



世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读

朱彤^{1*}, 万薇², 刘俊³, 薛涛^{4,5}, 宫继成¹, 张世秋¹

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

2. 亚洲清洁空气中心, 北京 100600;

3. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083;

4. 北京大学公共卫生学院生育健康研究所/国家卫健委生育健康重点实验室, 北京 100191;

5. 北京大学公共卫生学院流行病学与卫生统计学系, 北京 100191

* 联系人, E-mail: tzhu@pku.edu.cn

世界卫生组织(World Health Organization, WHO)在1958年发布的技术报告中开始关注空气污染对人体健康的损害^[1]。基于科学界在其后近30年对该问题的研究和认知的逐步积累, WHO欧洲办事处于1987年发布了首个基于健康保护的空气质量指南(air quality guideline, AQG), 并不定期更新。上一版本更新于2005年, 涵盖了包括PM_{2.5}和O₃在内的多项空气污染物指导值, 并通过设置过渡阶段目标为全球各国的空气质量管理提供可选的阶段性目标^[2]。在过去15年, 科学家对空气污染如何影响人类健康有了更清晰和全面的认识, 特别是在真实世界中观察到空气污染导致越来越多疾病种类的证据。这些证据表明, 对于儿童, 空气污染暴露会伤害其呼吸系统发育、诱发呼吸道感染和加剧哮喘^[3]; 对成人, 空气污染暴露会增加肺癌、缺血性心脏病、卒中等致死性疾病^[4,5], 并可能与慢阻肺、糖尿病和退行性神经疾病存在关联^[6,7]。因此, WHO经过文献调研, 通过科学的文献综述方法, 制定了新的AQG。

1 2021版《全球空气质量指南》的主要变化与适用范围

在综合考虑过去15年间环境健康研究进展的基础上, WHO对AQG进行了相应修订, 如表1所示。本次修订的主要变化概括如下: (1) 基于低浓度水平健康影响的队列研究新证据, 收紧了PM_{2.5}、PM₁₀的长期暴露指标——年均指导值, 其中PM_{2.5}年均指导值由10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下调到5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; (2) 基于“多国多城市”(multi-country multi-city, MCC)研究提供的证据^[8], 更新了部分污染物的概率分布特征(即24 h平均浓度的第99百分位与年均值的比率), 并据此重新评估了O₃日最大8 h平均值, 结果与2005版AQG一致, 更新了PM_{2.5}、PM₁₀的24 h指导值, 制定了NO₂和CO的24 h指导值; (3) 基于NO₂长期暴露与全因死亡率和呼吸道疾病死亡率之间关联的新证据, 将NO₂的年均指导值从40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 变更为10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[9,10]; (4) 基于长期臭氧浓度与总死亡率和呼吸道死亡率之间关联的



朱彤 教授, 北京大学环境科学与工程学院院长、中国科学院院士、美国地球物理联合会会士、国务院参事。主要研究领域为大气化学、环境健康, 致力于推动“大气-气候-健康”的交叉科学研究及大气污染治理。

健康影响证据, 增设了O₃浓度高峰季平均值(即, 暖季峰值), 指导值为60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[11,12]。

新版AQG是国际权威专家组在综合当前环境健康证据的“合集”, 并考虑不确定性分析后, 确定的现阶段能够彻底保护人群健康的空气质量水平。保护健康是制定AQG的唯一出发点, 在此过程中也考虑了是否需要以及如何将全球污染水平控制到该指导值以下。因此, 作为补充, WHO基于定量的风险评估, 同时推荐了空气质量的过渡期目标(interim targets, IT, 具体值参见表2)。例如, 针对PM_{2.5}和PM₁₀, 经过2021版修订后, 新增IT4(即第四阶段指导值), 即2005版本的AQG指导值(10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。如果以新版AQG的PM_{2.5}年均浓度指导值(5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)为基准, 则对应的IT1到IT4的空气质量目标的死亡风险相对增加了24%、16%、8%和4%。

新版AQG还明确了指导值的适用范围: (1) 新版AQG主要在2005版本上进行修订, 还参考了2010版WHO编制的室内空气质量指导值。此外, 对于部分污染物的短期暴露(表1), 新版AQG认为其仍然适用。因此, 新版AQG适用于室内和室外环境, 但不适于特定职业环境暴露。(2) 人群同时暴露于多种空气污染物, 它们有可能来源于相同或不同的人类和自然活动。由于相关研究不足, 新版AQG并不涉及多种空气污染复合暴露的管理目标, 也不适合衡量不同空气污染物健康风险

表 1 2005与2021年AQG对比以及修订过程中所采纳的方法和依据

Table 1 Comparison between the 2005 AQG and the 2021 AQG, and details of the revision

