·环境与职业卫生·

气象因素与空气污染物对呼吸系统疾病的影响及其交互作用

李根山[1],何淑珍[2,1],马春光[2],吴晶[2],马玉花[3],胡钟桦[4],宁振旭[1],张建秀[1],华晓娟[1]
1. 青海大学医学部公共卫生系,青海 西宁 810000;2. 西宁市疾病预防控制中心职业卫生科,青海 西宁 810000;
3. 西宁市第三人民医院;4. 西宁市卫生健康委员会

摘要:目的　探讨西宁市气象因素与空气污染物对呼吸系统疾病门诊就诊量的独立和交互作用,为高原地区城市公共健康防护提供科学依据。**方法**　采用时间分层病例交叉设计,纳入 2016—2021 年西宁市三家医院呼吸系统门诊数据,污染物数据来源于中国空气质量在线监测平台。通过广义非线性模型分析 CO、O_3、SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 及温度的滞后效应,并利用双变量响应面模型和相对超额风险、归因比例量化交互作用。**结果**　单污染物模型分析显示:CO、NO_2 随浓度升高就诊风险增大;SO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 呈现出"先升后降"的曲线,峰值 *RR* 分别为 1.69、1.55 和 1.80;O_3 呈"U"形曲线,低谷 *RR* 为 0.76。滞后效应分析表明,SO_2、NO_2、PM_{10} 的当日效应最强,SO_2 在滞后第 7 天达峰值(*RR*=1.54,95%*CI*:1.26 ~ 1.88),NO_2 在第三天累积滞后效应达到峰值(*RR*=1.20,95%*CI*:1.11 ~ 1.31)。交互作用分析显示,在低温条件下 SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 存在显著协同效应,而与 O_3 呈拮抗效应;在高温条件下仅与 O_3 呈协同效应。**结论**　西宁市呼吸系统疾病风险受污染物浓度、温度及其交互作用共同影响,低温加剧气态污染物和颗粒物对健康的危害,高温增强 O_3 的危害效应。

关键词:污染物;交互作用;呼吸系统疾病;滞后效应
中图分类号:R122.2;R56　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1003-8507(2025)23-4283-08
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202506145

The effects of meteorological factors and air pollutants on respiratory diseases and their interaction

LI Gen-shan*, HE Shu-zhen, MA Chun-guang, WU Jing, MA Yu-hua, HU Zhong-hua, NING Zhen-xu, ZHANG Jian-xiu, HUA Xiao-juan
Department of Public Health, Faculty of Medicine, Qinghai University, Xining, Qinghai 810000, China

Abstract: Objective To explore the independent and interactive effects of meteorological factors and air pollutants on the outpatient visits of respiratory diseases in Xining City, and to provide a scientific basis for urban public health protection in plateau areas. **Methods** A time-stratified case-crossover design was used. Outpatient visit data for respiratory diseases from three hospitals in Xining during 2016—2021 were included, and pollutant data were obtained from the China Air Quality Online Monitoring Platform. A generalized nonlinear model was applied to assess the lagged effects of CO, O_3, SO_2, NO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$ and temperature. Interactions were quantified using a bivariate response surface model, relative excess risk due to interaction (RERI), and attributable proportion (AP). **Results** The single pollutant model analysis showed that the risk of outpatient visits increased with higher concentrations of CO and NO_2. SO_2, PM_{10} and $PM_{2.5}$ showed a 'first increase and then decrease' curve, and the peak *RRs* were 1.69, 1.55 and 1.80, respectively. O_3 showed a 'U' shaped curve, and the trough *RR* was 0.76. The lag effect analysis indicated that same-day effects were strongest for SO_2, NO_2 and PM_{10}. The peak *RR* of SO_2 reached (*RR*=1.54, 95% *CI*: 1.26-1.88) at lag 7 days, and the cumulative lag effect of NO_2 reached (*RR*=1.20, 95% *CI*: 1.11-1.31) at lag 3 days. The interaction analysis showed that SO_2, NO_2, PM_{10} and $PM_{2.5}$ had a significant synergistic effect at low temperatures, but had an antagonistic effect with O_3. Under high temperature conditions, it only had a synergistic effect with O_3. **Conclusion** The risk of respiratory diseases in Xining is affected by the concentration of pollutants, temperature and their interaction. Low temperature aggravates the health hazards of gaseous pollutants and particulate matter, and high temperature enhances the hazard effect of O_3.

Keywords: Pollutants; Interaction; Respiratory diseases; Lag effect

基金项目:中国疾病预防控制中心——环境卫生与健康防护宣教项目(中疾控环协合同气候发[2024]1-2 号)
作者简介:李根山(2000—),男,硕士在读,研究方向:环境与健康
通信作者:何淑珍,E-mail:hehe3991391@126.com

呼吸系统疾病是全球公共卫生负担的重要组成部分，其发生与加重过程与多种环境暴露因素密切相关。世界卫生组织数据显示，空气污染每年导致约700万人过早死亡[1]，空气污染也会导致变应性鼻炎和哮喘等呼吸系统疾病的发病率增加[2]。与此同时，气候变化所引发的极端温度事件正不断加剧人群的健康风险。已有研究表明，温度不仅会通过改变污染物的扩散行为，还可能影响人体的免疫反应，从而与空气污染物共同作用，增强对健康的不利影响[3-5]。

在高海拔地区，独特的气候条件可显著改变环境因素对健康结局的影响模式。西宁市作为中国典型的高原城市，其地理与气候特征尤为特殊。该市位于湟水河谷地带，地形封闭，加之降水稀少，不利于空气污染物的扩散与稀释。同时，该地区强烈的太阳辐射为光化学反应提供了充足能量，促进二次污染物的形成，进一步加重了对居民呼吸系统健康的威胁。为全面了解污染物与气象因素对西宁市呼吸系统疾病门诊就诊量的影响，本研究利用2016—2021年西宁市居民就诊数据，结合气象和污染物监测数据，构建分布滞后非线性模型，分析污染物和气象因素对呼吸系统疾病门诊风险的影响及其滞后效应，并探讨其交互作用。

