

空气污染对信鸽比赛个体归巢速度的影响

于丛^① 游章强^{②*} 万月^① 李忠秋^{①*}

^① 南京大学生命科学院动物行为与保护实验室 南京 210023;

^② 绵阳师范学院生态安全与保护四川省重点实验室 绵阳 621000

摘要: 空气污染作为一种有害的环境因素, 对人类及动物的生理、心理均有影响。在鸟类中, 信鸽 (*Columba livia*) 是研究空气污染影响的理想模型。为探究空气污染的行为学效应, 通过收集并筛选 2018 和 2019 年成都市信鸽协会春秋两个季节举办的 64 场赛事共 285 羽参赛 5 场及以上的信鸽不同空距等级下的归巢速度, 利用混合线性模型分析了 6 种大气污染物 (CO、NO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂) 及气温、季节、天气等环境因子对信鸽归巢速度的影响。结果表明, PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 浓度与归巢速度间有显著正相关关系, 即这些空气污染物浓度越高, 信鸽归巢速度越快; 而 CO 浓度与归巢速度显著负相关, 即 CO 浓度越高, 信鸽归巢速度越慢。通过模型评估及比较, 发现 O₃ 模型是归巢速度的最佳拟合模型, 其次是 NO₂ 模型。本研究表明, 信鸽的归巢速度的确受到空气污染的影响, 但潜在的影响机制如归巢动机假说和嗅觉强化假说仍需进一步研究。

关键词: 信鸽比赛; 空气污染; 混合线性模型; 归巢速度

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2021) 01-008-08

Effects of Air Pollution on Individual Performance in Homing Pigeon

YU Cong^① YOU Zhang-Qiang^{②*} WAN Yue^① LI Zhong-Qiu^{①*}

^① *Lab of Animal Behavior & Conservation, School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023;*

^② *Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China*

Abstract: As a harmful environmental factor, air pollution has negative effects on human beings and animals both physically and psychologically. Homing pigeons (*Columba livia*) are ideal models for studying the pollution effects on birds. In order to explore the impact of air pollution on animals, we used a mixed linear model to analyze the effects of six air pollutants (CO, NO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂) and environmental factors including temperature, season and weather (Table 1) on homing speed and homing time of 285 homing pigeons, participating 64 games held by Chengdu Homing Pigeon Association during the spring and autumn from 2018 and 2019. Every pigeon participated at least 5 races under three levels of distance. The results showed that the concentrations of PM₁₀, SO₂, NO₂ and O₃ were positively correlated with the homing speed, whereas concentration of CO was negatively correlated with it (Fig. 1). O₃ model is the optimal fit model of

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31772470), 绵阳师范学院生态安全与保护四川省重点实验室开放基金项目 (No. ESP1809);

* 通讯作者, E-mail: 329099871@qq.com, lizq@nju.edu.cn;

第一作者介绍 于丛, 男, 硕士; 研究方向: 动物行为学; E-mail: MG1930027@smail.nju.edu.cn。

收稿日期: 2020-03-02, 修回日期: 2020-09-10 DOI: 10.13859/j.cjz.202101002

homing speed, followed by NO₂ model (Table 2 and 3). Our study suggests that homing speed of homing pigeons is indeed affected by air pollution, but the underlying mechanisms including homing motivation hypothesis and olfactory navigation enhancement hypothesis need further studies.

Key words: Homing pigeon competition; Air pollution; Mixed linear model; Homing speed

据考证信鸽运动在我国起源于明末清初, 有着悠久的历史以及广泛的受众基础。20 世纪 30 年代上海即已成立信鸽协会。随着我国经济水平的不断进步, 信鸽运动也高速发展。我国信鸽赛事分为竞翔赛和特殊赛事, 中国信鸽协会每年发放的具有信鸽身份证意义的足环超过 2 500 万个, 占世界总量的一半以上(张祝平 2011)。