污染物	指标	AQG		新准则值修订的方法和依据
		2005年	2021年	
PM _{2.5} (μg/m ³)	年均值	10	5	在入选PM _{2.5} 准则制定的18项研究中, 暴露浓度最低的5项研究的平均最低暴露值 ^{d)} 是4.2~4.6 μg/m ³
	24 h平均 ^{a)}	25	15	在确定年均值标准后, 基于MCC研究, 进一步将24 h平均浓度的第99百分位与年均值的比率从2005年版本的2.5调整为3. 应用这一“转换比率”, 可以将年均指导值转化成24 h指导值(3×5=15 μg/m ³)
PM ₁₀ (μg/m ³)	年均值	20	15	取消2005年PM ₁₀ 和PM _{2.5} 质量浓度为2:1的经验假设, 改用大气PM ₁₀ 实测值; 在入选PM ₁₀ 准则制定的17项研究中, 暴露浓度最低的5项研究的平均最低暴露值 ^{d)} 是15.1 μg/m ³
	24 h平均 ^{a)}	50	45	方法同PM _{2.5} 24 h平均值(转换比率=3)
O ₃ (μg/m ³)	暖季峰值 ^{b)}	无	60	基于O ₃ 长期暴露增加非意外死亡和呼吸道疾病死亡风险的新证据; 在入选O ₃ 准则制定的7项研究中, 暴露浓度最低的3项研究的平均最低暴露值 ^{d)} 是60~64 μg/m ³
	8 h平均 ^{c)}	100	100	基于重新评估的暖季峰值 ^{b)} 与日最大8 h平均 ^{c)} 的比率, 最终评估结果与2005版AQG一致; 日浓度/年均值转换比率=2; 暖季浓度/年均值转换比率=1.24; 总转换比率=2/1.24
NO ₂ (μg/m ³)	年平均	40	10	在入选NO ₂ 准则制定的24项研究中, 排除浓度最低但结论存在潜在偏倚的3项研究后, 暴露浓度最低的5项研究的平均最低暴露值 ^{d)} 是8.8 μg/m ³
	24 h平均 ^{a)}	无	25	在确定年均值标准后, 基于MCC研究, 将24 h平均浓度的第99百分位与年均值的比率确定为2.5
	1 h平均 ^{a)}	200	无	新版AQG修订未涉及
SO ₂ (μg/m ³)	24 h平均 ^{a)}	20	40	2005版所推荐的指导值并未基于流行病学证据和定量评估, 此次修订基于健康风险评估, 重新制定了SO ₂ 指导值. 由于AQG没有规定SO ₂ 的年均值, 所以上述比例转换法不适用. 首先, WHO定义 ^{e)} SO ₂ 背景浓度为10 μg/m ³ ; 其次, 根据WHO的指南 ^[2] , 24 h平均SO ₂ 浓度增加30 μg/m ³ , 哮喘风险增加3%, 非意外死亡增加1.8%; 上述风险与AQG短期O ₃ 浓度的指导值所对应的风险(哮喘风险增加4.8%, 非意外死亡风险增加1.72%)相当; 最终, 据此确定SO ₂ 的24 h平均值的指导值为40 μg/m ³ (10+30=40 μg/m ³)
	10 min平均	500	无	新版AQG修订未涉及
CO (mg/m ³)	24 h平均 ^{a)}	无	4	基于定量分析, 此次修订基于心肌梗塞死亡风险, 重新制定了CO指导值; 根据文献 ^[2] , 当研究浓度中位数<1.15 mg/m ³ , 研究并未发现CO短期暴露的健康效应——当CO中位数<1.15 mg/m ³ , 相对风险度=1.00(95%置信区间(CI): 0.998~1.003), 而当CO中位数>1.15 mg/m ³ , 相对风险度=1.019 (95% CI: 1.011~1.027); 根据MCC研究, CO年均值/日均值转换比率=3; 根据上述转换比率(3)和文献 ^[2] 结论(1.15 mg/m ³)确定推荐值为4 mg/m ³
	8 h平均	10	无	新版AQG修订未涉及
	1 h平均	35	无	新版AQG修订未涉及
	15 min平均	100	无	新版AQG修订未涉及

a) AQG认为该浓度对应概率分布的99百分位不应超过该推荐值, 即每年3~4 d超过此标准所对应的风险可以接受; b) 年最大6个月日最大8 h O₃浓度滑动均值(maximum of daily 8-hour moving average, MDA8); c) 日最大8 h O₃浓度滑动均值; d) 某项流行病学研究的最低暴露值定义为该研究中暴露浓度分布的5%分位数; e) WHO AQG报告中并未给出确定背景浓度值的依据, 原文为: The GDG (guideline development group) recognizes that the choice for a background of 10 μg/m³ is, to some extent, arbitrary but notes that the estimated excess mortality at days with concentrations at the recommended AQG level is small and is roughly comparable across all pollutants considered in this report

的叠加, 仅适用于单一空气污染物的管控目标. (3) 大气颗粒物的健康危害受其具体化学成分和物理特性的影响, 然而, 相关研究仍有不足. 因此, 新版AQG首次针对黑碳(black carbon, BC)、超细颗粒物(ultra-fine particles, UFP)和源于沙尘暴的颗粒物(sand and dust storm, SDS)提供了定性说明, 提示

这些空气污染物的潜在健康危害.

总之, 基于过去15年环境健康研究成果, WHO全球AQG报告基于更多的最新科学研究证据重新评估了空气质量指导值, 针对PM_{2.5}、PM₁₀、O₃和NO₂污染提出了更为严格、更具挑战性的目标, 并规划了更长远的治理路径.

表2 中国现行环境空气质量标准(GB 3095-2012)与2021版AQG过渡期目标的对比^{a)}

Table 2 Comparing current China's national ambient air quality standards to the new WHO air quality guidelines (2021)

污染物	指标	国家标准		AQG (2021)				指导值
		一级	二级	过渡期目标				
				1	2	3	4	
PM _{2.5} (μg/m ³)	年均值	15	35	35	25	15	10	5
	24 h平均	35	75	75	50	37.5	25	15
PM ₁₀ (μg/m ³)	年均值	40	70	70	50	30	20	15
	24 h平均	50	150	150	100	75	50	45
O ₃ (μg/m ³)	暖季峰值(6个月)			100	70			60
	日最大8 h平均	100	160	160	120			100
NO ₂ (μg/m ³)	年平均	40	40	40	30	20		10
	24 h平均	80	80	120	50			25
SO ₂ (μg/m ³)	年平均	20	60					
	24 h平均	50	150	125	50			40
CO (mg/m ³)	24 h平均	4	4	7				4

a) 粗体数字显示有别于2005版的新修订

2 《全球空气质量指南》修订的驱动因素与依据

基于对环境健康研究演进和进展的分析,我们认为,在过去16年间,空气污染健康效应研究所呈现的3个显著特点与变化,是推动和影响AQG修订的关键因素。

(1) 相比于2005版,新版AQG广泛采纳了来自全球的流行病学证据。其重要原因是过去16年间,以中国为代表的发展中国家环境健康研究进展迅速,对空气污染物高暴露浓度的危害有了更清晰的认识。过去16年间,我国科学家针对空气污染的健康效应开展了多个具有标志意义的队列和时间序列研究,例如中国男队列研究^[13]、中国272城市死亡监测研究^[14~18]、中国动脉粥样硬化性心血管疾病风险预测研究(China-PAR)^[19]等。

