

陈玲,程路,王雁,等. 汾渭平原夏季近地面臭氧统计预报方法[J]. 陕西气象,2022(5):35-41.

文章编号:1006-4354(2022)05-0035-07

汾渭平原夏季近地面臭氧统计预报方法

陈玲^{1,2},程路³,王雁¹,郭伟¹,汪文雅¹,李明明¹,陈二萍¹

(1. 山西省气象科学研究所,太原 030002;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710014;

3. 陕西省气候中心,西安 710014)

摘要:运用2017—2020年5—8月城市空气质量数据和地面气象数据,筛选出对 O_3 日最大8h滑动平均质量浓度(以下用 $C_{8h}(O_3)$ 表示)影响较大的气象因子,建立了近地面 $C_{8h}(O_3)$ 主要气象条件判定标准——高质量浓度 O_3 潜势指数(I_{HPP}),进一步拟合得到汾渭平原夏季 $C_{8h}(O_3)$ 多元逐步回归预报方程,并进行效果检验。结果表明:汾渭平原 I_{HPP} 由日最高气温(T_{max})、日均相对湿度(H_R)、日照时数(t)、日主导风向(W_D)和降水量(P)5个气象因子构成,其值介于-1~6之间,值越大则该日近地面 O_3 超标可能性越大;经检验, $C_{8h}(O_3)$ 多元逐步回归方程预报结果与实况较吻合,汾河平原(特别是运城)预报效果总体较好,临汾、吕梁和西安等级预报效果有待改进;预报检验时段咸阳和晋中等级预报准确率较国家气象中心的指导预报分别上升7.9%和28.9%,说明预报方程具有一定的业务应用可行性。

关键词:汾渭平原;臭氧;气象因子;预报

中图分类号:X515:P457

文献标识码:A

臭氧(O_3)是大气中重要的痕量气体^[1],对流层大气中的臭氧占总量10%左右,对流层中较高质量浓度的 O_3 对人体健康、农业生产和生态环境均有重要影响^[2-5]。与其他气态污染物相比, O_3 在对流层中的寿命较长,可进行长距离的跨区域传输^[6],因此, O_3 成为国际大气科学研究领域的热点问题之一。

对流层 O_3 的质量浓度是平流层向下输送、对流层局地光化学过程和区域输送共同作用的结果^[7-8]。近地层 O_3 主要由其前体物,如 NO_x 、CO以及挥发性有机物(VOCs)等,在一定的气象条件下通过复杂的光化学反应生成,且 NO_x 、CO以及VOCs等对 O_3 的生成具有不同的作用^[9-11],不同气象因子在不同地区作用大小亦有差异。局地 O_3 质量浓度高低除了与光化学反应有关,还与天气系统和气象条件等有着密切联系^[12-14]。近地面

高质量浓度 O_3 是大气光化学烟雾的主要标识物,近年来随着经济发展、人口激增以及机动车保有量增加, O_3 污染愈发严重,我国多地频繁观测到光化学烟雾污染的现象^[15-16], O_3 污染问题引起了高度关注。

对流层中 O_3 生消的光化学反应,以及 O_3 与大气颗粒物之间的关系十分复杂^[9, 17-18],且受气象条件影响很大,因而 O_3 预报技术难度较大,提高 O_3 预报的准确率是目前亟待解决的问题,并且已经愈加引起重视。 O_3 污染研究多集中于华北^[19-20]、长三角^[12]、珠三角^[21]地区,汾渭平原作为全国 O_3 污染最严重的区域之一,夏季高质量浓度 O_3 污染治理面临的挑战愈发严峻,目前针对于该区域的研究也多集中于大气颗粒物^[22-23], O_3 分析仅局限于少数城市^[24], O_3 预报的相关研究也较缺乏。当前应用较多的 O_3 预报方法有天气分

收稿日期:2021-11-02

作者简介:陈玲(1988—),女,新疆哈密人,硕士,工程师,研究方向为大气环境与大气遥感。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2020G-24)

型^[25]、综合气象条件评分^[26]、建立回归方程^[27]等。鉴于回归方程可以定量进行 O₃ 质量浓度预报,因此本文旨在结合气象数据,拟合出简洁高效、便于实际预报业务应用的汾渭平原夏季近地面 O₃ 质量浓度预报方程,并进行效果检验,以期提升夏季 O₃ 预报准确率,并为该区域 O₃ 污染防治提供参考。