1　材料与方法

1.1　资料来源　本研究收集西宁市中心城区三家三甲医院2016—2021年的就诊数据，包括就诊者性别、年龄、就诊时间、国际疾病分类(International Classification of Diseases 10,ICD-10)编码等信息。将ICD-10编码为J00～J99呼吸系统疾病的个案剔除重复数据后全部纳入此次研究。气象数据来自于西宁市气象局监测站同期逐日气象数据，包括平均气温、平均相对湿度。空气污染物数据来源于中国空气质量在线监测平台，主要包括SO_2(μg/m³)、NO_2(μg/m³)、$O_{3\text{-}8h}$(μg/m³)、CO(mg/m³)、$PM_{2.5}$(μg/m³)、PM_{10}(μg/m³)6项数据。本研究将四个国控监测点污染物逐日浓度的平均值作为西宁市居民的每日平均污染物暴露浓度。

1.2　描述性分析　采用R软件统计分析研究期间各个变量的均值和标准差、最大值、最小值、中位数、四分位数等。采用Spearman相关分析描述污染物及气象因素间的相关性。

1.3　统计学分析　本研究采用时间分层病例交叉设计，把与病例事件发生日同一个月份中同一个星期日的其他病例最为对照日，来控制长期趋势和星期效应等时间混杂因素[6-7]。并且采用广义非线性模型，以捕捉空气污染物对呼吸系统疾病的影响。在模型构建中引入了交叉基函数，探索污染物浓度的非线性关系及其滞后效应。模型如下：

$$\log E(Y_t)=\beta_0+\beta_1 f(X_t,l)+\beta_2 ns(RH_t,3)+\alpha stratum$$

其中β_0、β_1、β_2分别为模型的截距项和变量的系数；Y_t为第t日的呼吸系统门诊人次数；$f(X_t,l)$为交叉基函数；$ns(RH_t,v=3)$[8]是相对湿度在t日的自然样条函数，自由度为3；α为时间分层系数；$stratum$是基于年月与星期几的时间分层变量，用于控制潜在时间混杂。

为评估空气污染物与温度对呼吸系统疾病门诊就诊量的交互作用，首先采用双变量响应面模型，通过绘制三维空间图对交互作用进行定性分析，直观地展示两者交互作用对居民门诊量的影响。其次将空气污染物按照中位数分为低浓度和高浓度两组，并将日平均温度高于第95百分位数定义为高温暴露，低于第5百分位数定义为低温暴露[9]。将污染物与温度组合形成等级变量纳入模型，计算污染物与温度的交互作用，交互作用通过相对超额风险(relative excess risk due to interaction,RERI)、归因比例(attributable proportion,AP)以及交互作用指数(synergy index,S)进行量化[10-11]，所有指标的95%置信区间(confidence interval，*CI*)采用delta法计算。公式如下：

$$RERI=RR_{11}-RR_{10}-RR_{01}+1$$

$$AP=\frac{RERI}{RR_{11}}$$

$$S=\frac{RR_{11}-1}{(RR_{10}-1)+(RR_{01}-1)}$$

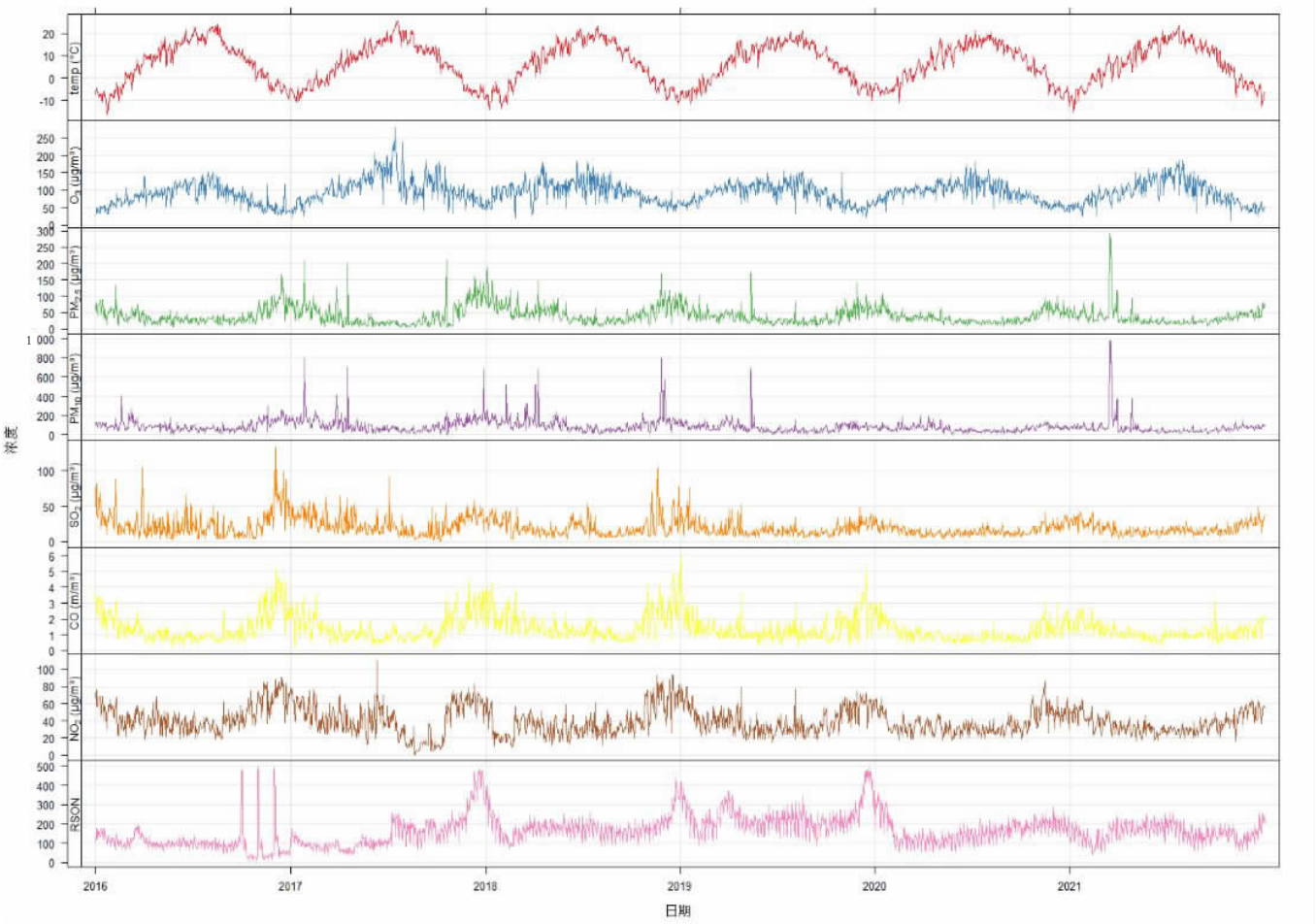
本研究采用R 4.4.2软件的“dlnm”和“gnm”软件包进行模型构建和统计分析。检验水准α=0.05。

