1.18%(1.04%～1.31%)的高血压发生。修正干预方案进一步揭示，若全体 NDVI 暴露水平提升(1– 观察值)5%，可减少 1.26%(1.24%～1.28%)的高血压患病，且干预效应随调控强度增强而递增，如提升比例为 20%，GIF 为 4.98%(4.90%～5.06%)。见表 4。

表 4　模拟干预 NDVI 对高血压患病的影响

Table 4　Simulated effects of NDVI interventions on HTN prevalence

干预方案	转换后 *RR*	GIF (%)
	估计值 (95% *CI*)	估计值 (95% *CI*)
调整	0.95 (0.90～0.99)	
未调整	0.86 (0.76～0.97)	
等量干预		
0.10		13.99 (13.97～14.01)
0.15		20.22 (20.19～20.25)
0.20		25.97 (25.92～26.02)
0.25		31.24 (31.16～31.31)
0.30		36.00 (35.88～36.11)
静态干预		
P_{100}		20.84 (17.11～24.58)
P_{75}		5.61 (5.19～6.03)
P_{50}		1.14 (0.79～1.48)
P_{25}		–3.55 (–3.91～–3.20)
动态干预		
P_{75}		6.21 (5.82～6.59)
P_{50}		3.11 (2.87～3.36)
P_{25}		1.18 (1.04～1.31)
修正干预		
5%		1.26 (1.24～1.28)
10%		2.51 (2.47～2.55)
15%		3.75 (3.69～3.81)
20%		4.98 (4.90～5.06)

注：95% *CI* 由 1 000 次蒙特卡罗模拟估算；所有结果 *P* 值均＜0.05。

2.4　敏感性分析结果　等量干预方案下，提升 NDVI 暴露 0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30 个单位时分别可预防 11.99%(11.98%～12.01%)、17.43%(17.40%～17.45%)、22.50%(22.45%～22.54%)、27.19%(27.13%～27.26%)和 31.49%(31.38%～31.59%)的病例，其他各方案 GIF 值也与主分析结果相似。见表 5。

表 5　敏感性分析中模拟干预 NDVI 对高血压患病的影响

Table 5　Simulated effects of NDVI interventions on HTN prevalence in sensitivity analyses

干预方案	转换后 *RR*	GIF (%)
	估计值 (95% *CI*)	估计值 (95% *CI*)
调整	0.96 (0.94~0.99)	
未调整	0.88 (0.86~0.90)	
等量干预		
0.10		11.99 (11.98～12.01)
0.15		17.43 (17.40～17.45)
0.20		22.50 (22.45～22.54)
0.25		27.19 (27.13～27.26)
0.30		31.49 (31.38～31.59)
静态干预		
P_{100}		16.87 (13.74～20.00)
P_{75}		4.37 (4.04～4.69)
P_{50}		0.78 (0.51～1.05)
P_{25}		–2.95 (–3.23～–2.67)
动态干预		
P_{75}		4.89 (4.58～5.19)
P_{50}		2.43 (2.24～2.63)
P_{25}		0.92 (0.82～1.02)
修正干预		
5%		1.00 (0.99～1.02)
10%		2.00 (1.97～2.03)
15%		2.99 (2.95～3.04)
20%		3.98 (3.92～4.04)

注：95% *CI* 由 1 000 次蒙特卡罗模拟估算；所有结果 *P* 值均＜0.05。

3　讨　论

本研究基于 Miettinen 公式，估算了模拟干预 NDVI 水平对高血压患病率的影响。研究结果发现四种干预方案均可使高血压患病率降低，其中等量干预的效果更好，降低病例比例为 10%～35%，其他方案可减少 5%左右或 20%的病例。