(2) 过去16年间出现了以MCC研究^[8]等基于国际合作的大规模人群研究,为新版AQG制定全球指导值提供关键依据。例如,MCC研究对于全球空气污染浓度的监测,使多种空气污染物浓度概率分布的量化更为精准,基于多国合作所构建的大样本数据保障了WHO专家组对于某一污染物分布均值(即年均指导值)和99百分位数(即日均指导值)的“转换比率”估算更为精准。

(3) 得益于空气质量的治理,部分西方国家(例如美国 and 加拿大)的部分地区PM_{2.5}浓度已经达到甚至低于2005版PM_{2.5}的AQG。在这些地区,过去16年间出现了部分针对低浓度空气污染健康效应的研究,例如欧洲空气污染低浓度效应研究(effects of low-level air pollution: A study in Europe, ELAPSE)^[20]、美国医保队列(US medicare cohort)^[21]等,其中

部分结果被AQG采纳,作为确定其指导值的关键证据。

AQG修订的根本依据是环境健康研究的科学进展。越来越多的研究表明,空气污染与健康危害存在因果联系或潜在的因果联系。本次修订参考了加拿大健康部(Health Canada)、美国环保署(US Environmental Protection Agency)和国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer)的综合评估报告,在整合毒理学和流行病学证据的基础上,WHO新版AQG文件总结了不同“暴露-疾病”关联的因果性。并在此基础上,认为AQG所关注的6种污染物暴露会导致以下健康危害:自然死亡(或总死亡)、心脑血管疾病死亡(ICD-10编码: I00~I99)、肺癌(C30~C39)、呼吸系统疾病死亡(J00~J99)、哮喘急诊和住院(J45)、缺血性心脏病急诊和住院(I20~I25)、心肌梗死的急诊和住院(I21~I22)。除此之外,越来越多的研究表明,空气污染与其他健康危害有显著关联。如全球疾病负担研究表明,空气污染与成人的2型糖尿病、儿童的低出生体重和早产等不良结果有关;一些流行病学的证据还表明,空气污染暴露与精神健康和退行性精神疾病有关,但2021版AQG的报告中认为,这些关联的因果性仍需进一步加强,因此并未在评估报告中考虑上述其他健康危害。

除了流行病学证据的“自然”积累,新方法和新数据的应用也极大促进了环境健康研究进展。首先,大尺度的人群研究依赖时空分辨率更高的暴露评估技术,结合地面监测和卫星遥感观测、地理信息变量和空气质量模式模拟的数据同化技术被广泛应用于空气污染暴露数据产品的开发。这在国际上以“全球疾病负担”研究所采用PM_{2.5}暴露数据为代表^[22],在国内以清华大学领衔开发的中国大气成分近实时追踪数

据集(Tracking Air Pollution in China, TAP, <http://tapdata.org.cn/>)为代表,该数据集提供近时、高分辨率、时空连续无缺失的PM_{2.5}和O₃日均浓度数据^[23-27]。其次,有别于传统的队列数据,健康大数据在环境流行病学中的应用极大提高了空气污染暴露反应关系的人群代表性。这些数据包括基于医保数据^[21]或者临床/疾病登记数据^[28]构建的“新型”队列研究、基于人口普查数据开展的“全”人群研究等^[29,30]。最后,过去16年间,新统计方法和流行病学设计在空气污染流行病学中的应用,有助于进一步提高结论的稳健性和可解释性。“准实验”研究设计和因果推断统计方法的应用有助于进一步消除混杂效应^[5,21,31-33],基于机器学习的数据分析方法有助于区分不同空气污染组分的健康效应^[34]。得益于科学技术的整体进步,人类对空气污染的危害有了更清晰的认识,为WHO修订AQG提供了关键的新证据。

促进AQG更新的一个重要因素是全球保护公共健康的需求发生了新变化。近年来,在老龄化、世界经济两极化、气候变化等发展趋势的影响下,保护人类健康面临更为艰巨的挑战。首先,发达国家和部分发展中国家的人口急剧老龄化,疾病谱变化导致慢性非传染疾病在总疾病负担中占据更大比例,而空气污染是诱发呼吸和循环系统慢性疾病的重要诱因^[35]。例如,2012~2017年间,我国人口老龄化导致因PM_{2.5}相关死亡人数增加了34万^[4,6],大幅抵消了因空气质量改善带来死亡人数减少41万的保护效益^[36]。其次,欧美等国家经过长年污染治理和产业转移,空气质量水平达到或接近2005版AQG,然而上述国家仍能观测到低浓度空气污染暴露的健康危害^[20,35]。因此,有必要将标准提高,进一步保护人群健康。与此同时,欠发达国家由于其落后的医疗水平和经济发展的需求,空气污染情况仍在恶化、相关疾病负担日趋沉重,尤其是空气污染引致早产^[26]、低出生体重儿^[37,38]和儿童下呼吸道感染等^[39],增加了当地婴幼儿的死亡风险^[30],进一步加剧了全球发展和健康负担的不平等。最后,全球气候变化是当代人类社会面临的最重要威胁之一,如何缓解气候危机是全人类需要解决的重大问题。空气污染与温室气体同源,部分空气污染物(例如BC)的减排能够同时保护人类健康和缓解气候变暖,因而制定更为严格的AQG有助于各国通过提高空气质量治理目标,促进相关温室气体的减排。我们相信,AQG更新后,不仅能更彻底地保护人类健康,而且能更加有助于应对人口老龄化和气候变化、促进世界平等。