2　结　果

2.1　基本情况　污染物O_3、SO_2、NO_2、$PM_{2.5}$、PM_{10}、CO的均值分别为93.31、20.03、39.31、87.87和40.17 μg/m³以及1.36 mg/m³。$PM_{2.5}$和PM_{10}最大值分别达到290.00和978.00 μg/m³，体现出研究地区的独有特征。气象参数也显示出研究区域的独特气候特征，在研究期间，日均温度跨度达41.8℃，在-16.20℃～25.60℃之间波动，平均为6.46℃，而相对湿度在15%～94%之间，均值为56.67%。本研究共纳入了358 851例研究对象，日均门诊量为163.71人次，最小值为9人次，最大值为493人次，呈现一定程度的日常波动。见图1，表1。

2.2　相关性分析　为探究污染物与气象因素之间的关系，采用Spearman相关系数进行分析，表2结果显示，多数污染物之间存在中等至强的正相关性，CO与SO_2(r=0.66)、NO_2(r=0.67)、PM_{10}(r=0.59)、$PM_{2.5}$(r=0.68)呈现正相关关系，表明这些污染物在一定程度

上具有相似的来源或排放机制，可能受到共同的人类活动或环境因素影响。同时，CO 与 O_3（r=–0.42）、相对湿度（RH，r=–0.33）、日均温度（Temp，r=–0.53）呈负相关。此外，PM_{10} 与 PM_{25} 之间的相关性亦较强（r=0.83），符合其颗粒组成和生成机制的重叠特性。



注：RSON 为呼吸系统疾病门诊人数。

图 1　2016—2021 年西宁市污染物、气象因素和呼吸系统疾病门诊数的时间序列图

Figure 1　Time series diagram of residential pollutants, meteorological factors and outpatient number of respiratory diseases in Xining City from 2016 to 2021

表 1　2016—2021 年西宁市污染物、气象因素和呼吸系统疾病门诊数的描述分析

Table 1　Descriptive analysis of pollutants, meteorological factors and outpatient number of respiratory diseases in Xining City from 2016 to 2021

变量	最小值	$\bar{x} \pm s$	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值
O_3/(μg/m³)	11.00	93.31 ± 33.46	68.00	92.00	115.00	281.00
CO/(mg·m³)	0.20	1.36 ± 0.78	0.81	1.13	1.64	6.10
SO_2/(μg/m³)	1.00	20.03 ± 13.12	11.00	16.00	25.00	133.00
NO_2/(μg/m³)	1.00	39.31 ± 16.11	28.00	36.00	49.00	110.00
PM_{10}/(μg/m³)	6.00	87.87 ± 76.02	47.00	71.00	106.00	978.00
$PM_{2.5}$/(μg/m³)	4.00	40.17 ± 27.3	22.00	33.00	51.00	290.00
相对湿度（%）	15.00	56.67 ± 16.23	45.00	57.00	69.00	94.00
日均温度（℃）	–16.20	6.46 ± 9.15	–1.80	7.25	14.40	25.60
日均门诊量	9.00	163.71 ± 77.51	108.00	155.50	204.00	493.00

气象因素中，气温与 O_3 呈较强正相关（r=0.72），与 $PM_{2.5}$（r=–0.61）、CO（r=–0.53）呈负相关，这表明高温条件下臭氧生成增强，但其他污染物（如交通和燃烧相关）浓度可能因大气扩散条件改善而降低。相对湿度与多个污染物呈负相关，其中 PM_{10}（r=–0.46）和 SO_2（r=–0.44）相关性较强，可能与湿度条件下颗粒物

的吸湿增长和洗脱作用相关。

表 2　2016—2021 年西宁市气象因素与污染物的相关系数(r)