在本研究中，对各区县三年平均 NDVI 以及常住人口分布情况进行了统计，结果表明，我国不同区县之间植被覆盖状况存在显著差异。西部地区 NDVI 值较低，可能由于这些区域植被覆盖较少，或者面临一些生态环境问题，如土地荒漠化、恶劣气候对植被的破坏等；而 NDVI 值较高的地区，则可能拥有较好的自然植被覆盖或成功的生态建设成果，例如大面积的森林、绿地等。这种差异不仅反映了区域自然条件的多样性，也可能与各地的经济发展模式、生态保护政策等因素密切相关。此外，不同区县的人口明显分布不均衡，当引入人口数量加权后，三年平均 NDVI 均值提升至 0.51，标准差减小至 0.13，各分位数数值也发生了变化，这一变化意味着人口密度与高植被覆盖存在某种正向程度的关联，揭示了绿地的潜在健康效益。在全球城市化进程以及对建筑环境规划需求日益迫切的背景下，绿地所带来的诸多益处已得到广泛报道。如，一项在中国开展的横断面研究表示居住地绿化程度与高血压之间的负向关联[7]。2019 年发表的一项针对中国 33 个社区，24 845 名成年人的大规模队列研究[16]发现，在 500 米缓冲区范围内，NDVI 每增加一个四分位数间距，高血压的患病风险降低 5%[16]。Jia 等人[17]使用 1 944 名 40 岁以上的参与者的数据探

索绿色和身体活动对血压的协同影响，研究发现，与生活在绿化面积较少地区的参与者（NDVI 的第一个四分位数）相比，居住在绿化面积较多地区的研究对象的 *OR* 为 0.20（0.07 ~ 0.37）（40 ~ 60 岁）和 0.65（0.28 ~ 0.89）（60 岁以上）[17]。台湾的一项纵向队列研究发现，NDVI 每增加 0.1 个单位，患高血压的风险就会降低 24%[1]。目前已有若干研究报告了绿色环境对高血压有益影响的潜在机制。研究发现，居住环境的绿化能够通过消除对心脏健康不利的有害环境因素（例如，环境空气污染物和高温）来降低高血压的患病风险[18]。不同地理背景下的近期研究也表明，居住环境的绿化与微生物多样性有关[19-20]，这可能通过产生有益代谢物来改善心脏代谢健康（例如血压水平等）[21]。同时，绿化能够通过减少心理社会压力和促进社会凝聚力与互动来降低包括糖皮质激素、肾上腺素和去甲肾上腺素在内的应激激素的水平[22-23]。这些应激激素已被证实与血压水平的升高有关。此外，绿化还能够调节交感神经 / 副交感神经的活动并稳定自主神经系统[22, 24]，从而降低高血压的风险。可见改善居住地绿化以减少高血压疾病负担具有很大的应用价值。

近年来，越来越多的研究开始关注模拟干预风险因素对人群健康的影响，主要集中于饮酒和空气污染物暴露。基于参数 G formula 方法的队列研究量化了模拟干预饮酒对肝脂肪变性的影响[25]，结果证明由持续重度饮酒转变为中度饮酒可使脂肪肝指数（fatty liver index, FLI）降低 2.280（3.016 ~ 1.544），并且红酒可能是减缓肝脂肪变性的更好选择。一项前瞻性队列研究探索了模拟干预 $PM_{2.5}$ 和 O_3 对哮喘症状的健康效益[26]，该研究估计得到 $PM_{2.5}$ 减少一分位数对应的 GIF 为 4.38%（1.42% ~ 7.25%），O_3 对应的 GIF 为 2.86%（0.17% ~ 5.50%）。中国地区 O_3 的疾病负担分析，采用了从队列研究中获得的暴露效应关系来估计臭氧暴露导致的长期心血管疾病死亡率负担[27]，计算了改变 O_3 暴露浓度后相应的 PAF。Garcia 等人[28]也研究了不同方式干预 $PM_{2.5}$ 和 NO_2 对哮喘的效应，当 NO_2 满足低于 20 ppb（parts per billion）的标准时[28]，估计可使儿童哮喘发病率降低 20%（11% ~ 27%）。本研究在采用静态、动态和修正干预三个模拟干预方案基础上，增加了等量干预方案，以提供更多的视角来量化干预效应。在未来的环境健康领域发展工作中，为环境政策制定者提供了切实可行的方向指引，即可采取综合性干预方案，特别聚焦等量干预以更有效地降低疾病负担。例如，在资源允许的情况下，将等量干预作为绿色空间暴露干预方案的首选。合理布局公园的面积、植被种类和分布密度，确保不同区县的居民都能获得相对均等的绿色暴露改善量；当资源有限时，结合其他干预方案，优先针对绿化程度较低的城市进行规划，增加街道绿植、保护周边农田等，以提升城市绿化暴露至合理目标。