空气污染物由颗粒物、气体、重金属和有机化合物等环境毒物组成(Mills et al. 2009)。由于经济、工业及交通运输业(郭宇宏等 2014)的发展, 空气污染已经成为全球性问题, 尤其发展中国家, 如中国(Li et al. 2014)、印度(Tiwari et al. 2013)等国形势最为严峻, 其严重性也日益被重视。造成空气污染的化学物质主要有一氧化碳(carbon monoxide, CO)、二氧化氮(nitrogen dioxide, NO₂)、臭氧(ozone, O₃)、细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})、可吸入颗粒物(particulate matter 10, PM₁₀)、二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)等, 也包括六氯苯、六溴联苯、二噁英、多环芳烃等持久性有机污染物(Brunekreef et al. 2002)。近年来, 空气污染对人类生理、心理的负面影响多有研究, 如增加人类糖尿病患病率(Eze et al. 2015)、犯罪率(Mapou et al. 2017)、抑郁症患者数量(Chen et al. 2018)等。然而关于空气污染对动物的影响相关研究还较少, 目前主要集中在对动物生理及神经系统的影响, 较少涉及对动物行为对策影响的研究。

近几年国内对信鸽(*Columba livia*)的研究多集中在对信鸽饲养方法的研究(Shan et al. 2019)及其疾病的防治(吴建国 2016), 对信鸽归巢速度的影响因素研究则比较少。信鸽归巢速度影响因素的内因包括信鸽自身的年龄、性别。在信鸽导航中, 磁感受器用于感受地球

磁场, 而雌性信鸽的磁感受器含磁粒子浓度高于雄性, 具有更好的导航能力(Tian et al. 2007); 年龄的影响体现在随年龄的增加, 因导航能力及飞行经验而提升(Schiffner et al. 2013)。大气的环境因素, 包括风速、风向、地球磁场已经被证明是影响信鸽飞行的主要外因(Dornfeldt 1996)。环境因素会影响信鸽的导航能力, 例如太阳方位(Matthews 1953)、地球磁场(Walcott 1996)、地面标志物(Lipp et al. 2004)及嗅觉物质(Holland et al. 2009)等环境因素均可以帮助信鸽实现导航。嗅觉导航已经被证明是鸟类导航, 特别是信鸽的中短距离归巢中广为接受的一种重要导航机制(Meschini 1983, Wallraff 2004)。但其中关于空气污染的影响研究还很少。

空气污染到底会降低抑或提高信鸽的归巢速度, 至今仍不确定。一方面, 大气中的污染物如细颗粒物或重金属, 会在信鸽体内器官沉积, 造成机体损害及生理机能丧失(Cui et al. 2016), 而固体颗粒物能降低能见度, 进而降低信鸽的视觉导航能力(Wu et al. 2005), 因此空气污染有可能降低信鸽的飞行能力, 使信鸽归巢时间拉长, 归巢速度降低。但另一方面, 已有大量研究显示, 嗅觉导航在信鸽归巢过程中可能发挥主要作用(Wallraff 2001), 而大气中的化学信号, 甚至包括低浓度的大气污染物在内的化合物的梯度分布或许能够被信鸽用来建立嗅觉地图(Wallraff 2013), 从而显著提高导航能力, 进而提高信鸽的归巢能力和归巢速度(Ganzhorn et al. 1995)。2016 年我们研究了华北地区 400 余场信鸽比赛的数据, 发现在群体水平上, 信鸽的归巢速度的确受到空气污染的影响, 空气质量指数(air quality index, AQI)越高, 信鸽归巢越快(Li et al. 2016), 但在个

体水平上是否仍然如此, 这需要进行进一步验证。因此, 我们以空气污染物为主要对象进行了信鸽个体水平上的归巢因素分析。本文利用成都市信鸽协会 2018 年和 2019 年春季及秋季的 59 场比赛数据, 探究了包括环境因素及 6 种主要空气污染物对信鸽比赛个体归巢速度的影响。