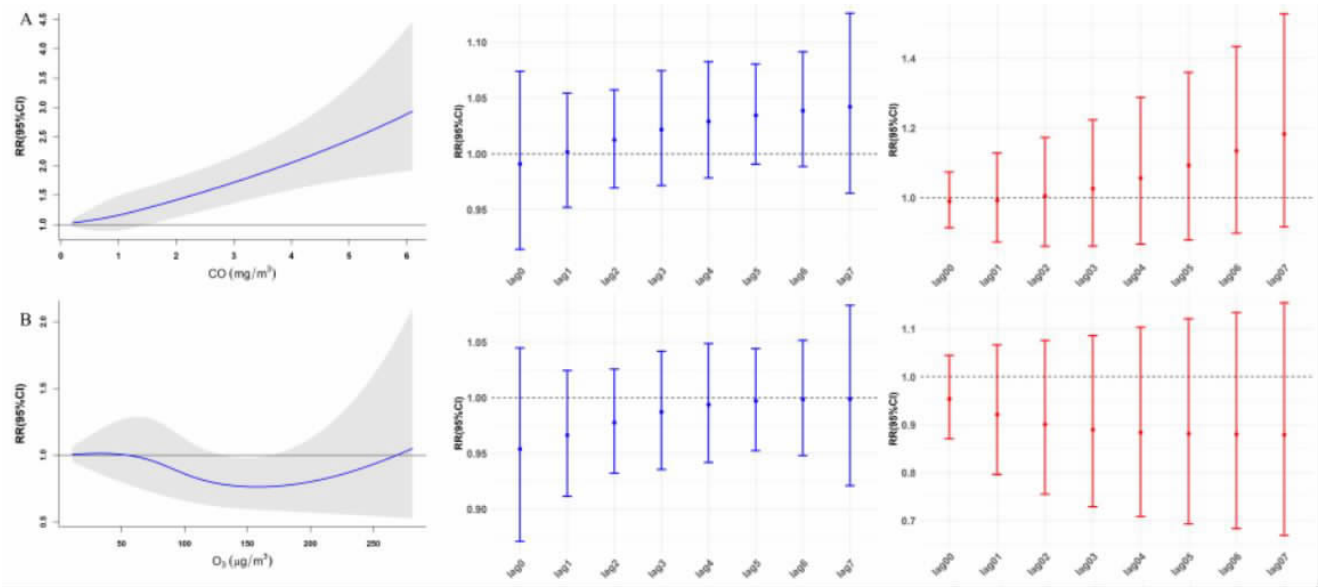
Table 2　Correlation coefficient between meteorological factors and pollutants in Xining City from 2016 to 2021 (r)

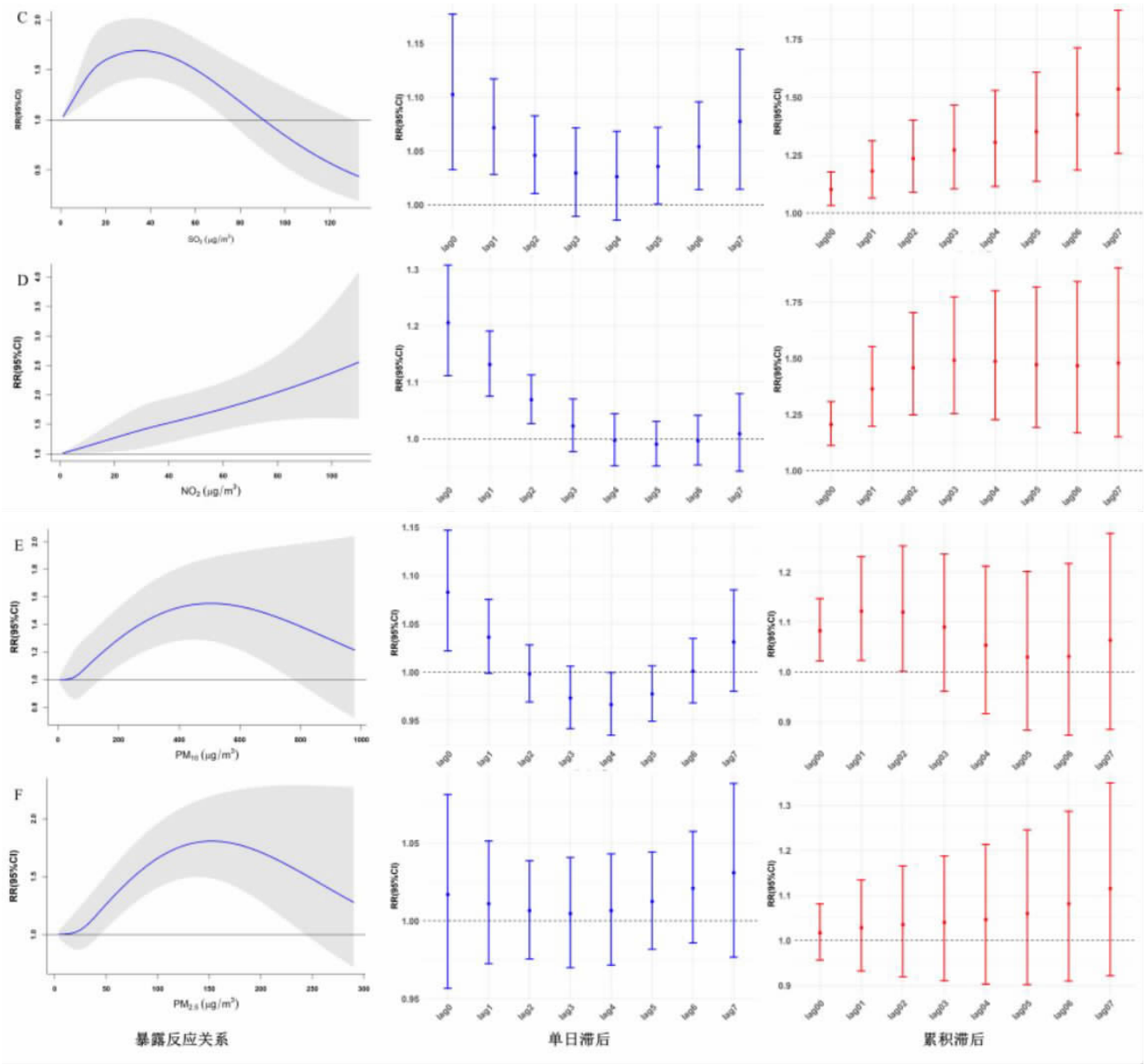
变量	CO	O_3	RH	SO_2	NO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	Temp
CO	1							
O_3	−0.42*	1						
RH	−0.33*	−0.01*	1					
SO_2	0.66*	−0.27*	−0.44*	1				
NO_2	0.67*	−0.5*	−0.29*	0.62*	1			
PM_{10}	0.59*	−0.34*	−0.46*	0.54*	0.55*	1		
$PM_{2.5}$	0.68*	−0.48*	−0.34*	0.55*	0.59*	0.83*	1	
Temp	−0.53*	0.72*	0.22*	−0.38*	−0.47*	−0.48*	−0.61*	1