此外,需要指出的是,AQG指导值的“科学性”是相对的,AQG指导值修订过程中既要兼顾科学性,也要考量现实可能以及需要,并着眼于推动全球的可持续发展。2021版本的AQG是WHO专家组对于当前研究进展的总结,必然受限于当前的研究范式、分析方法、观测技术、数据资料等。例如,2021版AQG报告首次明确关切BC、UFP、SDS等大气颗粒物组分的健康风险,指出这些特定组分可能解释大气颗粒混合物危害健康的致病机制。针对这些组分单独制定指导值似

乎更为“科学”。然而,无论是全球空气污染常规监测和现存的流行病学证据都不支持单独推出这些组分的指导值。换言之,当前关于PM_{2.5}混合物的指导值也并不适合用于管理和评估某一单独成分或者单一来源的PM_{2.5}污染。未来AQG指导值或者某一特定地区的环境质量基准是否会纳入新的指标取代PM_{2.5}(正如PM_{2.5}和PM₁₀取代了总悬浮颗粒物成为大气颗粒物的环境指标),以及PM_{2.5}现行指导值是否会进一步放宽(正如2021版修订放宽了SO₂指导值,表2)仍是十分值得探讨的科学问题。

3 《全球空气质量指南》与全球达标现状

目前,全球尚未有任何一个国家能够全面达到新版AQG(图1)。以PM_{2.5}年均指导值为例,2019年全球PM_{2.5}浓度暴露最低的10个国家分别为芬兰(5.57 μg/m³)、瑞典(5.65 μg/m³)、冰岛(5.70 μg/m³)、爱沙尼亚(5.89 μg/m³)、新西兰(6.05 μg/m³)、挪威(6.64 μg/m³)、澳大利亚(6.75 μg/m³)、加拿大(7.10 μg/m³)、美国(7.66 μg/m³)和文莱达鲁萨兰国(7.68 μg/m³),即便是这些最“清洁”的国家,其PM_{2.5}浓度年均值均高于新版AQG给出的PM_{2.5}浓度年均值5 μg/m³^[40]。

大多数国家特别是发展中国家和欠发达国家,距离达到WHO 2005 AQG尚有难度,达到新AQG更是难上加难。2019年,全球尚有90%的人口暴露于PM_{2.5}年均浓度超过10 μg/m³(2005 AQG水平)的空气中。大气PM_{2.5}暴露水平最高的地区位于亚洲、非洲和中东地区,其中污染水平位列前十的国家分别为印度、尼泊尔、尼日尔、卡塔尔、尼日利亚、埃及、毛里塔尼亚、喀麦隆、孟加拉国和巴基斯坦。这些国家人口加权PM_{2.5}浓度水平仍是2005版AQG指导值的6~8倍。其中,人口密度高的尼日利亚、孟加拉国、印度、巴基斯坦PM_{2.5}浓度在2010~2019年间仍然呈现增长趋势^[40]。

当前,各国环境空气质量标准距离新版AQG有较大差距。然而,WHO提出的AQG和IT在引领全球空气质量标准的提升中发挥着旗帜作用。包括中国在内的很多国家都在参考AQG或IT的基础上,结合本国的社会经济发展水平、污染特征和空气质量管理能力等制定了各国的空气质量标准。需要注意的是,各国现行空气质量标准普遍比2005版AQG宽松,以PM_{2.5}年均值为例,仅有澳大利亚、加拿大制定了低于2005版AQG的空气质量标准,而中国、印度的标准值则分别是2005版AQG的3.5和4倍(表2)。很显然,2021版AQG将进一步拉开这一差距。

4 《全球空气质量指南》之中国的机遇和挑战

尽管AQG不具有法律约束力,但它可为各国的立法、战略、政策、规划特别是标准的制定提供参考,以降低空气污染物水平并减轻与之相关的健康负担。中国在2012年发布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中增加的细颗粒物