1 研究方法

1.1 比赛数据

通过中国信鸽协会的公开数据 (<http://c.ccpa.net.cn/cc/alogin.aspx>) 获取成都市信鸽协会 2018 和 2019 年春秋两个季节举办的共 59 场赛事的释放地点及归巢地点、参赛信鸽的足环号、性别、释放时间、归巢时间、空距、归巢速度及归巢用时。从中选取参加 5 次及以上比赛的 285 个个体的比赛归巢速度。比赛按距离分为 3 个空距等级: 短距 (< 150 km)、中距 (150 ~ 250 km) 和长距 (> 250 km)。短距比赛 23 场, 中距 13 场, 长距 23 场。比赛距离范围从 100 km 到 650 km。信鸽足环号的唯一性可用来识别信鸽身份。足环号的前四位数字代表信鸽的出生年份, 用比赛年份减去出生年份作为信鸽参加本场比赛时的年龄。

1.2 空气质量指数及天气变量数据

比赛当天的空气质量指数 (air quality index,

AQI) 和空气污染物 (CO、NO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂) 浓度的数据通过公开网站“中国空气质量在线监测分析平台” (<https://www.aqistudy.cn/>) 获得, 该网站数据来源于中华人民共和国生态环境部 (<http://www.mee.gov.cn/>)。空气质量指数定义为定量描述空气质量状况的无量纲指数, 参与空气质量评价的主要污染物为 CO、NO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂。使用释放地及归巢地两地空气质量指数和不同空气污染物的平均值代表信鸽比赛全程的空气情况。

天气变量, 包括季节、气温、天气情况, 通过公开网站“天气后报网” (<http://www.tianqihoubao.com/>) 获得。天气情况代表比赛当天天空遮蔽度, 规定为, 如果比赛当天信鸽释放地与归巢地均为晴天, 天气情况为“晴”; 若有一地为多云, 天气情况为“多云”; 其中一地天气为阴或雨天, 天气情况记录为“阴”。气温计算为释放地与归巢地当日平均气温的平均数。天气情况及季节均为分类变量。本次研究中环境变量的描述统计于表 1。

1.3 数据分析

模型以参赛信鸽归巢速度作为响应变量, 预测变量包括信鸽年龄、比赛季节、气温、空距等级及空气污染物 (共 6 种)。将信鸽足环号

表 1 环境变量的描述统计

Table 1 Descriptive statistics of the environmental variables

变量 Variables	数量 Number	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	中位数 Median
气温 Temperature (°C)		9.50	33.00	17.28	17.25
天气 (晴) Weather (sunny) (d)	278				
天气 (阴) Weather (cloudy) (d)	1 325				
天气 (雨) Weather (rainy) (d)	182				
空气质量指数 Air quality index		29.50	155.00	64.89	63.00
PM _{2.5} 浓度 Concentration of PM _{2.5} (µg/m ³)		10.00	64.00	36.81	34.50
PM ₁₀ 浓度 Concentration of PM ₁₀ (µg/m ³)		21.50	106.00	65.08	64.00
SO ₂ 浓度 Concentration of SO ₂ (µg/m ³)		4.50	17.00	8.69	7.50
CO 浓度 Concentration of CO (mg/m ³)		0.45	1.1.5	0.72	0.70
NO ₂ 浓度 Concentration of NO ₂ (µg/m ³)		18.00	63.00	41.77	42.00
O ₃ 浓度 Concentration of O ₃ (µg/m ³)		43.50	218.50	91.40	88.50

作为随机变量。同时, 为了建立一个综合的归巢时间模型, 又将环境因素和 6 种空气污染物都纳入到初始的完整模型, 通过方差膨胀系数 (variance inflation factor, VIF) 筛选独立的环境因素与不同污染物组合构成的最优预测模型。显著性水平 α 为 0.05。结果用回归系数 \pm 标准误 ($\beta \pm SE$) 表示。使用 Microsoft Excel 2003 整理数据, R 软件 nlme 包的混合线性模型对处理后的数据进行分析, 并获得不同模型的赤池信息量准则 (Akaike Inf. Crit., AIC)、贝叶斯信息准则 (Bayesian Inf. Crit., BIC) 及对数似然指数 (Log Likelihood indices, logLik)。一般而言, AIC 或 BIC 指数越低且 logLik 指数越高, 说明模型的拟合性越好。

