·疾病预防控制·

基于前瞻性队列的臭氧模拟干预对糖尿病的健康收益研究

白银铃，杨绍坤，郭冰，赵星，吴功华，张菊英
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，四川 成都 610041

摘要：目的　量化不同策略下干预臭氧对糖尿病患病的健康收益，为降低大气臭氧浓度以减少糖尿病的政策提供科学支持。**方法**　基于西南区域自然人群队列基线的 16 607 名成都市研究对象的问卷、体检数据和大气数据，使用 logistic 回归模型探究臭氧与糖尿病患病风险的关联，并采用参数 G formula 法模拟比值干预、定值干预和阈值干预臭氧浓度，量化各项干预策略下糖尿病患病率的降低程度。**结果**　臭氧每增加 1 g/m³ 对应 *OR*(95%*CI*)为 1.07 (1.01 ~ 1.13)，将臭氧浓度降低 5%、控制在 P_{50} (85.20 g/m³)或降低至 P_{75} (86.12 g/m³) 及以下可分别减少 27.38% (23.47% ~ 31.28%)、8.35% (4.01% ~ 12.70%)和 10.50% (6.00% ~ 15.01%)的糖尿病患病。**结论**　使用各种策略干预臭氧浓度均可减少糖尿病，其中比值干预效果较好，未来应基于当地臭氧浓度，综合考虑不同季节、地区和污染来源采取干预措施，按百分比降低整体的臭氧浓度，改善糖尿病患病风险。

关键词：臭氧；糖尿病；模拟干预；G formula
中图分类号：R587.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8507(2025)01-155-06
DOI：10.20043/j.cnki.MPM.202410106

Study on the health benefits of ozone simulation interventions for diabetes based on a prospective cohort

BAI Yin-ling, YANG Shao-kun, GUO Bing, ZHAO Xing, WU Gong-hua, ZHANG Ju-ying
Department of Epidemiology and Health Statistics, West China School of Public Health / West China Fourth Hospital, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: Objective To quantify the health benefits of interventions targeting ozone exposure on diabetes prevalence under different strategies, providing scientific support for policies aimed at reducing atmospheric ozone levels to mitigate diabetes. **Methods** Utilizing questionnaire, physical examination data, and atmospheric data from a cohort of 16 607 participants in Chengdu, Southwest China, we employed a Logistic regression model to explore the association between ozone and diabetes risk. We simulated ratio interventions, fixed-value interventions, and threshold interventions for ozone concentration using the parametric G formula method to quantify the reduction in diabetes prevalence under each intervention strategy. **Results** An increase of 1 mg/m³ in ozone corresponded to an odds ratio (*OR*) of 1.07 (95%*CI*: 1.01-1.13). Reducing ozone concentration by 5%, controlling it at P_{50} (85.20 mg/m³), or lowering it to P_{75} (86.12 mg/m³) or below could respectively reduce diabetes prevalence by 27.38% (23.47%-31.28%), 8.35% (4.01%-12.70%), and 10.50% (6.00%-15.01%). **Conclusion** Various strategies to intervene on ozone concentration can reduce diabetes prevalence, with ratio interventions showing the most significant effectiveness. Future measures should consider local ozone levels and comprehensively account for seasonal variations, regional differences, and pollution sources to implement interventions aimed at percentage reductions in overall ozone concentration, thereby reducing diabetes risk.

Keywords: Ozone; Diabetes; Simulation intervention; G formula

全球糖尿病患病显著上升，至 2021 年约有 5.37 亿成年人患有糖尿病[1]，而中国糖尿病患者数量最多，估计超过 1.40 亿人，预计到 2045 年将超过 1.74 亿[2]。据估计，在 2021 年中国人因糖尿病损失了 1.17 千万个伤残调整生命年[3]。越来越多的证据支持糖尿病受空气污染的影响，26.1%的糖尿病残疾调整生命年可归因于空气污染[4]，其中臭氧 (Ozone, O_3)可导致糖代谢紊乱进而诱发糖尿病[5]。自 2013 年中国发布《大气污染防治行动计划》以来，中国空气污染物浓度总体降低，而 O_3 浓度急剧上升，应尽快控制大气中 O_3 浓度[6]。由于各种技术和社会等原因，将 O_3 完全清除