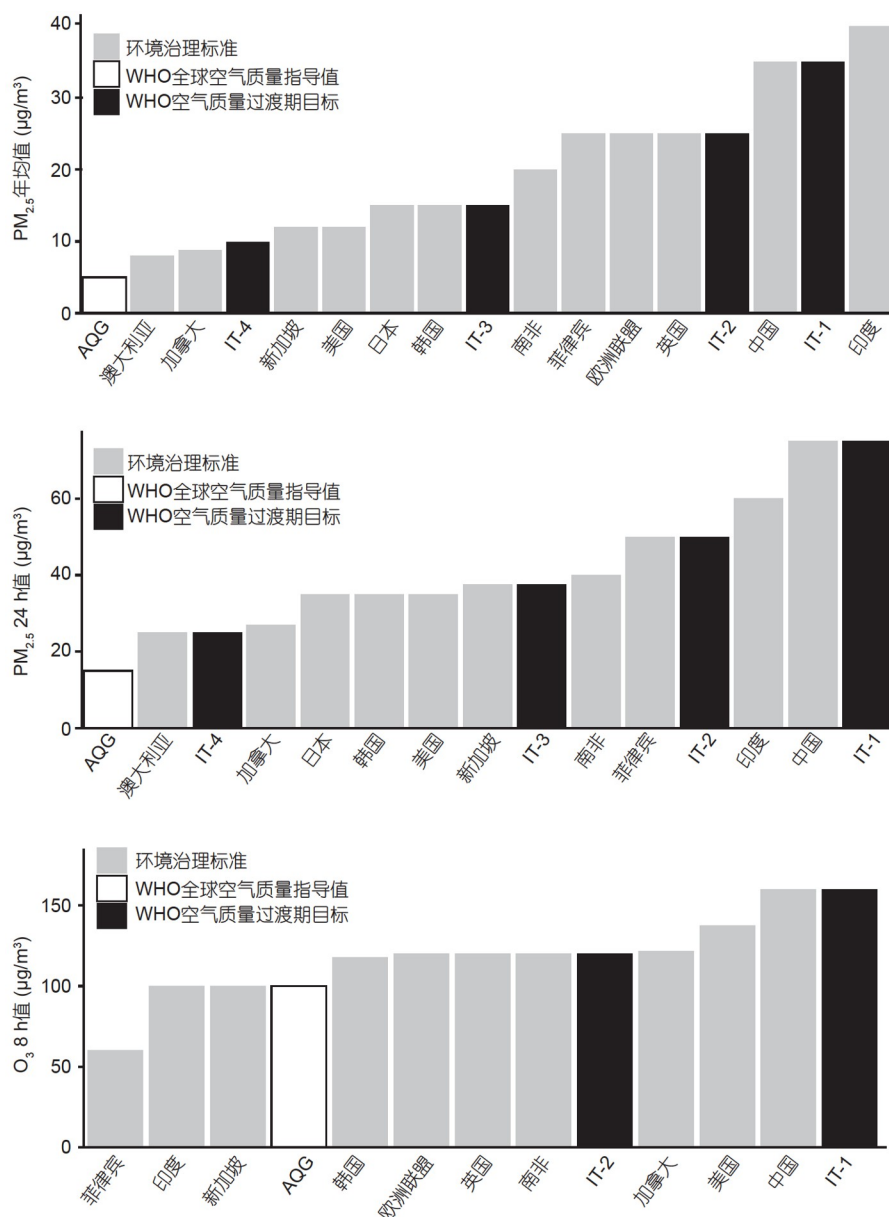


图1 部分国家和地区PM_{2.5}与O₃浓度空气治理标准。白色和黑色分别展示世界卫生组织2021版《全球空气质量指南》指导值(AQG)和过渡期目标(IT)。欧洲联盟采用统一的空气质量标准,因此在图中视为一个地理单元(<https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>)

Figure 1 Air quality guidelines on PM_{2.5} and O₃ in comparison with ambient air quality standards in different countries or regions. The white and black bars show the WHO air quality guidelines and interim targets. European Union applies uniform air quality standards, and thus is visualized a geographic unit in this figure (<https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>)

(PM_{2.5})和臭氧标准就参考了2005版AQG,其中PM_{2.5}与WHO建议的第一阶段过渡目标(IT-1)相当。这是中国在空气治理中与国际标准接轨的一次积极尝试,也在中国的大气污染防治中发挥了关键引领作用,促进了空气质量水平的显著改善(图2)。

在2012年将PM_{2.5}首次纳入环境空气质量标准后,中国政府即于2013~2017年期间实施了《大气污染防治行动计划》^[41],要求截至2017年,京津冀、长江三角洲、珠江三角

洲等区域PM_{2.5}细颗粒物浓度分别下降25%、20%、15%左右,其中北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60 μg/m³左右。在行动计划实施的5年期间,中国在保持经济快速发展的同时实现了主要大气污染物排放量逐年下降,中国城市的空气质量整体显著改善^[42-44]。以74个重点城市数据来看,2017年比2013年达标天数比例提高了20.2%,PM_{2.5}年均浓度水平下降了34.7%,其中京津冀区域下降幅度更是高达39.6%,重污染天数从2013年的75 d下降至28 d^[45]。

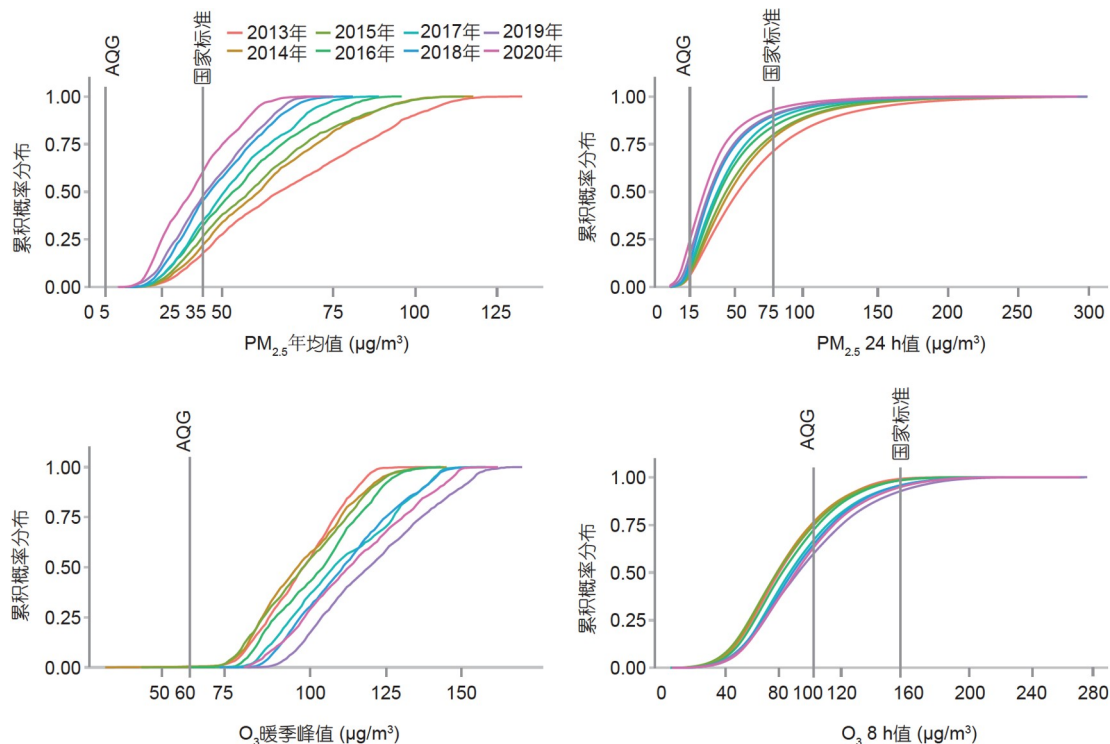


图2 2013~2020年我国PM_{2.5}和O₃暴露分布的变化。污染物浓度数据来源: <http://tapdata.org.cn/>; 人口分布数据来源: <https://landscan.ornl.gov/>。AQG: 2021版《全球空气质量指南》指导值。图中仅给出PM_{2.5}和O₃污染浓度的超标水平,并不适用于评价污染相关的健康风险,WHO的2021版AQG指导值并不适用于多污染物的对比评价和管理。

Figure 2 Variations in population distributions by different levels of PM_{2.5} and O₃ from 2013 to 2020 in China. Source of air pollution concentrations: <http://tapdata.org.cn/>; source of population maps: <https://landscan.ornl.gov/>. AQG: The 2021 global air quality guidelines. The figures only show the comparison between exposure level of PM_{2.5} and O₃ and different standards. Those results are neither indicative for the health risks nor appropriate for management of multiple air pollutants as stated by the WHO AQG 2021.