2 结果与分析

2.1 空气污染物对归巢速度的影响

在模型中, PM_{10} ($\beta \pm SE = 0.65 \pm 0.32, t = 2.08, P < 0.05$)、 SO_2 ($\beta \pm SE = 9.21 \pm 2.06, t = 4.48, P < 0.05$)、 NO_2 ($\beta \pm SE = 3.64 \pm 0.70, t = 5.19, P < 0.05$)、 O_3 ($\beta \pm SE = 2.43 \pm 0.25, t = 9.85, P < 0.05$) 的系数为正且显著, 表明这 4 种污染物浓度与信鸽归巢速度成正相关关系。 $PM_{2.5}$ ($\beta \pm SE = 0.56 \pm 0.39, t = 1.44, P = 0.15$) 的系数为正却不显著。 CO ($\beta \pm SE = -125.71 \pm 36.72, t = -3.42, P < 0.01$) 的系数为负且显著, 表明 CO 浓度与速度成负相关。6 种空气污染物在不同空距等级下对归巢速度的影响趋势见图 1。

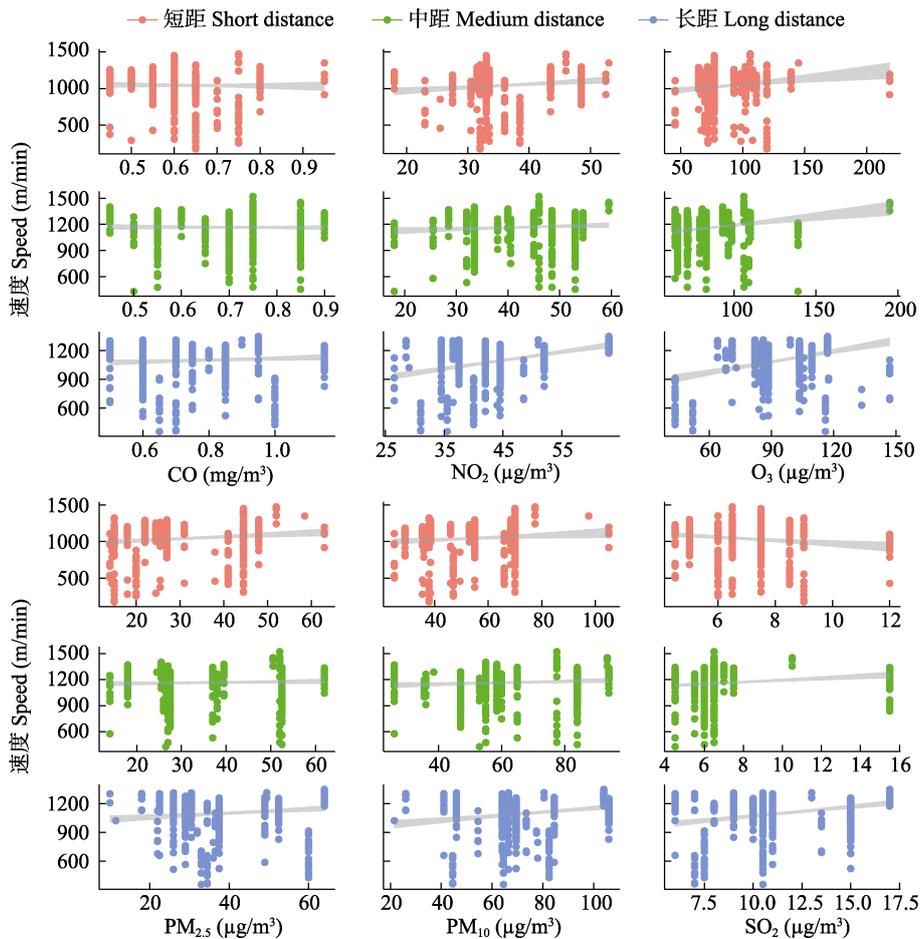


图 1 6 种空气污染物在三种空距等级下与信鸽归巢速度的关系

Fig.1 The relationship of six pollutants with the homing speed by distance levels