基金项目：国家自然科学基金面上项目(82073667，81973151)；国家自然科学基金青年项目(82103943)
作者简介：白银铃 (1998—)，女，硕士在读，研究方向：卫生统计方法与应用
通信作者：吴功华，E-mail:gonghua_24@163.com

并不现实，因此探索合理的 O_3 浓度以减少糖尿病至关重要。然而，实施干预措施将 O_3 降低到特定浓度后，糖尿病的减少程度是未知的。因此，本研究基于中国西南区域自然人群队列（简称西南队列）数据，利用参数 G formula 方法模拟干预 O_3 浓度，定量估计与不干预的情况相比糖尿病的减少程度，为控制 O_3 污染预防糖尿病提供科学支持。

1　资料与方法

1.1　研究对象　本文研究对象为西南队列成都地区的 21 592 名基线参与者。西南队列采用多阶段整群抽样的方法，在 2018 年 5 月—2019 年 9 月抽取西南地区的居民，并收集了社会人口学、行为生活方式、疾病史等信息，以及体格检查和生化指标数据[7]。研究已获得四川大学伦理审查委员会的伦理批准（审批号：K2016038）。本研究采取以下排除标准：（1）基线时在当地居住时间小于 3 年；（2）患恶性肿瘤者；（3）孕妇；（4）年龄＜30 岁或≥80 岁；（5）自报基线调查前 3 年已确诊糖尿病；（6）暴露、协变量或结局缺失。基于以上标准共纳入 16 607 名基线参与者，见图 1。

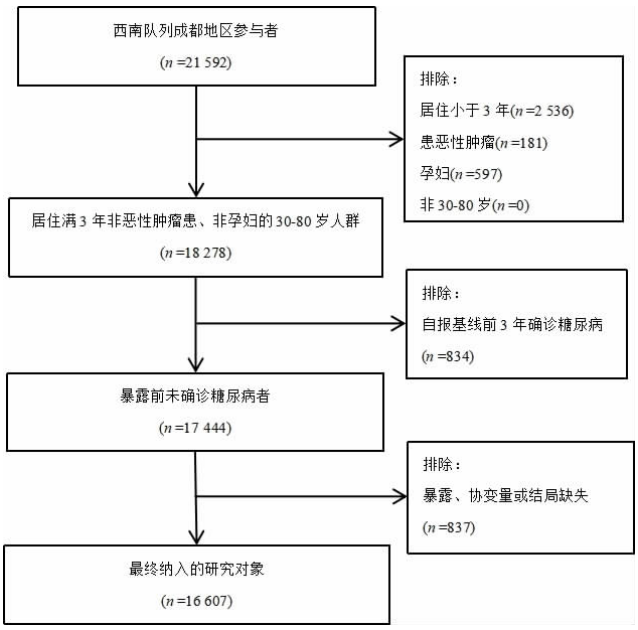


图 1　研究对象的纳排流程图

Figure 1　Flow chart of inclusion and discharge of research objects

1.2　变量来源及定义

1.2.1　暴露　O_3 数据来自于中国环境检测总站（https://www.cnemc.cn/），以 0.1°（≈10 km）空间分辨率为单位，利用迭代随机森林模型估算所得[8]。根据基线调查时获得的住址，将 O_3 的年暴露水平与每位研究对象相匹配，为每位研究对象单独计算前 3 年的暴露平均值。

1.2.2　结局　根据美国糖尿病协会的标准，糖尿病定义为空腹血糖（fasting plasma glucose, FPG）≥126 mg/dL（7.0 mmol/L）或糖化血红蛋白（hemoglobin A1c, HbA1c）≥48 mmol/mol（6.5%）[9]。FPG 与 HbA1c 均来自西南队列基线调查的血生化数据。