2018~2020年中国实施《打赢蓝天保卫战三年行动计划》^[46],要求到2020年PM_{2.5}未达标地级及以上城市浓度比2015年下降18%以上。在2020年《打赢蓝天保卫战三年行动计划》收官之年,中国337个城市中有202个城市实现6项标准污染物年评价浓度全部达标,337个城市国控监测站点PM_{2.5}整体年均浓度为33 µg/m³,首次低于年均浓度标准水平。很显然,2012年《环境空气质量标准》的修订使得我国的大气污染防治行动计划有了明确的目标,并促成了控制目标从“量”到“质”的根本性转变。

伴随着中国自2013年以来的空气质量持续改善,现行标准对于大部分已达标城市不再具有强有力的引领和驱动作用。以深圳为代表的空气质量改善领先城市已经先行对标欧洲联盟国家标准,设置了更高要求的空气质量管理目标。可以预见,“十四五”大气污染防治规划的整体目标可能比现行标准限值更为严格。是否要启动新一轮空气质量标准的修订已经提上研究议程,新版AQG的发布势必引发更多讨论,如何缩小现实可行的环境质量标准与AQG之间的差距,需要更深入的研究与决策权衡。

中国经济从高速发展进入稳态增长周期和结构转型时

期,以化石燃料为能源消费主体的能源结构还没有发生根本性的转变,同时受到新型冠状病毒疫情的影响,保持适度经济增长以满足总体经济健康发展和民众生活水平提升的需要,将使得环境质量改善与经济增长需求之间的平衡面对更多的压力和阻力,特别是空气质量已经达标的地区进一步改善的动力可能不足。

此外,中国已进入大气污染减排深水区,进一步提升空气质量的技术要求、结构调整难度都在加大。例如,对排放总量贡献较大的电力和钢铁行业已经开始实施领先于世界的排放标准并开展超低排放改造,机动车污染控制也进入“国六”阶段。这意味着空气质量改善的边际成本和社会总成本都会高于以往,必须寻求基于审慎研究、精细管理的较低成本的空气质量改善路径。

2020年,中国宣布2030年前实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”的目标^[32],为我国空气质量的持续改善提供了巨大驱动力。有研究估算,如果我国在2060年完成低碳能源转型,并采取积极的大气污染控制措施,全国人群PM_{2.5}年均暴露水平将达到8 µg/m³左右,78%的人群PM_{2.5}年均暴露水平低于10 µg/m³^[47]。同时,由于空气污染和气候变化同根同源的特

点,任何持续的空气质量改善行动,都将助力产业和经济结构调整,推动中国整体的绿色转型和低碳发展。而中国的经济增长模式和结构调整,不仅可以借助绿色转型和低碳发展来改善空气质量、产生巨大的健康效益,同时,也将在全球强调绿色发展的大背景下,促进中国在国际贸易、国际分工合作中国际竞争力的提升。

WHO的AQG修编团队基于大量、严格的科学研究和综合分析后所确定的指导值,属于环境健康研究的基准值。将基准值转化为一个国家有法律效力的环境空气质量标准,还需要基于社会、经济、技术等方面的全面分析,对相关领域的基础研究提出了更为急迫和更高要求。因此,本文仅对WHO的AQG修订内容进行解读,并不涉及新的指导值在中国适用性的论证。

相较于直接参考WHO的AQG指导值制定国家和地方标准,更有必要参照WHO修订AQG所采用的科学方法,开展适用于中国人群的相关研究,支撑本地化的空气环境质量标准的修订。关于环境健康方面的基础研究,我们认为如下议题尤为重要:(1)中国城乡人群的大气污染暴露来源、暴露特

征及相应健康风险定量评估;(2)特定易感人群的大气污染暴露反应关系;(3)多种大气污染成分同时暴露的健康风险评估方法学研究^[24,48]及应用于我国的实证分析;(4)黑碳、超细颗粒物、近地面臭氧等污染物的短期和长期暴露的健康影响;(5)易感与脆弱人群的大气污染暴露危害的干预和预防措施。未来,中国需要基于本地化研究,为决策目标以及我国大气质量标准的修订提供必要的科学研究证据支持,特别是能代表中国人群特征的科学依据,并据此评估新AQG指导值在中国人群的适用性,包括但不限于探讨如下问题:(1)我国是否应效仿WHO制定暖季O₃标准;(2)鉴于我国SO₂仍高于WHO的IT1目标,是否应该加严相关空气质量标准;(3)现阶段是否有必要对标严格乃至“苛刻”的PM_{2.5}年均浓度指导值(5 μg/m³)。此外,在碳达峰、碳中和目标下,还需要以健康促进气候变化与空气污染治理协同,从健康风险、防治策略及措施的成本与效益等角度开展大气污染和气候变化的协同治理目标与路径优化研究。总而言之,WHO 2021版AQG的发布对中国而言,是一个实现空气-气候-健康领域的多重治理目标、提升其协同效益、最大程度保护公众健康的重要机遇。