注：*P<0.05。

2.3　污染物对呼吸系统疾病门诊风险的影响　图 2 为污染物与呼吸系统疾病就诊风险的总体暴露－反应关系、污染物在中位数时的单日滞后以及累积滞后。由图可见污染物 CO 与 NO_2 随着浓度的升高就诊风险逐渐上升；SO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 呈现出先上升后下降，在 36.00、503.00 和 152.30 μg/m³ 达到最大值，RR 值分别为 1.69（95%CI：1.42～2.01）、1.55（95%CI：1.28～1.88）、1.80（95%CI：1.49～2.20）；而 O_3 呈现出“U”形曲线，当 O_3 浓度处于第 87% 至第 97% 分位数时（浓度值为 130.00～170.00 μg/m³），结果具有统计学意义，当浓度在 159.40 μg/m³ 时风险最小，此时 RR=0.76（95%CI：0.59～0.98），臭氧降低了呼吸系统疾病门诊就诊量。

SO_2 在暴露当天（lag0）风险最大（RR=1.10，95%CI：1.03～1.18），随着滞后天数的增加，风险呈现出先降低再增加。对于累积滞后效应，则随着滞后天数的累积风险逐渐增大，在第七天（lag07）达到最大（RR=1.54，95%CI：1.26～1.88）。NO_2 同样在暴露当天（lag0）风险最大（RR=1.20，95%CI：1.11～1.31），随着滞后天数的增加，风险逐渐降低，在第三天（lag3）之后效应不再具有显著性。在累积滞后效应中，在第三天（lag03）达到最大（RR=1.49，95%CI：1.25～1.77），之后几天依然维持较高风险。PM_{10} 在暴露当天（lag0）风险最大（RR=1.08，95%CI：1.02～1.15），随着滞后天数的增加，风险逐渐降低，在第一天（lag1）之后效应不再具有显著性。对于累积滞后效应，则随着滞后天数的累积风险逐渐增大，在第一天（lag01）达到最大（RR=1.12，95% CI：1.02～1.23）。污染物 CO、O_3 和 $PM_{2.5}$ 在各自中位数浓度时的单日滞后效应和累积滞后效应不具有显著性（P>0.05）。





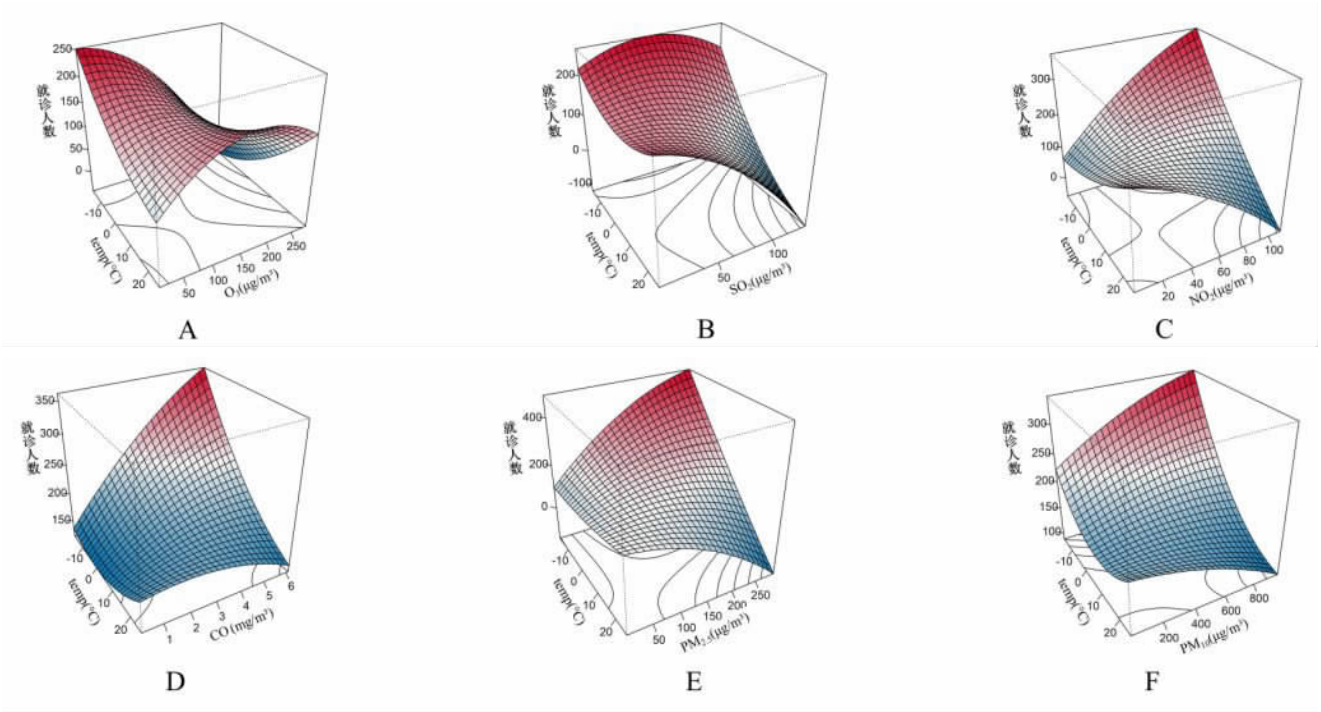
注：图 A、B、C、D、E、F 分别为 CO、O_3、SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$。

图 2　2016—2021 年西宁市不同污染物对呼吸系统疾病门诊风险的关系

Figure 2　Relationship between different pollutants and outpatient risk of respiratory diseases in Xining from 2016 to 2021

2.4　气象因素与污染物对呼吸系统疾病门诊量的交互作用分析　表 3 显示，低温条件下，SO_2、NO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 表现出较强的协同效应，而 O_3 呈现拮抗效应；在高温暴露时，O_3 则转为协同效应，其他污染物与高温的交互作用不具有显著性。