1.2.3　关键协变量　综合烹饪频率、燃料类型和通风设备等变量判断是否有室内空气污染。以体重（kg）除以身高的二次方（m^2）得到身体质量指数（body mass index, BMI），＜18.5 kg/m^2 为偏瘦，18.5 ~ 24 kg/m^2 为正常，24 ~ 28 kg/m^2 为超重，≥28 kg/m^2 为肥胖。代谢当量是根据不同类型体力活动的频率和强度计算所得的每日代谢当量任务（metabolic equivalent tasks per day, MET-h/d），用来反映基线前 1 年平均每日的体力活动水平[10]。根据问卷中食物频率调查表计算 DASH 评分，反应研究对象的饮食情况[11]。空气细颗粒物（particulate matter 2.5, $PM_{2.5}$）、二氧化氮（nitrogen dioxide, NO_2）和气温来自于中国环境检测总站，其他协变量均来自于西南队列基线调查的问卷数据。

1.3　统计学分析

1.3.1　描述性分析　根据是否出现糖尿病将研究对象分为两组，对其基线特征进行描述。连续变量和分类变量分别使用（均数 ± 标准差）和频数（构成比）进行描述，并使用 t 检验和 χ^2 检验比较两组差异。另外，使用（均数 ± 标准差）、百分位数和极值描述基线前 3 年研究对象 O_3 的暴露情况。

1.3.2　模拟干预　使用参数 G formula 方法估计模拟干预 O_3 对糖尿病患病的平均因果效应[12]。该方法分为四步：（1）根据干预策略设置暴露水平，创建新的分析数据集；（2）利用原始数据集，纳入 O_3 和协变量，对是否患糖尿病建立 logistic 回归模型；（3）使用模型参数和分析数据集预测不同干预策略下糖尿病的边际患病率；（4）计算观察情景和模拟干预情景下的结局风险差异（$R_a^{nat}-R_a^{int}$）和广义影响分数（generalized impact fraction, GIF）。风险差异指观察情景下人群中糖尿病患病率（R_a^{nat}）与模拟干预情景下的糖尿病患病风险（R_a^{int}）之差。广义影响分数是指通过降低当前暴露于某一感兴趣水平而导致人群中病例减少的比例[13]。公式如下：

$$R_a^{nat}-R_a^{int}=P(Y_a^{nat}=1)-P(Y_a^{int}=1)$$

$$\mathrm{GIF}=\frac{P(Y_a^{nat}=1)-P(Y_a^{int}=1)}{P(Y_a^{int}=1)}$$

其中 $P(\cdot)$ 表示事件发生概率，Y 为结局，a^{nat} 表示自然观察的暴露情况，a^{int} 表示模拟干预后的暴露量。95%置信区间通过 1 000 次蒙特卡罗模拟估算。

本研究建立回归模型，并调整人口特征、其他污

染物及气温等，分析暴露 O_3 与糖尿病患病的关联关系，使用比值比（odds ratio, *OR*）和 95%置信区间（confidence interval, *CI*）展示结果。并在可识别性假设（可交换性、正数性和一致性）下，模拟 3 组干预措施对糖尿病的影响：使用比值干预，将整个人群暴露的污染物浓度按百分比降低（5%、10%、15%、20%），以 5%为例即 $a^{int}=(1-5\%)\times a^{nat}$；采用定值干预，将整体暴露污染物浓度保持在最小值或某百分位数（P_{25}、P_{50}、P_{75}），以 P_{25} 为例即 $a^{int}=P_{25}$；以及使用阈值干预，仅对污染物浓度高于阈值（P_{25}、P_{50}、P_{75}）的研究对象进行干预，以 P_{25} 为例即 $\begin{cases}P_{25}, a^{nat}\geqslant P_{25}\\ a^{nat}, a^{nat}<P_{25}\end{cases}$。

本研究分析均在 R 4.3.3 中进行，采用双侧检验，检验水准 α=0.05。

2　结　果

2.1　描述性分析结果　本研究共纳入了 16 607 名研究对象，1 454 人在基线时被判断为糖尿病，患病率为 9.50%。研究对象的平均年龄为（51.00 ± 12.14）岁，男性糖尿病患者占比为 57.2%，见表 1。O_3 的 3 年平均浓度为（85.01 ± 1.88）g/m³，第 25、50、75 百分位数（P_{25}、P_{50}、P_{75}）分别为 84.00、85.20 和 86.12 g/m³，最小值与最大值分别为 75.56 和 96.93 g/m³。