致谢 感谢能源基金会项目(G-2107-33169, R-2109-33379)和国家自然科学基金(4217050142)资助。

推荐阅读文献

- 1 World Health Organization. Evolution of WHO Air Quality Guidelines: Past, Present and Future. 2017
- 2 World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. 2021
- 3 Vrijheid M, Casas M, Gascon M, et al. Environmental pollutants and child health—A review of recent concerns. *Int J Hyg Environ Health*, 2016, 219: 331–342
- 4 Guan T, Xue T, Liu Y, et al. Differential susceptibility in ambient particle-related risk of first-ever stroke: Findings from a national case-crossover study. *Am J Epidemiol*, 2018, 187: 1001–1009
- 5 Xue T, Han Y, Fan Y, et al. Association between a rapid reduction in air particle pollution and improved lung function in adults. *Ann ATS*, 2021, 18: 247–256
- 6 Han Y, Wang Y, Li W, et al. Susceptibility of prediabetes to the health effect of air pollution: A community-based panel study with a nested case-control design. *Environ Health*, 2019, 18: 65
- 7 Peters R, Ee N, Peters J, et al. Air pollution and dementia: A systematic review. *J Alzheimer Dis*, 2019, 70: S145–S163
- 8 Liu C, Chen R, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *N Engl J Med*, 2019, 381: 705–715
- 9 Heinrich J, Thiering E, Rzehak P, et al. Long-term exposure to NO₂ and PM₁₀ and all-cause and cause-specific mortality in a prospective cohort of women. *Occup Environ Med*, 2013, 70: 179–186
- 10 Faustini A, Rapp R, Forastiere F. Nitrogen dioxide and mortality: Review and meta-analysis of long-term studies. *Eur Resp J*, 2014, 44: 744–753
- 11 Karakatsani A, Samoli E, Rodopoulou S, et al. Weekly personal ozone exposure and respiratory health in a panel of greek schoolchildren. *Environ Health Perspect*, 2017, 125: 077016
- 12 Huangfu P, Atkinson R. Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 2020, 144: 105998
- 13 Yin P, Brauer M, Cohen A, et al. Long-term fine particulate matter exposure and nonaccidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men. *Environ Health Perspect*, 2017, 125: 117002
- 14 Chen R, Yin P, Meng X, et al. Associations between coarse particulate matter air pollution and cause-specific mortality: A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Environ Health Perspect*, 2019, 127: 017008

- 15 Chen R, Yin P, Meng X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality: A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196: 73–81
- 16 Liu C, Yin P, Chen R, et al. Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: A nationwide time-series analysis in 272 cities in China. *Lancet Planet Health*, 2018, 2: e12–e18
- 17 Yin P, Chen R, Wang L, et al. Ambient ozone pollution and daily mortality: A nationwide study in 272 Chinese cities. *Environ Health Perspect*, 2017, 125: 117006
- 18 Chen R, Yin P, Meng X, et al. Associations between ambient nitrogen dioxide and daily cause-specific mortality. *Epidemiology*, 2018, 29: 482–489
- 19 Huang K, Liang F, Yang X, et al. Long term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of stroke: Prospective cohort study from the china-par project. *Br Med J*, 2019, 367: 16720
- 20 Strak M, Weinmayr G, Rodopoulou S, et al. Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the elapse project: Pooled analysis. *Br Med J*, 2021, 374: n1904
- 21 Di Q, Wang Y, Zanobetti A, et al. Air pollution and mortality in the medicare population. *N Engl J Med*, 2017, 376: 2513–2522
- 22 Hammer M S, van Donkelaar A, Li C, et al. Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998–2018). *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 7879–7890
- 23 Xiao Q, Zheng Y, Geng G, et al. Separating emission and meteorological contributions to long-term PM_{2.5} trends over eastern China during 2000–2018. *Atmos Chem Phys*, 2021, 21: 9475–9496
- 24 Geng G, Xiao Q, Liu S, et al. Tracking air pollution in China: Near real-time PM_{2.5} retrievals from multisource data fusion. *Environ Sci Technol*, 2021, 55: 12106–12115
- 25 Xue T, Zheng Y, Geng G, et al. Estimating spatiotemporal variation in ambient ozone exposure during 2013–2017 using a data-fusion model. *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 14877–14888
- 26 Guan T, Xue T, Gao S, et al. Acute and chronic effects of ambient fine particulate matter on preterm births in Beijing, China: A time-series model. *Sci Total Environ*, 2019, 650: 1671–1677
- 27 Xiao Q, Geng G, Xue T, et al. Tracking PM_{2.5} and O₃ pollution and the related health burden in China 2013–2020. *Environ Sci Technol*, 2021, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04548>
- 28 Yang L, Xue T, Wang N, et al. Burden of lung cancer attributable to ambient fine particles and potential benefits from air quality improvements in Beijing, China: A population-based study. *Sci Total Environ*, 2020, 738: 140313
- 29 Xue T, Zhu T, Zheng Y, et al. Change in the number of PM_{2.5}-attributed deaths in China from 2000 to 2010: Comparison between estimations from census-based epidemiology and pre-established exposure-response functions. *Environ Int*, 2019, 129: 430–437
- 30 Xue T, Geng G, Li J, et al. Associations between exposure to landscape fire smoke and child mortality in low-income and middle-income countries: A matched case-control study. *Lancet Planet Health*, 2021, 5: e588–e598
- 31 Xue T, Zheng Y, Li X, et al. A component-specific exposure-mortality model for ambient PM_{2.5} in China: Findings from nationwide epidemiology based on outputs from a chemical transport model. *Faraday Discuss*, 2021, 226: 551–568
- 32 Xue T, Zhu T, Peng W, et al. Clean air actions in China, PM_{2.5} exposure, and household medical expenditures: A quasi-experimental study. *PLoS Med*, 2021, 18: e1003480
- 33 Xue T, Guan T, Zheng Y, et al. Long-term PM_{2.5} exposure and depressive symptoms in China: A quasi-experimental study. *Lancet Reg Health-West Pac*, 2021, 6: 100079
- 34 Bobb J F, Valeri L, Henn B C, et al. Bayesian kernel machine regression for estimating the health effects of multi-pollutant mixtures. *Biostatistics*, 2015, 16: 493–508
- 35 Wu X, Braun D, Schwartz J, et al. Evaluating the impact of long-term exposure to fine particulate matter on mortality among the elderly. *Sci Adv*, 2020, 6: eaba5692
- 36 Geng G, Zheng Y, Zhang Q, et al. Drivers of PM_{2.5} air pollution deaths in China 2002–2017. *Nat Geosci*, 2021, 14: 645–650
- 37 Li J, Guan T, Guo Q, et al. Exposure to landscape fire smoke reduced birthweight in low- and middle-income countries: Findings from a siblings-matched case-control study. *eLife*, 2021, 10: e69298
- 38 Xue T, Zhu T, Han Y. Association between birthweight and ambient PM_{2.5} in the United States: Individually-varied susceptibility and spatial heterogeneity. *Environ Int*, 2018, 119: 388–397
- 39 Pandey M R, Smith K R, Boleij J S M, et al. Indoor air pollution in developing countries and acute respiratory infection in children. *Lancet*, 1989, 333: 427–429
- 40 State of Global Air 2020. Data Source: Global Burden of Disease Study 2019. 2020, https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf
- 41 National State Council. Air Pollution Prevention and Control Action Plan (in Chinese). 2013, http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2496394.htm [国务院. 大气污染防治行动计划. 2013, http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2496394.htm]