2.2 模型评估

表 2 展示 6 种污染物对归巢速度的混合线性模型。在季节变量中,以春季作为参考变量;在距离变量中,以短距作为参考变量。在模型中,SO₂、NO₂、O₃ 和 CO 的系数均显著,表明这 4 种污染物对信鸽归巢速度有影响。

除 SO₂ 与 NO₂ 模型外,其他 4 种污染物模型中信鸽年龄与归巢速度之间都存在显著的正相关关系;除 O₃ 模型,信鸽在春季的归巢速度要高于秋季;除 NO₂ 模型,信鸽归巢速度与气温之间有负相关关系。

表 3 展示不同污染物在模型中的 AIC、BIC 和 logLik 指数对比 6 种污染物模型的 AIC、BIC 和 logLik 指数, O₃ 对归巢速度模型拟合度最佳,其次是 NO₂。

同时,为了建立一个综合的归巢速度模型,又将 4 个独立因素(年龄、季节、气温、距离)和 6 个空气质量指标(包括 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、CO、SO₂、O₃ 的浓度)都纳入到初始的完整模型,筛选独立的环境因素与不同污染物组合构成的最优预测模型,最终,通过方差膨胀系数(VIF)筛选并确定包含 4 种环境因素与 NO₂

($\beta \pm SE = 6.35 \pm 0.78, t = 8.17, P < 0.05$)、CO ($\beta \pm SE = -393.25 \pm 42.50, t = -9.25, P < 0.05$)、O₃ ($\beta \pm SE = 3.02 \pm 0.26, t = 11.61, P < 0.05$) 和 SO₂ ($\beta \pm SE = -4.90 \pm 2.21, t = -2.21, P < 0.05$) 4 种污染物组合的模型其 AIC 指数最低,为 23 724.56,而 logLik 指数最高,为 -11 850.28,表明该模型在不同污染物组合模型中的拟合性最好,同时也优于由单个污染物构成的独立模型。

3 讨论

本文利用混合线性模型深入探究大气污染物中 6 种主要污染物(CO、NO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂)对于信鸽归巢速度的影响。结果表明,PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 这 4 种污染物浓度与信鸽归巢速度之间存在显著的正相关关系,而 CO 的效应则相反。这与我们之前对信鸽群体归巢行为的研究结果基本一致,即随着空气污染的加剧,信鸽的归巢速度明显加快(Li et al. 2016),但也并非所有空气污染物都会引起信鸽归巢加速。

本研究首先表明,信鸽的归巢速度的

表 2 6 种污染物对归巢速度的混合线性模型

Table 2 Mixed linear model fitting for the six pollutants with the homing speed

变量 Variables	CO 模型 Model of CO	NO ₂ 模型 Model of NO ₂	O ₃ 模型 Model of O ₃	PM _{2.5} 模型 Model of PM _{2.5}	PM ₁₀ 模型 Model of PM ₁₀	SO ₂ 模型 Model of SO ₂
年龄(年) Age (year)	48.734***	18.248	36.851***	31.838***	29.487**	8.096
季节(秋) Season (fall)#	-52.069***	-24.964*	-8.620	-43.392***	-37.278**	-49.516***
气温 Temperature (°C)	-6.468***	-1.847	-6.516***	-4.697***	-4.665***	-4.538***
空距(中) Medium distance##	98.84***	89.776***	105.044***	96.760***	94.532***	91.190***
空距(长) Long distance##	41.261**	11.102	18.698	25.601*	18.265	-6.437
CO 浓度 Concentration of CO (mg/m ³)	-125.713***					
NO ₂ 浓度 Concentration of NO ₂ (µg/m ³)		3.635***				
O ₃ 浓度 Concentration of O ₃ (µg/m ³)			2.431***			
PM _{2.5} 浓度 Concentration of PM _{2.5} (µg/m ³)				0.563		
PM ₁₀ 浓度 Concentration of PM ₁₀ (µg/m ³)					0.653*	
SO ₂ 浓度 Concentration of SO ₂ (µg/m ³)						9.211***

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

季节以春季作为参考变量; ## 空距等级以短距作为参考变量。

The variable season takes spring as the reference variable; ## The variable distance takes the short distance as the reference variable.