表 1　基线特征[$(\bar{x}\pm s)$, *n* (%)]

Table 1　Baseline characteristics [$(\bar{x}\pm s)$, *n* (%)]

基本特征	总人数（*n*=16 607）	糖尿病		*P* 值
		未发病（*n*=15 153）	发病（*n*=1 454）	
年龄(岁)	51.00 ± 12.14	50.35 ± 12.03	57.80 ± 11.21	<0.001
性别				<0.001
男性	7 303 (44.0)	6 472 (42.7)	831 (57.2)	
女性	9 304 (56.0)	8 681 (57.3)	623 (42.8)	
家庭年收入(元)				<0.001
<12 000	1 569 (9.4)	1 401 (9.2)	168 (11.6)	
12 000 ~ 19 999	1 958 (11.8)	1 763 (11.6)	195 (13.4)	
20 000 ~ 59 999	6 175 (37.2)	5 585 (36.9)	590 (40.6)	
60 000 ~ 99 999	3 430 (20.7)	3 153 (20.8)	277 (19.1)	
≥100 000	3 475 (20.9)	3 251 (21.5)	224 (15.4)	
教育水平				<0.001
文盲	2 008 (12.1)	1 744 (11.5)	264 (18.2)	
小学	3 254 (19.6)	2 903 (19.2)	351 (24.1)	
初中	5 347 (32.2)	4 885 (32.2)	462 (31.8)	
高中	2 931 (17.6)	2 705 (17.9)	226 (15.5)	
大学及以上	3 067 (18.5)	2 916 (19.2)	151 (10.4)	
婚姻状况				<0.001
已婚	15 016 (90.4)	13 705 (90.4)	1 311 (90.2)	
丧偶	689 (4.1)	646 (4.3)	43 (3.0)	
离异	707 (4.3)	616 (4.1)	91 (6.3)	
未婚	195 (1.2)	186 (1.2)	9 (0.6)	
居住地				0.096
城镇	10 789 (65.0)	9 815 (64.8)	974 (67.0)	
农村	5 818 (35.0)	5 338 (35.2)	480 (33.0)	
吸烟情况				<0.001
从不	11 274 (67.9)	10 463 (69.0)	811 (55.8)	
吸烟	4 174 (25.1)	3 685 (24.3)	489 (33.6)	
戒烟	1 159 (7.0)	1 005 (6.6)	154 (10.6)	
饮酒情况				<0.001
从不	7 920 (47.7)	7 212 (47.6)	708 (48.7)	
偶尔	6 323 (38.1)	5 875 (38.8)	448 (30.8)	
经常	2 364 (14.2)	2 066 (13.6)	298 (20.5)	
被动吸烟				0.182
否	7 906 (47.6)	7 189 (47.4)	717 (49.3)	
是	8 701 (52.4)	7 964 (52.6)	737 (50.7)	
室内空气污染				0.687
否	2 538 (15.3)	2 310 (15.2)	228 (15.7)	
是	14 069 (84.7)	12 843 (84.8)	1 226 (84.3)	
BMI 分级				<0.001
偏瘦	390 (2.3)	377 (2.5)	13 (0.9)	
正常	7 770 (46.8)	7 327 (48.4)	443 (30.5)	
超重	6 318 (38.0)	5 668 (37.4)	650 (44.7)	
肥胖	2 129 (12.8)	1 781 (11.8)	348 (23.9)	
代谢当量	21.56 ± 14.92	21.72 ± 14.86	19.97 ± 15.46	<0.001
DASH 评分	22.19 ± 4.57	22.26 ± 4.54	21.51 ± 4.80	<0.001
NO_2(g/m³)	36.87 ± 11.61	36.89 ± 11.59	36.69 ± 11.83	0.529
$PM_{2.5}$(g/m³)	50.44 ± 6.88	50.46 ± 6.88	50.23 ± 6.92	0.226
气温(℃)	16.72 ± 0.48	16.72 ± 0.48	16.78 ± 0.48	<0.001