具体而言，SO_2 与低温暴露存在强正向交互作用，交互作用导致的超额危险占比高而且对风险修饰明显。NO_2 在低温条件下 *RERI*=0.11（95%*CI*：0.06～0.15）、*AP*=0.10（95%*CI*：0.09～0.10）、*S*=1.11（95%*CI*：1.06～1.15），说明低温与 NO_2 暴露的联合作用显著增加健康风险。O_3 的交互模式呈现温度依赖性特征：低温时 *RR*=0.87（95% *CI*：0.80～0.94）、*RERI*=−0.17（95%*CI*：−0.24～−0.10）、*AP*=−0.20（95%*CI*：−0.20～−0.19）、*S*=0.84（95%*CI*：0.82～0.86），表明低温与 O_3 暴露存在显著负向交互，即联合暴露风险低于单独暴露风险之和；在高温场景下 *RR*=1.05（95%*CI*：1.03～1.08）、*RERI*=0.15（95%*CI*：0.05～0.25）、*AP*=0.14（95%*CI*：0.13～0.15）、*S*=1.16（95%*CI*：1.03～1.30），提示高温与 O_3 暴露存在正向交互作用。颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 在低温条件下的交互作用均表现为协同作用，PM_{10}*RERI*=0.06（95%*CI*：0.02～0.10）、*AP*=0.05（95%*CI*：0.05～0.06）、*S*=1.06，95%*CI*：1.02～1.10），$PM_{2.5}$ 在低温下 *RERI*=0.12（95% *CI*：0.07～0.18）、*AP*=0.11（95%*CI*：0.10～0.11）、*S*=1.12（95%*CI*：1.06～1.19），提示低温下颗粒物对呼吸系统的影响较为显著，表现出较强的协同效应。见图 3。



注：图 A、B、C、D、E、F 分别为 O_3、SO_2、NO_2、CO、PM_{25}、PM_{10} 与温度交互作用结果。

图 3　2016—2021 年西宁市温度与污染物交互作用对呼吸系统疾病门诊量的影响

Figure 3　Effect of interaction between temperature and pollutants on outpatient visits of respiratory diseases in Xining City from 2016 to 2021

表 3　2016—2021 年西宁市极端温度与污染物对居民呼吸系统疾病门诊风险的交互作用

Table 3　Interaction between extreme temperature and pollutants on outpatient risk of respiratory diseases in Xining City from 2016 to 2021

污染物	气温	暴露因素	*RR*	*RERI*	*AP*	*S*
CO	低温	RR_{01}	1.02 (0.98 ~ 1.06)	0.03 (–0.02 ~ 0.07)	0.02 (0.02 ~ 0.02)	1.02 (0.97 ~ 1.06)
		RR_{10}	1.03 (1.02 ~ 1.04)			
		RR_{11}	1.07 (1.05 ~ 1.09)			
	高温	RR_{01}	1.06 (1.03 ~ 1.08)	0.03 (–0.02 ~ 0.07)	0.03 (0.03 ~ 0.03)	1.03 (1.00 ~ 1.05)
		RR_{10}	1.03 (1.02 ~ 1.04)			
		RR_{11}	1.11 (1.07 ~ 1.15)			
SO_2	低温	RR_{01}	0.98 (0.94 ~ 1.02)	0.07 (0.03 ~ 0.10)	0.07 (0.06 ~ 0.07)	1.07 (1.03 ~ 1.12)
		RR_{10}	1.01 (1.00 ~ 1.02)			
		RR_{11}	1.06 (1.04 ~ 1.08)			
	高温	RR_{01}	1.06 (1.03 ~ 1.09)	0.01 (–0.03 ~ 0.04)	0.01 (0.01 ~ 0.01)	1.01 (1.00 ~ 1.04)
		RR_{10}	1.02 (1.01 ~ 1.03)			
		RR_{11}	1.08 (1.05 ~ 1.11)			
NO_2	低温	RR_{01}	0.95 (0.91 ~ 0.98)	0.11 (0.06 ~ 0.15)	0.10 (0.09 ~ 0.10)	1.11 (1.06 ~ 1.15)
		RR_{10}	1.05 (1.04 ~ 1.06)			
		RR_{11}	1.10 (1.08 ~ 1.13)			
	高温	RR_{01}	1.08 (1.05 ~ 1.10)	–0.03(–0.08 ~ 0.02)	–0.02 (–0.03 ~ –0.02)	0.98 (0.95 ~ 1.00)
		RR_{10}	1.06 (1.05 ~ 1.07)			
		RR_{11}	1.11 (1.06 ~ 1.16)			
O_3	低温	RR_{01}	1.04 (1.02 ~ 1.06)	–0.17 (–0.24 ~ –0.10)	–0.20 (–0.20 ~ –0.19)	0.84 (0.82 ~ 0.86)
		RR_{10}	0.99 (0.98 ~ 1.00)			
		RR_{11}	0.87 (0.80 ~ 0.94)			
	高温	RR_{01}	0.92 (0.83 ~ 1.02)	0.15 (0.05 ~ 0.25)	0.14(0.13 ~ 0.15)	1.16 (1.03 ~ 1.30)
		RR_{10}	0.98 (0.97 ~ 0.99)			
		RR_{11}	1.05 (1.03 ~ 1.08)			
PM_{10}	低温	RR_{01}	0.99 (0.96 ~ 1.03)	0.06 (0.02 ~ 0.10)	0.05 (0.05 ~ 0.06)	1.06 (1.02 ~ 1.10)
		RR_{10}	1.05 (1.04 ~ 1.06)			
		RR_{11}	1.10 (1.08 ~ 1.12)			
	高温	RR_{01}	1.06 (1.04 ~ 1.09)	0.03 (–0.02 ~ 0.08)	0.03 (0.02 ~ 0.03)	1.03 (1.00 ~ 1.05)
		RR_{10}	1.05 (1.04 ~ 1.06)			
		RR_{11}	1.14 (1.10 ~ 1.19)			
$PM_{2.5}$	低温	RR_{01}	0.93 (0.89 ~ 0.98)	0.12 (0.07 ~ 0.18)	0.11 (0.10 ~ 0.11)	1.12 (1.06 ~ 1.19)
		RR_{10}	1.03 (1.02 ~ 1.04)			
		RR_{11}	1.08 (1.06 ~ 1.10)			
	高温	RR_{01}	1.07 (1.05 ~ 1.09)	–0.04 (–0.10 ~ 0.01)	–0.04 (–0.04 ~ –0.04)	0.96 (0.94 ~ 0.98)
		RR_{10}	1.04 (1.02 ~ 1.05)			
		RR_{11}	1.06 (1.01 ~ 1.11)			