本研究存在一定的局限性：第一，研究中所采用的人口数据来源于 2021 年中国第七次全国人口普查的常住人口统计，未将流动人口因素纳入考量范围；第二，受数据限制，本研究基于既往研究结果进行分析，未直接采用个体层面的数据；第三，研究采用了各区县的环境绿地暴露水平来近似替代个体的暴露水平，这种替代方法可能会引入一定程度的偏差。

综上所述，四种 NDVI 暴露干预方案均可降低高血压患病率，其中等量干预效果最明显。以上研究结果量化了提升居住地绿色暴露水平对公众心血管健康的积极影响，为制定高效、创新的健康城市规划措施以改善人群健康提供了科学依据和实践方向。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Zeng YQ, Chong KC, Chang LY, et al. Exposure to neighborhood greenness and hypertension incidence in adults: a longitudinal cohort study in Taiwan [J]. Environmental Health Perspectives, 2024, 132 (3): 37001.

[2] Zhou B, Perel P, Mensah GA, et al. Global epidemiology, health burden and effective interventions for elevated blood pressure and hypertension[J]. Nature Reviews Cardiology, 2021, 18(11): 785-802.

[3] Peng W, Li K, Yan AF, et al.Prevalence, management, and associated factors of obesity, hypertension, and diabetes in Tibetan population compared with China overall [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(14): 8787.

[4] WHO. Hypertension [EB/OL]. [2026-01-30]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hypertension.

[5] Kou MH, Wang X, Ma H, et al. Degree of risk factor control and incident cardiovascular diseases in patients with hypertension [J]. Mayo Clinic Proceedings, 2024, 99(3): 387-399.

[6] Zhao Y, Bao WW, Yang BY, et al. Association between greenspace and blood pressure: A systematic review and meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 817: 152513.

[7] Jian LY, Yang B, Ma RL, et al. Association between Residential Greenness and Cardiometabolic Risk Factors among Adults in Rural Xinjiang Uygur Autonomous Region, China: A Cross-Sectional Study [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2024, 37 (10): 1184-1194.

[8] Didan K. Mod13A3 MODIS/terra vegetation indices monthly L3 global 1km SIN grid V006[EB/OL]. [2026-01-30]. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A3.

[9] Ning J, Zhang YL, Hu HF, et al. Association between ambient particulate matter exposure and metabolic syndrome risk: A systematic review and meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021, 782: 146855.

[10] Bu YJ, Zhang XY, Song SX, et al. Association of greenspace with

hypertension in adult: a systematic review and meta-analysis of epidemiological studies [J]. International Journal of Environmental Health Research, 2024, 34(6): 2556-2577.

[11] Khosravi A, Nazemipour M, Shinozaki T, et al.Population attributable fraction in textbooks: Time to revise [J]. Global Epidemiology, 2021, 3: 100062.

[12] Ferguson J, Maturo F, Yusuf S, et al. Population attributable fractions for continuously distributed exposures [J]. Epidemiologic Methods, 2020, 9(1): 56.

[13] Ferguson J, Alvarez A, Mulligan M, et al. Bias assessment and correction for Levin's population attributable fraction in the presence of confounding [J]. European Journal of Epidemiology, 2024, 39(2): 111-119.

[14] Zhang DD, Chen WL, Cheng C, et al. Air pollution exposure and heart failure: A systematic review and meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2023, 872: 162191.

[15] Roger Chen YH, Lee WC, Liu BC, et al. Quantifying the potential effects of air pollution reduction on population health and health expenditure in Taiwan [J]. Environmental Pollution, 2023, 336: 122405.

[16] Yang BY, Markevych I, Bloom MS, et al.Community greenness, blood pressure, and hypertension in urban dwellers: The 33 Communities Chinese Health Study [J]. Environment International, 2019, 126(: 727-734.

[17] Jia XJ, Yu Y, Xia WN, et al. Cardiovascular diseases in middle aged and older adults in China: the joint effects and mediation of different types of physical exercise and neighborhood greenness and walkability[J]. Environmental Research, 2018, 167: 175-183.