2.2　回归模型结果　Logistic 回归模型显示，O_3 浓度增加与糖尿病患病风险呈正相关。O_3 每增加 1 g/m³，相应 *OR*(95%*CI*)为 1.07（1.01 ~ 1.13），见表 2。

表 2　O_3 及协变量与糖尿病患病的关联

Table 2　Association of O_3 and covariates with the prevalence of diabetes

变量	类别	*OR* 值(95%*CI*)
臭氧(g/m³) [a]		1.07(1.01 ~ 1.13)*
年龄(岁)		1.05(1.05 ~ 1.06)***
性别	男性	参照组
	女性	0.72(0.61 ~ 0.85)***
家庭年收入(元)	＜12 000	参照组
	12 000 ~ 19 999	1.08(0.86 ~ 1.35)
	20 000 ~ 59 999	1.06(0.88 ~ 1.29)
	60 000 ~ 99 999	0.97(0.78 ~ 1.21)
	≥100 000	1.00(0.79 ~ 1.27)
教育水平	文盲	参照组
	小学	0.98(0.82 ~ 1.17)
	初中	1.02(0.85 ~ 1.23)
	高中	1.05(0.84 ~ 1.32)
	大学及以上	0.93(0.71 ~ 1.22)
婚姻状况	已婚	参照组
	丧偶	0.83(0.60 ~ 1.14)
	离异	0.84(0.65 ~ 1.07)
	未婚	0.85(0.43 ~ 1.70)
居住地	城镇	参照组
	农村	0.55(0.46 ~ 0.66)***
吸烟情况	从不	参照组
	吸烟	1.38(1.16 ~ 1.65)***
	戒烟	1.08(0.86 ~ 1.36)
饮酒情况	从不	参照组
	偶尔	0.85(0.74 ~ 0.97)*
	经常	0.94(0.79 ~ 1.11)
被动吸烟	否	参照组
	是	1.13(1.01 ~ 1.27)*
室内空气污染	否	参照组
	是	0.97(0.83 ~ 1.14)
BMI 分级	偏瘦	参照组
	正常	1.71(0.97 ~ 3.02)
	超重	2.92(1.65 ~ 5.15)***
	肥胖	5.13(2.89 ~ 9.10)***
代谢当量 [a]		1.00(1.00 ~ 1.00)
DASH 评分 [a]		0.98(0.97 ~ 1.00)**
NO_2(g/m³) [a]		0.98(0.97 ~ 1.00)*
$PM_{2.5}$(g/m³) [a]		1.01(0.99 ~ 1.02)
气温(℃) [a]		1.03(0.82 ~ 1.30)

注：[a] 表示每增加一个单位，对应增加的 *OR* (95%*CI*)；*P＜0.05，**P＜0.01，***P＜0.001。

2.3　模拟干预结果　表 3 展示了对 O_3 进行模拟干预后，糖尿病的患病改变。进行模拟干预前，研究人群的糖尿病患病率为 9.50%。若所有研究对象的 O_3 浓度都降低 5%，糖尿病患病率将降低 2.63%（2.25% ~ 3.00%），可减少 27.38%（23.47% ~ 31.28%）的糖尿病发生。进一步降低 O_3 浓度可减少更多糖尿病，当降低 20%时，可减少 64.43%（61.52% ~ 67.35%）的糖尿病。如果将所有人的 O_3 暴露浓度保持在 P_{75}（86.12 g/m³），研究人群中糖尿病患病率为 9.22%（8.80% ~ 9.65%），没有显著变化；如果控制在 P_{50}（85.20 g/m³）、P_{25}（84.00 g/m³）或最小值（75.56 g/m³），可减少现有 8.35%（4.01% ~ 12.70%）、14.11%（9.81% ~ 18.41%）或 45.85%（42.40% ~ 49.31%）的糖尿病发生。以现在 O_3 浓度的 P_{75}、P_{50}、P_{25} 为阈值进行干预后，对应的糖尿病患病率分别为 8.59%（8.16% ~ 9.02%）、8.42%（8.00% ~ 8.84%）、8.08%（7.68% ~ 8.47%），比现在降低 1.01%（0.58% ~ 1.44%）、1.18%（0.76% ~ 1.59%）、1.52%（1.12% ~ 1.91%），广义影响分数为 10.50%（6.00% ~ 15.01%）、12.25%（7.89% ~ 16.61%）、15.81%（11.70% ~ 19.92%）。