表 3 6 种污染物模型的赤池信息量准则、
贝叶斯信息准则及对数似然指数

Table 3 The Akaike Inf. Crit., Bayesian Inf. Crit and
Log Likelihood indices of each model

污染物 Pollutant	赤池信息准则 Akaike Inf. Crit. (AIC)	贝叶斯 信息准则 Bayesian Inf. Crit. (BIC)	对数似然 Log Likelihood (logLik)
CO	23 905.71	23 955.06	- 11 943.86
NO ₂	23 898.55	23 947.89	- 11 940.27
O ₃	23 834.65	23 884.00	- 11 908.33
PM _{2.5}	23 924.39	23 973.73	- 11 953.19
PM ₁₀	23 922.59	23 971.94	- 11 952.30
SO ₂	23 903.23	23 952.58	- 11 942.62

确受到空气污染的影响。大气中的污染物, 可能会降低信鸽的呼吸能力, 影响信鸽的生理代谢, 进而降低其归巢速度 (Lorz et al. 1997); 同时, 如果颗粒物浓度升高, 还会显著降低能见度 (Vajanapoom et al. 2001)。基于这两个方面, 我们的直观推论是空气污染会降低信鸽的归巢速度。但研究结果却与预期相反。根据此前对信鸽群体归巢行为影响的论文中提出的观点 (Li et al. 2016), 我们认为有两种可能导致这一结果。第一种就是信鸽的归巢动机假说, 即空气污染尤其是雾霾污染, 在短时间内的确可能降低信鸽的生理功能和视觉导航能力, 但这反而增加了信鸽的风险感, 导致其减少了归巢过程中的停歇时间或者停歇点, 加速返回它们更为熟悉的巢区。空气污染并不见得真的增加了信鸽归巢过程中的被捕食概率, 但风险感的增加足以使其加速归巢 (Stankowich et al. 2005)。另一种假设是嗅觉导航强化假说, 也就是空气污染物有可能作为化学信号分子提高了信鸽的嗅觉导航能力。尽管有很多证据表明信鸽可以通过太阳方位 (Matthews 1953)、地球磁场 (Walcott 1996)、地面标志物 (Lipp et al. 2004) 及嗅觉 (Holland et al. 2009) 等机制实现导航, 但嗅觉导航无疑是信鸽中、短距离归巢中广为接受的一种机制 (Meschini 1983,

Wallraff 2004)。大气中稳定梯度存在的气味分子是信鸽嗅觉导航的基础 (Wallraff 1979, Gagliardo 2013)。如挥发性烷烃之间存在比例关系 (Wallraff 2004), 信鸽或许能够通过嗅觉感知这些分子有规律的空间梯度分布, 从而推断位置信息。但具体何种气味分子影响信鸽的导航能力至今尚无定论 (Gagliardo 2013)。

因此针对本文, 一种可能的假设是, 信鸽的嗅觉导航对 O₃、NO₂ 等污染物的梯度分布更为敏感, 这些污染物浓度的增加可能会提高信鸽的导航能力。模型的比较表明, O₃ 模型对信鸽归巢速度及归巢时间拟合度最佳, 其次是 NO₂ 模型。O₃ 及其他污染物在大气对流层中的差异分布以及在时间、空间上有规律分布变化, 具有潜在的梯度差异, 进而可以构成梯度地图, 这可能会为信鸽的嗅觉导航提供基础 (Logan 1999)。高浓度的这些空气污染物会威胁包括信鸽在内的所有生物的健康, 但低浓度情况下这些化合物对健康的影响可能并不大 (WHO 2000)。此外, 嗅觉地图依赖的绝不会是一两种化学信号, 因此, 即便低浓度的 O₃ 等具有这种功能, 也很可能只是一个很小的效应。