1 资料与方法

城市空气质量数据源自汾渭平原环境气象中心数据共享平台,地面气象数据选取距离各城市环境监测站点最近的 11 个气象站点。因每年 5 月近地面 O₃ 质量浓度已较高,实际业务工作中已需重点考虑该月份的 O₃ 预报,基于此,本文研究时段为 2017—2020 年的 5—8 月。研究区域汾渭平原地形如图 1 所示。

按照国家环境空气质量评价标准和规范^[28-30],O₃ 日评价指标为 O₃ 日最大 8 h 滑动平均质量浓度(以下用 C_{8h}(O₃)表示),城市每日的 C_{8h}(O₃)为该城市每个监测点 C_{8h}(O₃)的算术平均值,其值大于 160 μg/m³则说明该日 O₃ 质量浓度超标;城市 O₃ 年度评价的判定为 C_{8h}(O₃)第 90 百分位质量浓度,其值大于 160 μg/m³则表示城市该年 O₃ 超标。

首先建立 C_{8h}(O₃)多元逐步回归预报方程,并对预报结果与实况的吻合程度进行定量统计检验,包括正态平均偏差(normalized mean bias, NMB,用 B_{NM}表示)、正态平均误差(normalized mean error, NME,用 E_{NM}表示)和均方根误差(root mean square error, RMSE,用 E_{RMS}表示),详细计算方法见式(1)~式(3),其中,C_f和 C_o分别表示 C_{8h}(O₃)的预报值和实况值。此外,实际业务中按 C_{8h}(O₃)预报结果计算相应的 AQI 等级 L_{Cf},与实况 C_{8h}(O₃)等级 L_{Co}对比评价预报结果,进一步给出等级预报准确率(forecast accuracy, FA,用 A_F表示)检验,计算方法见式(4)。

$$B_{NM} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{fi} - C_{oi})}{\sum_{i=1}^N C_{oi}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$E_{NM} = \frac{\sum_{i=1}^N |C_{fi} - C_{oi}|}{\sum_{i=1}^N C_{oi}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{fi} - C_{oi})^2}{N}} \quad (3)$$

$$A_F = \frac{\sum_{i=1}^N A_{Fi}}{N} \times 100\%。 \quad (\text{若 } LC_f = LC_o, A_{Fi} = 1; \text{否则 } A_{Fi} = 0) \quad (4)$$

式中 N 为样本数。

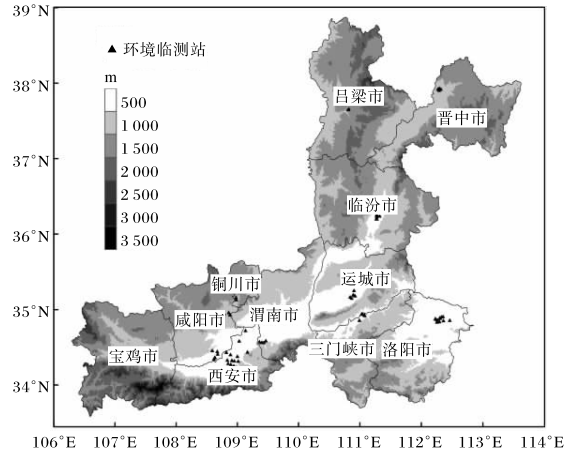


图 1 汾渭平原地形图(实心三角为环境监测站;审图号为 GS(2020)4634 号)