[18] Yang BY, Zhao TY, Hu LX, et al. Greenspace and human health: An umbrella review[J]. Innovation (Camb), 2021, 2(4): 100164.

[19] Zhang YD, Fan SJ, Zhang Z, et al. Association between Residential Greenness and Human Microbiota: Evidence from Multiple Countries [J]. Environmental Health Perspectives, 2023, 131(8): 87010.

[20] Van pee T, Nawrot TS, van Leeuwen R, et al. The gut microbiome and residential surrounding greenness: a systematic review of epidemiological evidence[J]. Current Environmental Health Reports, 2023, 10(2): 137-153.

[21] Chen XF, Zhang H, Ren SC, et al. Gut microbiota and microbiota-derived metabolites in cardiovascular diseases [J]. Chinese Medical Journal, 2023, 136(19): 2269-2284.

[22] Li Q. Effects of forest environment (Shinrin-yoku/Forest bathing)on health promotion and disease prevention-the Establishment of Forest Medicine [J]. Environmental Health and Preventive Medicine, 2022, 27: 43.

[23] Wang J, Chen GB, Hou J, et al. Associations of residential greenness, ambient air pollution, biological sex, and glucocorticoids levels in rural China [J]. Ecotoxicology and Environment Safety, 2022, 242: 113945.

[24] Li AB, Liu Y, Qian HY, et al. Therapeutic effects of forest bathing on older adult patients with essential hypertension: evidence from a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Front Public Health, 2025, 13: 1631613.

[25] 张宁,张圆,魏君,等. 模拟饮酒干预与肝脂肪变性:一项大型队列的纵向研究 [J]. 四川大学学报: 医学版,2024,55(3):653-661.
Zhang N, Zhang Y, Wei J, et al. Hypothetical alcohol consumption interventions and hepatic steatosis: a longitudinal study in a large cohort[J]. Journal of Sichuan University: Medical Sciences, 2024, 55 (3): 653-661.(In Chinese)

[26] Xu JH, Shi Y, Chen GB, et al. Joint effects of Long-Term exposure to ambient fine particulate matter and ozone on asthmatic symptoms: prospective cohort study [J]. JMIR Public Health Surveill, 2023, 9: e47403.

[27] Yao M, Niu Y, Liu S, et al. Mortality burden of cardiovascular disease attributable to ozone in China:2019 vs 2050 [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(30): 10985-10997.

[28] Garcia E, Urman R, Berhane K, et al. Effects of policy-driven hypothetical air pollutant interventions on childhood asthma incidence in southern California [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(32): 15883-15888.

收稿日期:2025-04-26

(上接第 808 页)

cancer[J]. British Medical Journal (Clinical Research ed.), 1983, 287 (6384): 7-9.

[20] Wu CY, Hu HY, Chou YJ, et al. High serum uric acid levels are associated with All-Cause and cardiovascular, but not cancer, mortality in elderly adults [J]. Journal of the American Geriatrics Society, 2015, 63(9): 1829-1836.

[21] Maloberti A, Bombelli M, Facchetti R, et al. Relationships between diuretic-related hyperuricemia and cardiovascular events: data from the URic acid Right for heArt Health study [J]. Journal of Hypertension, 2021, 39(2): 333-340.

[22] 孙丽荣,叶润宇,张鑫,等. 高尿酸损害高血压患者的内皮功能[J]. 中华高血压杂志:中英文,2025,33(1):82-87.
Sun LR, Ye RY, Zhang X, et al. Hyperuricemia impairs endothelial function in hypertensive patients [J]. Chinese Journal of Hypertension, 2025, 33(1): 82-87.(In Chinese)

[23] Chen YC, Xu WH, Chen Y, et al. Renal NF-κB activation impairs uric acid homeostasis to promote tumor-associated mortality Independent of wasting[J]. Immunity, 2022, 55(9): 1594-1608.e6.

[24] Younossi ZM, de Avila L, Racila A, et al. Prevalence and predictors of cirrhosis and portal hypertension in the United States [J]. Hepatology, 2025, 82(5): 1229-1240.

收稿日期:2025-10-13