表 3　O_3 干预对糖尿病的影响

Table 3　The impact of intervention in O_3 on diabetes

干预策略	患病率(95%*CI*)	(95%*CI*)[a]	GIF (95%*CI*)[b]
观察情景	9.50%	参照组	参照组
比值干预			
5%	6.97%(6.59% ~ 7.34%)	2.63%(2.25% ~ 3.00%)	27.38%(23.47% ~ 31.28%)
10%	5.51%(5.17% ~ 5.86%)	4.08%(3.73% ~ 4.43%)	42.53%(38.90% ~ 46.17%)
15%	4.35%(4.05% ~ 4.65%)	5.25%(4.94% ~ 5.55%)	54.67%(51.52% ~ 57.82%)
20%	3.41%(3.13% ~ 3.69%)	6.18%(5.90% ~ 6.46%)	64.43%(61.52% ~ 67.35%)
定值干预			
P_{75}	9.22%(8.80% ~ 9.65%)	0.37%(−0.05% ~ 0.79%)	3.86%(−0.53% ~ 8.25%)
P_{50}	8.79%(8.38% ~ 9.21%)	0.80%(0.38% ~ 1.22%)	8.35%(4.01% ~ 12.70%)
P_{25}	8.24%(7.83% ~ 8.65%)	1.35%(0.94% ~ 1.77%)	14.11%(9.81% ~ 18.41%)
最小值	5.20%(4.86% ~ 5.53%)	4.40%(4.07% ~ 4.73%)	45.85%(42.40% ~ 49.31%)
阈值干预			
P_{75}	8.59%(8.16% ~ 9.02%)	1.01%(0.58% ~ 1.44%)	10.50%(6.00% ~ 15.01%)
P_{50}	8.42%(8.00% ~ 8.84%)	1.18%(0.76% ~ 1.59%)	12.25%(7.89% ~ 16.61%)
P_{25}	8.08%(7.68% ~ 8.47%)	1.52%(1.12% ~ 1.91%)	15.81%(11.70% ~ 19.92%)

注：[a] 表示观察情景与模拟干预后糖尿病患病风险之差；[b] GIF 为广义影响分数，指通过降低当前暴露于某一感兴趣水平而导致的人群中病例减少的比例。

3　讨　论

现有研究表明 O_3 会导致糖尿病，但对干预 O_3 降低糖尿病患病率的定量评估研究有限。基于西南队列，本研究使用参数 G formula 估计了比值干预、定值干预和阈值干预三类策略下模拟干预 O_3 的糖尿病健康收益。使用不同的干预策略对 O_3 进行干预，均可使糖尿病患病率降低，得到不同的健康收益。

越来越多的研究探索了 O_3 与糖尿病的关联。研究者通过动物实验和人群研究发现，O_3 可通过 DNA 甲基化或干扰机体糖异生、半乳糖代谢和碳代谢等葡萄糖代谢途径诱导糖尿病的发生[14-16]。Renzi 等人[17]利用罗马大型队列发现 O_3 与糖尿病发病率存在正向关联，每升高 10 g/m^3 O_3 糖尿病的风险为 1.01（1.00～1.03）。Paul 等人[18]发现 O_3 浓度每增加一个四分位数间距可增加糖尿病 0.5%（0.1%～0.9%）的发病风险和 6.4%（3.7%～9.1%）的死亡风险。基于中国 33 个社区的大型横断面研究发现，O_3 浓度每增加 22 g/m^3，糖尿病患病风险增加 14.0%（5.0%～25.0%）[19]。Wang 等人[5]基于中国健康与养老追踪调查发现，O_3 的年平均浓度每增加 10g/m^3，老年人群的发病风险增加 5.7%（0.4%～11.4%）。以上研究表明，O_3 暴露浓度的升高会导致糖尿病的发生增加，与本研究结果一致，均支持可通过降低 O_3 浓度的干预来减少糖尿病。