2 汾渭平原夏季近地面 O₃ 预报

2.1 近地面高质量浓度 O₃ 潜势指数判定标准

对汾渭平原 11 个城市 5—8 月近地面的日均气温(T_{ave})、日最高气温(T_{max})、日均相对湿度(H_R)、日总降水量(P)、日照时数(t)、日主导风向(W_D)、日平均风速(W_S)、O₃ 质量浓度最高时段 11—20 时的主导风向(W_{D11-20})、11—20 时平均风速(W_{S11-20})等要素与 O₃ 超标日数进行相关性分析,其中因 C_{8h}(O₃)的计算基本源自 O₃ 质量浓度最高时段 11—20 时的部分时次,除了风的日均状态,该时段内风向、风速可能对 C_{8h}(O₃)的结果产生较大影响,所以进一步加入了 11—20 时的主导风向和平均风速作为影响因子。根据上述气象因子与 C_{8h}(O₃)的相关性大小,以及同一要素(如 T_{ave} 、 T_{max})不重复的标准,筛选出对 C_{8h}(O₃)影响较大的 5 个气象因子,建立近地面高质量浓度 O₃ 日主要气象条件判定标准——高质量浓度 O₃ 潜势指数(HPPI,用 I_{HPP} 表示)。以某一气象因子超过一定阈值时 O₃ 超标日数大幅上升为标准,分别给出各气象因子对应的 I_{HPP} 分指数($I_1 \sim I_5$)阈值^[26-27]。 I_{HPP} 的计算方法见式(5)。

$$I_{\text{HPP}} = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (5)$$

式(5)中, $i=1, 2, \dots, 5; n=5$ 。 I_{HPP} 越大, 说明该日近地面 O_3 超标可能性越大。各城市 I_{HPP} 判定标准详见表 1。

由表 1 可知, 汾渭平原 I_{HPP} 主要由对 $C_{8\text{h}}(\text{O}_3)$ 影响较大的 T_{max} 、 H_{R} 、 t 、 W_{D} 和 P 共 5 个气象因子

构成, 各个城市 I_{HPP} 介于 $-1 \sim 6$ 之间。 T_{max} 、 H_{R} 和 P 对各个城市影响差异不大, 三者 I_{HPP} 分指数判定阈值在各个城市取值相同, 其中 $30 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{\text{max}} < 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $I_1 = 1$, $T_{\text{max}} \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $I_1 = 2$; $H_{\text{R}} < 60\%$ 时, $I_2 = 1$; $P < 1$ 时, $I_5 = 1$ 。 t 和 W_{D} 在不同城市对 $C_{8\text{h}}(\text{O}_3)$ 的影响不同, I_{HPP} 分指数判定阈值各城市差异明显。

表 1 汾渭平原各城市高质量浓度 O_3 潜势指数 (I_{HPP}) 判定标准

城市	t/h		$W_{\text{D}}/(\text{ }^\circ)$		I_{HPP}
	阈值	I_3	阈值	I_4	
西安	$t > 10$	1	$45 \leq W_{\text{D}} \leq 67.5$	1	$-1 \sim 6$
			$247.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360, W_{\text{D}} = 135$	-1	
宝鸡	$t > 9$	1	$90 \leq W_{\text{D}} \leq 112.5$	1	$-1 \sim 6$
			$180 \leq W_{\text{D}} \leq 360, 22.5 \leq W_{\text{D}} \leq 67.5$	-1	
咸阳	$t > 10$	1	$45 \leq W_{\text{D}} \leq 112.5$	1	$-1 \sim 6$
			$202.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360, W_{\text{D}} = 22.5, 157.5$	-1	
铜川	$t > 10$	1	$112.5 \leq W_{\text{D}} \leq 135, W_{\text{D}} = 180$	1	$-1 \sim 6$
			$247.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360, 22.5 \leq W_{\text{D}} \leq 45$	-1	
渭南	$t > 10$	1	$22.5 \leq W_{\text{D}} \leq 67.5$	1	$-1 \sim 6$
			$90 \leq W_{\text{D}} \leq 157.5, 225 \leq W_{\text{D}} \leq 247.5, 315 \leq W_{\text{D}} \leq 337.5$	-1	
洛阳	$t > 9$	1	$45 \leq W_{\text{D}} \leq 67.5$	1	$-1 \sim 6$
			$247.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360$	-1	
三门峡	$t > 10$	1	$67.5 \leq W_{\text{D}} \leq 90$	1	$-1 \sim 6$
			$135 \leq W_{\text{D}} \leq 225, 337.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360$	-1	
吕梁	$t > 9$	1	$225 \leq W_{\text{D}} \leq 247.5, W_{\text{D}} = 157.5$	1	$-1 \sim 6$
			$292.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360, W_{\text{D}} = 67.5, 112.5$	-1	
晋中	$t > 9$	1	$202.5 \leq W_{\text{D}} \leq 225, W_{\text{D}} = 67.5$	1	$-1 \sim 6$
			$112.5 \leq W_{\text{D}} \leq 135, 270 \leq W_{\text{D}} \leq 360, W_{\text{D}} = 22.5$	-1	
临汾	$t > 8$	1	$W_{\text{D}} = 180, 225$	1	$-1 \sim 6$
			$45 \leq W_{\text{D}} \leq 135, 337.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360$	-1	
运城	$t > 10$	1	$157.5 \leq W_{\text{D}} \leq 180, W_{\text{D}} = 270$	1	$-1 \sim 6$
			$90 \leq W_{\text{D}} \leq 112.5, 337.5 \leq W_{\text{D}} \leq 360, W_{\text{D}} = 22.5, 202.5, 292.5$	-1	