注：RR_{01} 为温度暴露；RR_{10} 为污染物暴露；RR_{11} 为联合暴露。

3　讨　论

本研究使用时间分层病例交叉研究分析空气污染物和气象因素对西宁市呼吸系统疾病门诊就诊的交互影响。研究揭示了西宁市空气污染物、气象因素与呼吸系统疾病门诊量之间的复杂关联。单污染模型结果表明，污染物 CO、O_3、SO_2、NO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 与呼吸系统疾病门诊就诊显著相关。同时使用二元响应面模型和分层分析揭示了气温与空气污染之间的相互作用。

在暴露反应关系中，研究结果符合环境健康研究的普遍规律。污染物 CO 与 NO_2 与国内多数研究结果一致[12-13]，均表现出随着污染物的浓度升高，直接加剧就诊风险，这可能归因于二者的毒性作用，尤其是 NO_2 对呼吸道上皮细胞的直接损伤[14-15]；污染物 SO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 呈现先上升后下降的倒“U”形曲线，表明在西宁市存在阈值效应，当污染物浓度超过一定水平后，可能触发居民防护行为或医疗资源的提前介入，从而降低后续风险。而 O_3 则表现出复杂性，其浓度与呼吸系统疾病就诊量之间呈现出非线性的“U”形曲线，对呼吸系统疾病就诊量的影响先下降后上升，浓度在第 87% 至第 97% 分位数呈现出保护因素，这一发现与 O_3 是一种有害空气污染物的认知相悖。而在京津冀[16]、湖北[17]与和田[18]的研究中均发现 O_3 作为一种保护性因素降低了呼吸系统疾病的发生与加重。另一方面，是由于强烈的季节混杂引起的，在研究期间高浓度 O_3 主要集中在夏季，而西宁市呼吸系统疾病如病毒性流感和慢阻肺的就诊高峰集中在秋冬季，而此时的 O_3 浓度处于全年最低水平。虽然已经对模型进行了时间混杂的调整，但残余的混杂可能依然存在。因此在未来的研究中需要使用更加精细化的暴露评估和模型来分离这种复杂的季节效应。

在交互作用研究结果显示，与温度负相关的污染物 SO_2、NO_2 和颗粒物在低温条件下协同效应显著增强，这与西宁市冬季气温低、逆温现象频繁[19]、使污染物更易滞留和富集，同时冬季采暖需求上升导致污染源排放增加，在双重作用背景下使居民暴露在更高浓度的环境中[20]。此外低温会削弱呼吸道的黏膜屏障功能，使污染物更易穿透呼吸道深层，触发炎症反应。在这些因素的共同作用下，导致低温与污染物复合暴露对就诊风险的提升更为显著。而在高温条件下仅 O_3 表现协同效应，主要是 O_3 的生成依赖高温与强紫外线，在高温期间，太阳辐射强，促进光化学反应，使 O_3 浓度增高，高 O_3 暴露直接刺激呼吸道上皮细胞，引发氧化应激和炎症反应，增加就诊风险[21]。

综上所述，暴露于 CO、O_3、SO_2、NO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 会增加西宁市居民呼吸系统疾病就诊风险并存在滞后效应。在交互作用中，SO_2、NO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 与低温之间存在协同作用。O_3 与高温存在协同作用，反之在低温时拮抗。综上所述，本研究为西宁市制定基于温度与污染交互作用的呼吸系统疾病防控策略提供了科学依据，未来需加强多部门协同，优化能源结构，完善空气污染预警体系，并针对不同季节的环境特征开展精准干预，以降低居民呼吸系统疾病负担。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Lu C, Liu Q, Deng MM, et al. Interaction of high temperature and NO_2 exposure on asthma risk: In vivo experimental evidence of inflammation and oxidative stress [J]. Science of the Total Environment, 2023, 869: 161760.

[2] Pawankar R, Wang JY, Wang IJ, et al. Asia pacific association of allergy asthma and clinical immunology White Paper 2020 on climate change, air pollution, and biodiversity in Asia-Pacific and impact on allergic diseases[J]. Asia Pacific Allergy, 2020, 10(1): e11.

[3] Huang CH, Lin HC, Tsai CD, et al. The interaction effects of meteorological factors and air pollution on the development of acute coronary syndrome[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44004.

[4] Niu ZC, Qi YJ, Zhao PQ, et al. Short-term effects of ambient air pollution and meteorological factors on tuberculosis in semi-arid area, northwest China: a case study in Lanzhou [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28 (48): 69190-69199.

[5] Borge R, Requia WJ, Yag ü e C, et al. Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993-2017] [J]. Environment International, 2019, 133 (Pt B): 105272.

[6] Carracedo-Martínez E, Taracido M, Tobias A, et al. Case-crossover analysis of air pollution health effects: a systematic review of methodology and application [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(8): 1173-1182.

[7] Wei YG, Wang Y, Di Q, et al. Short term exposure to fine particulate matter and hospital admission risks and costs in the Medicare population: time stratified, case crossover study [J]. BMJ (Clinical Research ed.), 2019, 367: l6258.

[8] 杜茜茜，丁一珊，陈思源，等. 基于寿命损失年的石家庄市空气质量健康指数构建 [J]. 中华疾病控制杂志，2025，29(3)：324-331.
Du QQ, Ding YS, Chen SY, et al. Construction of air quality health index based on years of Life lost in Shijiazhuang [J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2025, 29(3): 324-331.(In Chinese)

[9] Qin RX, Xiao CC, Zhu YB, et al. The interactive effects between high temperature and air pollution on mortality: A time-series analysis in Hefei, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1530-1537.