- 42 Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1178–1187 [张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013, 58: 1178–1187]
- 43 Huang S X. Air pollution and control: Past, present and future (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 895–919 [黄顺祥. 大气污染与防治的过去, 现在及未来. *科学通报*, 2018, 63: 895–919]
- 44 Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of $\text{PM}_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013–2017. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1847–1856 [薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的快速改善及其健康效益. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 441–452]
- 45 Clean Air Asia. Breakthroughs: China's Path to Clean Air 2013–2017 (in Chinese). 2018, <http://allaboutair.cn/a/reports/2018/1227/527.html> [亚洲清洁空气中心. 突破: 中国清洁空气之路2013~2017. 2018, <http://allaboutair.cn/a/reports/2018/1227/527.html>]
- 46 van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, et al. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Syst Sci Data*, 2017, 9: 697–720
- 47 Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al. Pathways of China's $\text{PM}_{2.5}$ air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *Natl Sci Rev*, 2021, 8: nwab078
- 48 Li X, Xue T, Zheng B, et al. Risk assessment of mortality from acute exposure to ambient fine particles based on the different toxicities of chemical compositions in China. *J Integrat Environ Sci*, 2021, 18: 55–66

Summary for “世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读”

Insights into the new WHO *Global Air Quality Guidelines*

Tong Zhu^{1*}, Wei Wan², Jun Liu³, Tao Xue^{4,5}, Jicheng Gong¹ & Shiqiu Zhang¹¹ College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;² Clean Air Asia, Beijing 100600, China;³ School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;⁴ Institute of Reproductive and Child Health/National Health Commission Key Laboratory of Reproductive Health, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China;⁵ Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China* Corresponding author, E-mail: tzhu@pku.edu.cn

Exposure to air pollution has been linked to a massive global disease burden. To protect public health, the World Health Organization (WHO) released new *Global Air Quality Guidelines* (AQGs) on September 22, 2021, based on integrated evidence from > 500 research articles. This document reported recommended AQGs and corresponding interim targets (ITs) for six ambient air pollutants, namely inhalable particles with diameter < 10 micrometers (PM₁₀), fine inhalable particles with diameter < 2.5 micrometers (PM_{2.5}), ozone (O₃), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), and carbon monoxide (CO). An AQG represents the theoretical concentration providing minimal risk attributable to single-pollutant exposure, and the corresponding ITs are concentrations associated with various levels of tolerable risk based on quantitative health impact assessment. ITs can act as key references for air quality regulation. WHO last published AQGs in 2006. Compared to the previous guidelines, the new AQGs further limit some air pollutants due to increased confidence regarding their health effects at low levels of exposure. Specifically, the annual limits on PM_{2.5}, PM₁₀, and NO₂ have been lowered from 10, 20, and 40 to 5, 15, and 10 µg/m³, respectively. The 24-hour limits on PM_{2.5} and PM₁₀ were lowered from 25 and 50 µg/m³ to 15 and 45 µg/m³, respectively. The new guidelines offer additional limits on peak-season O₃ (< 60 µg/m³) and 24-hour NO₂ (< 25 µg/m³) for controlling their health impacts. The revised AQGs are applicable to both outdoor and indoor environments but not occupational environments. AQGs also provide qualitative information on the health effects of component-specific particles, including black carbon or elemental carbon, ultrafine particles, and particles originating from sand and dust storms. In this guideline update, WHO recommends strict limits on a few pollutants (e.g., PM_{2.5}), which should be appropriately interpreted when planning air quality policies in China. Since 2013, China's clean air actions have rapidly reduced PM_{2.5} pollution, supporting a new national ambient air quality standard that is more rigorous than the current level (35 µg/m³, equivalent to the WHO first-stage IT). The AQG revision is based on a synthesis of the accumulated evidence about the health effects of air pollution. Such evidence has grown rapidly over the past 15 years, but remains limited for characterizing the complex factors underlying the disease burden of mixed air pollution. Development of the new AQGs depended strongly on observations of the health effects of low-concentration exposures obtained from high-income countries (e.g., Canada and the United States). Therefore, application of the AQGs in highly- or moderately-polluted countries should be examined further through local studies. Additionally, the AQGs are applicable to a single exposure type, but not multi-pollutant mixtures, to which people are exposed in the real world. Limits, including those described above, should be considered by governments developing local air quality standards. Development or revision of national ambient air quality standards should be highly reliant on environmental health studies that focused on the local population, with reference to the new WHO AQGs.

global air quality guidelines, air pollution, environmental policy, environmental health, disease burdendoi: [10.1360/TB-2021-1128](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1128)