注: 所有城市, T_{max} 阈值在 $30 \sim < 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, I_1 取 1, 在 $T_{\text{max}} \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, I_1 取 2; H_{R} 阈值 $< 60\%$, I_2 取 1; P 阈值 $< 1 \text{ mm}$, I_5 取 1。

2.2 近地面 O_3 预报方程

采用多元逐步回归方法, 引入 2017—2020 年 5—8 月的 T_{ave} 、 T_{max} 、 H_{R} 、 P 、 t 、 W_{D} 、 W_{S} 、 $W_{\text{D}11-20}$ (11—20 时主导风向)、 $W_{\text{S}11-20}$ (11—20 时平均风

速)、 I_{HPP} , 以及前一天 $C_{8\text{h}}(\text{O}_3)$ 即 $C_{8\text{h}}(\text{O}_3)_{d-1}$, 共 9 个气象因子、 I_{HPP} 和 1 个背景 O_3 质量浓度因子, 建立多元逐步回归方程, 预报夏季 O_3 质量浓度。因实际业务工作中 O_3 预报量为 $C_{8\text{h}}(\text{O}_3)$, 所以本文

预报结果均指 $C_{8h}(O_3)$ 。考虑到 2020 年受新冠疫情及人为减排影响, O_3 前体物质量浓度较前 3 年背景值有所改变, 分别选取 2019 年 7 月及 2020 年 7 月用作预报检验, 不参与回归方程的建

立, 以增强预报结果的可信度和可用性。

汾渭平原 11 个城市 $C_{8h}(O_3)$ 多元逐步回归预报方程常数和预报因子系数见表 2, 各城市 R^2 介于 0.38~0.63 之间。

表 2 汾渭平原各城市 $C_{8h}(O_3)$ 多元逐步回归预报方程常数和各气象因子系数

城市	常数	$C_{8h}(O_3)_{d-1}$	I_{HPP}	T_{max}	T_{ave}	t	W_D	W_S	W_{D11-20}	W_{S11-20}	H_R	P	R^2
西安	13.98	0.36	—	2.64	—	2.80	—	-10.79	—	—	—	—	0.63
宝鸡	56.80	0.36	—	1.61	—	—	—	—	-0.10	7.12	-0.43	—	0.52
咸阳	71.06	0.29	4.57	2.13	—	—	-0.05	-9.28	—	—	-0.41	—	0.54
铜川	31.94	0.38	3.82	5.03	-4.15	—	—	—	-0.04	—	—	—	0.45
渭南	13.95	0.21	7.47	8.11	-6.19	-1.78	—	—	—	—	—	—	0.48
洛阳	43.28	0.37	7.19	1.66	—	—	—	-0.04	—	-4.12	—	-0.50	0.49
三门峡	64.50	0.37	—	1.86	—	—	—	—	-0.04	—	-0.42	—	0.41
吕梁	12.93	0.37	3.92	1.96	—	—	—	—	—	—	—	-0.43	0.38
晋中	2.68	0.45	5.06	4.63	-2.76	—	—	—	—	-2.28	—	—	0.53
临汾	54.57	0.34	6.74	2.02	—	—	—	-12.58	—	—	-0.31	—	0.50
运城	76.47	0.47	3.22	1.55	—	—	-0.05	-9.03	—	—	-0.47	—	0.58