在本研究中，使用三种干预策略均可减少糖尿病，尤其将现在 O_3 浓度降低 20%，可减少 64.43%的糖尿病发生。虽然使用三种干预策略均能使糖尿病减少，但将 O_3 浓度均干预至 P_{75}（86.12 g/m^3）或及其以下，糖尿病无显著的健康收益。现在的 O_3 浓度过高，仅设定较高限值稍降低平均 O_3 浓度不能改善现有糖尿病的负担，需要更大力度地干预 O_3 污染。Li 等人[20]基于北京 197 万病例，估计了空气污染对心血管疾病合并糖尿病患者的住院负担，发现将 O_3 浓度控制在日均 60 g/m^3 时，仅 0.22%（0.19%～0.26%）的入院，0.23%（0.04%～0.41%）的住院时长和 0.52%（0.16%～0.89%）的住院费用可归因与 O_3 污染。可见控制大气 O_3 污染浓度以减少糖尿病负担具有很大潜力。

与需要设定很低界值的定值干预和阈值干预不同，使用比值干预策略，将每位研究对象的 O_3 暴露浓度降低 5%～20%均可使糖尿病显著减少。使用比值干预降低 O_3 浓度以减少糖尿病的效率高于另外两种干预策略。成都市各地 O_3 浓度分布不均，同时将其降低至某一界值是不可行的，较高的界值不足以降低全市糖尿病发生，或过低的界值使得措施难以落实。使用比值干预策略降低 O_3 浓度，更易实现减少糖尿病的目的，针对不同时间、空间和来源分别对 O_3 进行干预，让其在原有浓度上按百分比降低，以得到显著的糖尿病健康收益。调查发现，四川盆地的 O_3 的浓度在春夏季最高，主要来源于工业和交通运输[21]。当地 O_3 浓度还会受到其他地区的影响，如成都的 O_3 污染可来自于重庆和贵州等地[22]。未来需在春夏季加强对工业和交通排放的干预，并与周围城市合作，共同降低 O_3 污染以减少糖尿病负担。

本研究存在一定的局限性：第一，本研究人群仅来自成都市，而大气污染物在不同区域浓度及分布不同，结果外推时具有局限性；第二，不同季节臭氧浓度不一样，本研究只选取三年平均暴露值，不足以模拟臭氧动态变化的暴露情况；第三，本研究根据横断面数据进行分析，虽然大致保证了暴露与结局的顺序，但也可能存在因果倒置的问题。

综上所述，不同策略干预 O_3 污染浓度，均可减少糖尿病，其中比值干预减少糖尿病的效果比定值干预和阈值干预更好。未来应针对不同季节、地区和来源，实施综合性干预措施，按百分比降低 O_3 浓度，以减少糖尿病发生，提高居民健康质量。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Magliano DJ, Boyko EJ. IDF diabetes Atlas [M]. Brussels: International Diabetes Federation, 2021.

[2] Sun H, Saeedi PY, Karuranga S, et al. IDF diabetes Atlas: global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2022, 183: 109119.

[3] Global, Regional. And National burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050:a systematic analysis for the global burden of disease study 2021 [J]. Lancet, 2023, 402 (10397): 203-234.

[4] Yin P, Brauer M, Cohen AJ, et al. The effect of air pollution on deaths, disease burden, and Life expectancy across China and its provinces, 1990 - 2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet Planetary Health, 2020, 4(9): e386-e398.

[5] Wang YX, Cao R, Xu ZH, et al. Long-term exposure to ozone and diabetes incidence: A longitudinal cohort study in China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151634.

[6] Feng Y, Ning M, Lei Y, et al. Defending blue Sky in China: Effectiveness of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on air quality improvements from 2013 to 2017 [J]. Journal of Environment Management, 2019, 78: 109603.

[7] Zhao X, Hong F, Yin JZ, et al.Cohort profile: the China Multi-Ethnic cohort (CMEC) study[J]. International Journal of Epidemiology, 2021, 50(3): 721-721l.