年龄因素在除 NO₂ 和 SO₂ 模型外的其他 4 种污染物的模型中均达到了显著水平, 即年龄越大, 信鸽归巢时间越短。这可能与信鸽归巢能力随年龄增长而提高有关。随着年龄增长, 一方面信鸽的身体条件可能越加强健, 有利于克服长距离归巢过程中的体力挑战; 另一方面信鸽的导航经验也会增加, 在生理上表现为, 成年信鸽比幼年信鸽在大脑控制空间记忆能力的海马体及控制嗅觉导航的关键部位嗅球的神经发育更完善、神经元数量更多 (Meskenaite et al. 2016), 导航系统更加完善 (Schiffner 2013)。

另外, 我们的污染物组合模型表明, 颗粒物不是影响信鸽归巢速度的主要原因, SO₂、O₃、CO 和 NO₂ 是主要因素。在污染物单独模型与综合模型中, CO 对信鸽归巢速度都有显著的负面影响, 这可能是因为 CO 会降低鸟类

的心肺功能 (Tschorn 1974), 从而导致归巢速度变慢。鸽的嗅觉地图只需使用 6 种化学物质 (碳氢化合物) 的分布, 而且即使在有风或其他环境变化的情况下也能表现出它的作用 (Wallraff 2013)。如果这些化学信号增强, 信鸽可以更容易地发现和利用这些化学信号。SO₂、O₃、CO 和 NO₂ 这 4 种化学物质可能只是构成信鸽嗅觉地图的所有化学信号的一部分。有可能信鸽还利用其他化学物质与这四者共同构成嗅觉地图。

我们对信鸽个体水平上的研究结果再次表明, 信鸽的归巢速度会随空气污染的加剧而变快。针对于此, 一种解释是, 空气污染作为一种不利的环境条件, 增加了信鸽归巢的动机; 另一种解释是空气污染物作为潜在的化学信号分子, 可能会提高信鸽的嗅觉导航能力。进一步的实验应该验证两种假说, 对信鸽归巢路径的轨迹及区域内的空气样品进行提取分析, 以检测不同空气污染物的梯度分布情况, 并找出影响信鸽归巢动机或嗅觉导航的具体气味分子类型, 以及这些化学物质是如何共同构成嗅觉地图、信鸽如何准确地使用这些化学物质。

参 考 文 献

- Brunekreef B, Holgate S T. 2002. Air pollution and health. *Lancet*, 360(9341): 1233–1242.
- Chen C, Liu C, Chen R, et al. 2018. Ambient air pollution and daily hospital admissions for mental disorders in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 613/614: 324–330.
- Cui J, Halbrook R S, Zang S, et al. 2016. Use of homing pigeons as biomonitors of atmospheric metal concentrations in Beijing and Guangzhou, China. *Ecotoxicology*, 25(3): 439–446.
- Dornfeldt K. 1996. Pigeon homing in the meteorological and solar-geomagnetic environment: What pigeon race data say. *Ethology*, 102(5): 413–435.
- Eze I C, Hemkens L G, Bucher H C, et al. 2015. Association between ambient air pollution and diabetes mellitus in Europe and North America: Systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, 123(5): 381–389.
- Gagliardo A. 2013. Forty years of olfactory navigation in birds. *Journal of Experimental Biology*, 216(12): 2165–2171.
- Ganzhorn J U, Paffrath D. 1995. Patterns in air-pollution as model for the physical basis for olfactory navigation in pigeon homing. *Journal Fur Ornithologie*, 136(2): 159–165.
- Holland R A, Thorup K, Gagliardo A, et al. 2009. Testing the role of sensory systems in the migratory heading of a songbird. *Journal of Experimental Biology*, 212(24): 4065–4071.
- Li L, Liu D J. 2014. Study on an air quality evaluation model for Beijing city under haze-fog pollution based on new ambient air quality standards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(9): 8909–8923.
- Li Z, Courchamp F, Blumstein D T. 2016. Pigeons home faster through polluted air. *Scientific Reports*, 6(1): 18989.
- Lipp H P, Vyssotski A L, Wolfer D P, et al. 2004. Pigeon homing along highways and exits. *Current Biology*, 14(14): 1239–1249.
- Logan J A. 1999. An analysis of ozonesonde data for the troposphere: Recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104(D13): 16115–16149.
- Lorz C, Lopez J. 1997. Incidence of air pollution in the pulmonary surfactant system of the pigeon (*Columba livia*). *Anatomical Record*, 249(2): 206–212.
- Mapou A E M, Shendell D, Ohman-Strickland P, et al. 2017. Environmental factors and fluctuations in daily crime rates. *Journal of Environmental Health*, 80(5): 8–22.
- Matthews G V T. 1953. Sun navigation in homing pigeons. *Journal of Experimental Biology*, 30(2): 243–267.
- Meschini E. 1983. Pigeon navigation - some experiments on the importance of olfactory cues at short distances from the loft. *Journal of Comparative Physiology*, 150(4): 493–498.
- Meskenaite V, Krackow S, Lipp H P. 2016. Age-dependent neurogenesis and neuron numbers within the olfactory bulb and hippocampus of homing pigeons. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10(10): 126.
- Mills N L, Donaldson K, Hadoke P W, et al. 2009. Adverse cardiovascular effects of air pollution. *Nature Clinical Practice Cardiovascular Medicine*, 6(1): 36–44.