注：“—”表示回归方程中无该项。

汾渭平原 11 个城市预报效果检验见表 3。从各检验指标看, 各市 B_{NM} 介于 -1.09% ~ 5.18% 之间, 其中吕梁仅 0.29% , 宝鸡较大; 各市 E_{NM} 介于 7.63% ~ 18.85% 之间, 运城、晋中和临汾较小, 宝鸡、咸阳和铜川略大; 各市 E_{RMS} 介于 20.29 ~ 31.62 之间, 运城最小, 吕梁、咸阳、西安和临汾较大; 从等级预报准确率来看, 各市 A_F 介于 50.00% ~ 82.22% 之间, 运城明显高于其余 10 个城市, 三门峡和宝鸡亦较高, 临汾、吕梁、铜川和西安相对较低。 A_F 检验比较简单地将不同 O_3 质量浓度范围值分为一组评分, 但跨等级附近的 $C_{8h}(O_3)$ 准确率以 A_F 评价效果较差, 因而 A_F 用作实际业务评价简便易行, 但客观程度稍逊于 E_{RMS} 。

综合上述 4 个检验值, 汾渭平原 11 个城市预报值与实况值总体差异较小, 说明预报方程可较好地反映实况 $C_{8h}(O_3)$, 汾河平原 4 个城市预报效果总体优于渭河平原, 其中运城预报效果最好, 临汾、吕梁和西安等级预报效果有待改进。吕梁预报等级预报准确率较低可能是由于该地区大气

相对清洁, O_3 质量浓度相对较低, 与气象因子的关系不及汾渭平原其他城市明显。

表 3 汾渭平原各城市预报效果检验

城市	$B_{NM}/\%$	$E_{NM}/\%$	$E_{RMS}/(\mu g/m^3)$	$A_F/\%$
西安	4.93	14.55	30.36	58.18
宝鸡	5.18	18.85	28.02	71.43
咸阳	3.94	15.69	30.63	66.04
铜川	1.85	15.36	28.99	53.57
渭南	2.19	13.91	26.89	66.67
洛阳	4.57	12.24	29.38	61.29
三门峡	-1.09	9.04	22.19	75.00
吕梁	0.29	14.40	31.62	51.72
晋中	-0.87	8.36	27.16	65.38
临汾	0.33	8.82	30.31	50.00
运城	1.62	7.63	20.29	82.22

综合表 2 来看, 西安、咸阳、临汾、运城和宝鸡 $C_{8h}(O_3)$ 受风的影响明显, 说明上述地区外部输送或扩散作用对于局地 O_3 质量浓度影响较明显。

此外,有的城市预报方程 R^2 较大,但等级预报效果欠佳,如西安和临汾,说明一方面预报方程可较好地反映预报时段 O_3 质量浓度的变化,另一方面,可能与上述地区 O_3 质量浓度受其前体物影响相对显著有关^[31-32]。

为更直观地了解预报效果,分别以预报方程 R^2 相近的位于渭河平原的咸阳、位于汾河平原的晋中为例,给出了2019年7月和2020年7月实况、多元逐步回归方程预报、相应国家气象中心下发的指导预报产品(以下简称“国家指导预报”)的

$C_{8h}(O_3)$ 逐日对比,结果如图2所示(其中部分日期因国家指导预报缺失,数据处理时已剔除,未纳入检验)。由图2可看出,多元逐步回归方程预报的 $C_{8h}(O_3)$ 比国家指导预报更接近于实况值,可较好地拟合 $C_{8h}(O_3)$ 的变化趋势和质量浓度。预报检验时段咸阳和晋中等级预报准确率分别比国家指导预报上升 7.9% 和 28.9%,预报效果提升较显著,说明相对基于多模式集合预报的国家指导预报,本文的统计预报方程可一定程度提升预报水平,具有一定的业务应用可行性。