[8] Chen GB, Chen J, Dong GH, et al. Improving satellite-based estimation of surface ozone across China during 2008-2019 using iterative random forest model and high-resolution grid meteorological data[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 69: 102807.

[9] 2. Classification and diagnosis of diabetes: standards of medical care

（下转第 187 页）

[54] Koller K, Matos TFK, Areco KN, et al. Serum vitamin D levels as biomarkers in patients with autoimmune uveitis and their possible correlation with disease activity [J]. Ocular Immunology and Inflammation, 2024, 32(5): 628–635.
[55] Chiu ZK, Lim LL, Rogers SL, et al. Patterns of vitamin D levels and exposures in active and inactive noninfectious uveitis patients [J]. Ophthalmology, 2020, 127(2): 230–237.
[56] Yazar S, Hewitt AW, Black LJ, et al. Myopia is associated with lower vitamin D status in young adults[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2014, 55(7): 4552–4559.

收稿日期:2024–09–14

（上接第 159 页）

in diabetes–2021[J]. Diabetes Care, 2021, 44(Suppl 1): S15–s33.
[10] Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, et al. 2011 compendium of physical activities: a second update of codes and Met values [J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2011, 43 (8): 1575–1581.
[11] Xiao X, Qin ZX, Lv XY, et al. Dietary patterns and cardiometabolic risks in diverse less–developed ethnic minority regions: results from the China Multi–Ethnic Cohort (CMEC) Study[J]. Lancet Reg Health West Pac, 2021, 15: 100252.
[12] Snowden JM, Rose S, Mortimer KM. Implementation of G–computation on a simulated data set: demonstration of a causal inference technique [J]. American Journal of Epidemiology, 2011, 173(7): 731–738.
[13] Khosravi A, Nazemipour M, Shinozaki T, et al.Population attributable fraction in textbooks: Time to revise [J]. Glob Epidemiol, 2021, 3: 100062.
[14] Zhang K, Chen G, He J, et al. DNA methylation mediates the effects of PM (2.5)and O (3)on ceramide metabolism: A novel mechanistic Link between air pollution and insulin resistance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 469: 133864.
[15] Zhang YR, Yan ZP, Nan N, et al. Circadian rhythm disturbances involved in ozone–induced glucose metabolism disorder in mouse liver[J]. Science of the Total Environment, 2023, 905: 167316.
[16] Nan N, Liu YT, Yan ZP, et al. Ozone induced multigenerational glucose and lipid metabolism disorders in Drosophila [J]. Science of the Total Environment, 2024, 951: 175477.
[17] Renzi M, Cerza F, Gariazzo C, et al. Air pollution and occurrence of type 2 diabetes in a large cohort study[J]. Environment International, 2018, 112: 68–76.
[18] Paul LA, Burnett RT, Kwong JC, et al. The impact of air pollution on the incidence of diabetes and survival among prevalent diabetes cases[J]. Environment International, 2020, 134: 105333.
[19] Yang BY, Qian ZM, Li SS, et al. Ambient air pollution in relation to diabetes and glucose–homoeostasis markers in China: a cross–sectional study with findings from the 33 Communities Chinese Health Study [J]. Lancet Planetary Health, 2018, 2 (2): e64–e73.
[20] Li ZW, Liu MY, Wu ZY, et al. Association between ambient air pollution and hospital admissions, length of hospital stay and hospital cost for patients with cardiovascular diseases and comorbid diabetes mellitus: Base on 1,969,755 cases in Beijing, China, 2014–2019[J]. Environment International, 2022, 165: 107301.
[21] Qiao X, Wang P, Zhang J, et al. Spatial–temporal variations and source contributions to forest ozone exposure in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 189–199.
[22] Wang XJ, Ling C, Ke G, et al. Spatio–temporal trajectory evolution and cause analysis of air pollution in Chengdu, China [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2022, 72(8): 876–894.

收稿日期:2024–10–10

读者·作者·编者

温馨提示

为了使杂志能准确投递，敬请作者在单位一栏写明详细科室及联系电话。通信作者必须写明 E–mail 地址。

《现代预防医学》 编辑部