[10] Correia K, Williams PL. Estimating the relative excess risk due to interaction in Clustered-Data settings [J]. American Journal of Epidemiology, 2018, 187(11): 2470-2480.

[11] Knol MJ, VanderWeele TJ, Groenwold RHH, et al. Estimating measures of interaction on an additive scale for preventive exposures

[J]. European Journal of Epidemiology, 2011, 26(6): 433–438.

[12] 杜娟,唐应萍,何平,等. 贵阳市空气污染物对呼吸系统疾病门诊量的短期效应[J]. 环境与职业医学,2024,41(1):62–69.
Du J, Tang YP, He P, et al. Short–term effects of air pollutants on outpatient volume of respiratory diseases in Guiyang [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41 (1): 62–69.(In Chinese)

[13] 赵海莉,原悦,李晓芹,等. 兰州市西固区大气污染对呼吸系统的健康效应[J]. 生态学报,2022,42(11):4603–4616.
Zhao HL, Yuan Y, Li XQ, et al. Health effects of air pollution on respiratory system in Xigu District of Lanzhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4603–4616.(In Chinese)

[14] Kahnert K, Lucke T, Biertz F, et al. Transfer factor for Carbon monoxide in patients with COPD and diabetes: results from the German COSYCONET cohort[J]. Respiratory Research, 2017, 18(1): 14.

[15] 蒋艳,肖芳. 空气污染物二氧化氮对机体健康影响的研究进展[J]. 卫生研究,2024,53(3):512–518.
Jiang Y, Xiao F. Research progress on the effects of air pollutant nitrogen dioxide on body health [J]. Journal of Hygiene Research, 2024, 53(3): 512–518.(In Chinese)

[16] Feng YQ, Wei J, Hu MG, et al. Lagged effects of exposure to air pollutants on the risk of pulmonary tuberculosis in a highly polluted region [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(9): 5752.

[17] 刘军,李欢,张仕玉,等. 湖北省新型冠状病毒肺炎患者发生重型、危重型的影响因素 [J]. 山东大学学报: 医学版,2020,58(10):60–65.
Liu J, Li H, Zhang SY, et al. Risk factors of severe and critical patients with COVID–19 in Hubei, China [J]. Journal of Shandong University: Health Sciences, 2020, 58(10): 60–65.(In Chinese)

[18] 王俊安,王森路,刘年强,等. 2015–2023 年和田地区大气污染物和气象因素对肺结核发病的影响 [J]. 热带医学杂志,2025,25(4):537–544.
Wang JA, Wang SL, Liu NQ, et al. The impact of atmospheric pollutants and meteorological factors on the incidence of tuberculosis in the Hotan region from 2015 to 2023 [J]. Journal of Tropical Medicine, 2025, 25(4): 537–544.(In Chinese)

[19] 何永晴,赵玉成,冯蜀青. 西宁市逆温特征及其与空气污染物浓度的相关分析[J]. 冰川冻土,2014,36(3):608–613.
He YQ, Zhao YC, Feng SQ. Temperature inversion in Xining City: Characteristics and correlation with air pollutant concentrations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36 (3): 608–613.(In Chinese)

[20] 付桂琴,田亚芹,张成伟. 气温与臭氧协同作用对 COPD 住院人数的影响[J]. 中国环境科学,2019,39(12):5312–5318.
Fu GQ, Tian YQ, Zhang CW. Synergistic effect of temperature and O3 on the numbers of COPD hospitalizations [J]. China Environmental Science, 2019, 39(12): 5312–5318.(In Chinese)

[21] 周骥,付世华,彭丽,等. 臭氧和 PM2.5 对慢阻肺死亡影响及气温修饰效应[J]. 中国环境科学,2021,41(12):5904–5911.
Zhou J, Fu SH, Peng L, et al. Effect of ozone and PM2.5 on chronic obstructive pulmonary disease deaths and the effect modification by the air temperature [J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5904–5911.(In Chinese)

收稿日期:2025–06–12

(上接第 4268 页)

展[J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志,2025,43(1):6–13.
Liu BX, Kuai Y, Xue CZ, et al. Progress of the National echinococcosis control programme in China,2023[J]. Chinese Journal of Parasitology and Parasitic Diseases, 2025, 43 (1): 6–13. (In Chinese)

[21] 杨柳,何伟,王奇,等. 降低流浪犬密度对小型哺乳类动物棘球蚴感染情况的影响 [J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志,2021,39(2):156–160, 165.
Yang L, He W, Wang Q, et al. The impact of reducing stray dog density on the prevalence of Echinococcus spp.in small mammals[J]. Chinese Journal of Parasitology and Parasitic Diseases, 2021, 39(2): 156–160, 165.(In Chinese)

[22] 廖沙,王奇,杨柳,等. 2020 年四川省包虫病监测结果分析[J]. 预防医学情报杂志,2021,37(12):1641–1647.
Liao S, Wang Q, Yang L, et al. Analysis of surveillance results of echinococcosis in Sichuan 2020 [J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2021, 37(12): 1641–1647.(In Chinese)

[23] 廖沙,张仲双,杨柳,等. 2021–2023 年四川省棘球蚴病监测结果分析[J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志,2025,43(1):14–19.
Liao S, Zhang ZS, Yang L, et al. Surveillance of echinococcosis in Sichuan Province from 2021 to 2023 [J]. Chinese Journal of Parasitology and Parasitic Diseases, 2025, 43(1): 14–19.(In Chinese)

[24] Wang Q, Yu WJ, Zhong B, et al. Seasonal pattern of Echinococcus re–infection in owned dogs in Tibetan communities of Sichuan, China and its implications for control [J]. Infectious Diseases of Poverty, 2016, 5(4): 64–71.

收稿日期:2025–07–13