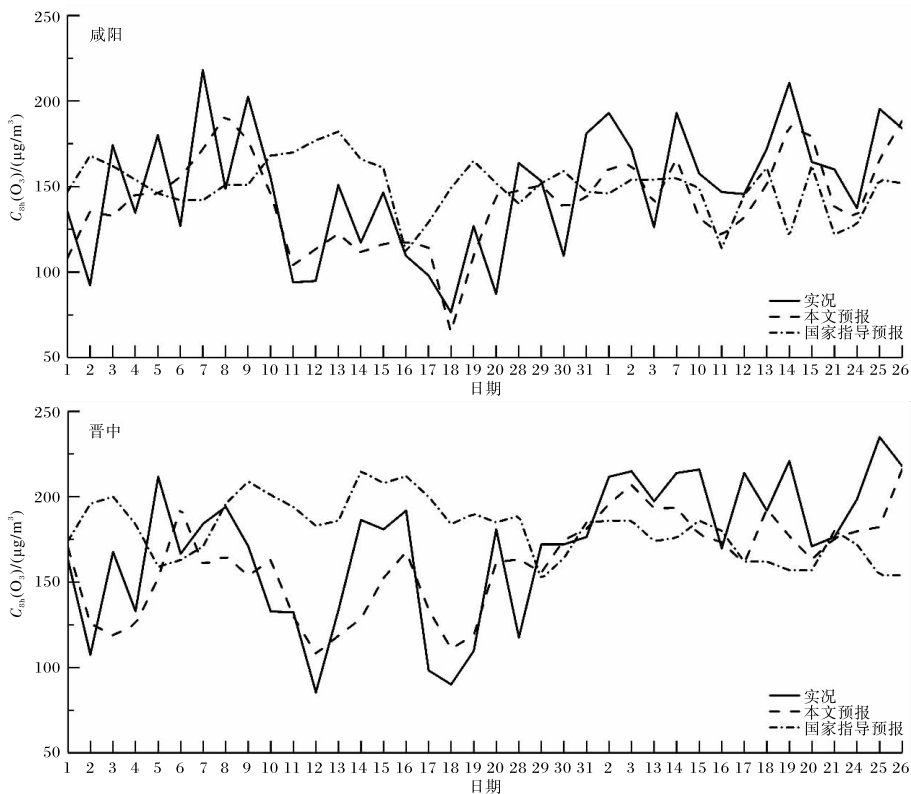


图2 2019年7月和2020年7月咸阳、晋中 $C_{8h}(O_3)$ 实况、预报、国家指导预报对比

临汾、吕梁、铜川和西安等级预报效果欠佳,可能与上述地区局地 O_3 质量浓度受其前体物影响较大有关,预报中需要因地制宜考虑局地 O_3 前体物排放情况而做出相应的调整。另外,输送作用对于局地 O_3 质量浓度有重要影响,但本文预报方程仅考虑了近地面水平风向和风速,无法较完整地表述水平输送、垂直混合以及平流层向下输送作用的综合影响。

3 结论

运用2017—2020年5—8月城市空气质量数

据和地面气象数据,筛选出对 $C_{8h}(O_3)$ 影响较大的气象因子,建立了汾渭平原近地面 $C_{8h}(O_3)$ 主要气象条件判定标准——高质量浓度 O_3 潜势指数 (I_{HPP}),进一步拟合得到汾渭平原夏季 O_3 多元逐步回归预报方程,并进行效果检验,得出以下结论。

(1) 汾渭平原 I_{HPP} 主要由对 $C_{8h}(O_3)$ 影响较大的日最高气温 (T_{max})、日均相对湿度 (H_R)、日照时数 (t)、日主导风向 (W_D) 和降水量 (P) 5 个气象因子构成,其值介于 $-1 \sim 6$ 之间, I_{HPP} 越大则该

日近地面 O_3 超标可能性越大。

(2) 汾渭平原夏季 $C_{8h}(O_3)$ 多元逐步回归预报方程主要由 T_{ave} 、 T_{max} 、 H_R 、 t 、 P 、 W_D 、 W_S 、 W_{D11-20} 、 W_{S11-20} 、 $C_{8h}(O_3)_{d-1}$ 和 I_{HPP} 构成。经检验发现, 预报结果可较好地与实况 $C_{8h}(O_3)$ 相吻合, 汾河平原 4 个城市预报效果总体优于渭河平原, 其中运城预报效果最好, 临汾、吕梁和西安等级预报效果有待改进。

(3) 预报检验时段咸阳和晋中等级预报准确率相较国家指导预报分别上升 7.9% 和 28.9%, 预报效果提升较显著, 说明所得预报方程具有一定的业务应用可行性。