- Schiffner I, Wiltschko R. 2013. Development of the navigational system in homing pigeons: increase in complexity of the navigational map. *Journal of Experimental Biology*, 216(14): 2675–2681.
- Shan D, Wang Z, Huang J, et al. 2019. Early growth of pigeon squabs and nutrient levels of crop Milk. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 31(3): 981–986.
- Stankowich T, Blumstein D T. 2005. Fear in animals: a meta-analysis and review of risk assessment. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 272(1581): 2627–2634.
- Tian L X, Xiao B, Lin W, et al. 2007. Testing for the presence of magnetite in the upper-beak skin of homing pigeons. *Biometals*, 20(2): 197–203.
- Tiwari S, Srivastava A K, Bisht D S, et al. 2013. Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: Influence of meteorology. *Atmospheric Research*, 125/126: 50–62.
- Tschorn R R, Fedde M R. 1974. Cardiopulmonary responses to carbon monoxide breathing in the chicken. *Respiration Physiology*, 20(3): 303–311.
- Vajanapoom N, Shy C M, Neas L M, et al. 2001. Estimation of particulate matter from visibility in Bangkok, Thailand. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(2): 97–102.
- Walcott C. 1996. Pigeon homing: Observations, experiments and confusions. *Journal of Experimental Biology*, 199(1): 21–27.
- Wallraff H G. 1979. Olfaction and homing in pigeons. *Naturwissenschaften*, 66(5): 269–270.
- Wallraff H G. 2001. Navigation by homing pigeons: updated perspective. *Ethology Ecology & Evolution*, 13(1): 1–48.
- Wallraff H G. 2004. Avian olfactory navigation: its empirical foundation and conceptual state. *Animal Behaviour*, 67(2): 189–204.
- Wallraff H G. 2013. Ratios among atmospheric trace gases together with winds imply exploitable information for bird navigation: a model elucidating experimental results. *Biogeosciences*, 10(11): 6929–6943.
- WHO. 2000. Nitrogen Dioxide. Air Quality Guidelines for Europe. 2nd ed. Copenhagen, Denmark: World Health Organization.
- Wu D, Tie X X, Li C C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study. *Atmospheric Environment*, 39(35): 6568–6577.
- 郭宇宏, 王自发, 康宏, 等. 2014. 机动车尾气排放对城市空气质量的影响研究——以乌鲁木齐市春节前后对比分析. *环境科学学报*, 34(5): 1109–1117.
- 吴建国. 2016. 信鸽的饲养管理与疫病防治技术. *当代畜牧*, 4(4): 3–6.
- 张祝平. 2011. 论我国信鸽运动的发展. *体育文化导刊*, 1(1): 28–31.