参考文献:

- [1] 盛裴轩, 毛节秦, 李建国, 等. 大气物理学 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 6.
- [2] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 603-608.
- [3] 贾龙, 葛茂发, 徐永福, 等. 大气臭氧化学研究进展 [J]. 化学进展, 2006, 18(11): 1565-1574.
- [4] 唐孝炎. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 60-70.
- [5] 王体健, 孙照渤. 臭氧变化及其气候效应的研究进展 [J]. 地球科学进展, 1999, 14(1): 37-43.
- [6] FIORE A M, DENTENER F J, WILD O, et al. Multimodel estimates of intercontinental source-receptor relationships for ozone pollution [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114 (D4): 1-24.
- [7] LU X, ZHANG L, SHEN L. Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns [J]. Current Pollution Reports, 2019, 5: 238-260.
- [8] XUE L K, WANG T, GAO J, et al. Ground-level ozone in four Chinese cities: Precursors, regional transport and heterogeneous processes [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14: 13175-13188.
- [9] WANG W, VAN DER A R, DING J, et al. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21: 7253-7269.
- [10] ZOU Y, DENG X J, ZHU D, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NOx and O_3 at a suburban site in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2015, 15 (12): 6625-6636.
- [11] 安俊琳, 李昕, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气 O_3 , NOx 和 CO 浓度变化的观测实验 [J]. 环境科学, 2003, 24(6): 43-47.
- [12] SHU L, XIE M, WANG T J, et al. Integrated studies of a regional ozone pollution synthetically affected by subtropical high and typhoon system in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16: 15801-15819.
- [13] JIANG Z J, LI J, LU X, et al. Impact of western Pacific subtropical high on ozone pollution over eastern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21: 2601-2613.
- [14] GAO D, XIE M, LIU J, et al. Ozone variability induced by synoptic weather patterns in warm seasons of 2014-2018 over the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21: 5847-5864.
- [15] LI J, LU K, LV W, et al. Fast increasing of surface ozone concentrations in Pearl River Delta characterized by a regional air quality monitoring network during 2006-2011 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 14(1): 23-36.
- [16] LI K, JACOB D J, SHEN L, et al. Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20: 11423-11433.
- [17] LU K D, ROHRER F, HOLLAND F, et al. Nighttime observation and chemistry of HOx in the Pearl River Delta and Beijing in summer 2006 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14: 4979-4999.
- [18] QU Y W, WANG T J, CAI Y F, et al. Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: Observational study and mechanistic analysis [J]. Advances in Atmospheric Sciences,

- 2018, 35: 1381-1395.
- [19] 王占山,李云婷,陈添,等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3001-3008.
- [20] MA X, HUANG J, ZHAO T, et al. Rapid increase in summer surface ozone over the North China Plain during 2013-2019: a side effect of particulate matter reduction control? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21: 1-16.
- [21] 刘建,吴兑,范绍佳,等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 813-820.
- [22] 蔡惠文,吕恩奇,陈欣昊,等. 高陵区 PM_{2.5} 污染特征及其与气象要素的关系研究[J]. 陕西气象, 2021(5): 42-46.
- [23] 王红军,何晓媛,苏静,等. 关中区域主要大气污染物时空分布特征分析[J]. 陕西气象, 2020(3): 26-30.
- [24] 卢娣,董自鹏,曹慧萍,等. 西安市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 陕西气象, 2020(1): 14-19.
- [25] 常炉予,许建明,瞿元昊,等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 169-179.
- [26] 梁碧玲,张丽,赖鑫,等. 深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 66-71.
- [27] 谈建国,陆国良,耿福海,等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 515-520.
- [28] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准:GB 3095-2012[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [29] 环境保护部. 环境空气质量评价技术规范(试行):HJ 663-2013[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2013.
- [30] 环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ 633-2012[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [31] GEORGOULIAS A K, VAN DER A R J, STAMMES P, et al. Trends and trend reversal detection in 2 decades of tropospheric NO₂ satellite observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 6269-6294.
- [32] FAN C, LI Z, LI Y, et al. Variability of NO₂ concentrations over China and effect on air quality derived from satellite and ground-based observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21: 7723-7748.