

春季农田地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系

武亚堂, 吴建国, 王立

引用本文:

武亚堂, 吴建国, 王立. 春季农田地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1792–1802.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0339>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洱海北部表流人工湿地氮截留的长效性及影响因子

梁启斌, 侯磊, 李能发, 陈鑫, 王克勤

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1585–1593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1324>

镉砷在线蚓中的毒物-毒效动力学过程及定量模拟

李敏, 龚冰, 黄雪莹, 肖雪, 何尔凯, 仇荣亮

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1451–1459 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0209>

固定化*Pseudomonas citronellae* SJTE-3菌剂对水中呋喃醇的去除作用

王雁秋, 彭万里, 梁如冰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1803–1810 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0277>

南京地区斑点叉尾养殖池塘水体微生物群落结构研究

钟立强, 王明华, 张世勇, 姜虎成, 陈校辉, 朱广伟, 边文冀

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1594–1604 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0157>

有机酸对芫在土壤中的吸附影响研究

彭章, 龚香宜, 熊武芳, 胡宏元, 任大军

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1540–1547 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0217>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

武亚堂, 吴建国, 王立. 春季农田地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1792–1802.

WU Ya-tang, WU Jian-guo, WANG Li. Changes in the PM₁₀ concentrations of air near the ground of farmlands in spring[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1792–1802.



开放科学 OSID

春季农田地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系

武亚堂^{1,2}, 吴建国^{2*}, 王立¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100021)

摘要:为探讨春季农田近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系,于2019年3月1日至5月31日,用PM₁₀采样器、自动气象站以及土壤温湿度数据采集器,对山东泗水县开垦农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度与环境因子进行了观测,使用线性回归和Pearson相关系数分析方法、曲线回归分析法、多元线性回归和逐步回归分析方法分析了PM₁₀浓度变化与环境因子的关系。结果显示:在3—5月,山东泗水县典型农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度平均值为117.06 μg·m⁻³,变化范围为16.67~333.33 μg·m⁻³。同时,PM₁₀浓度变化与风速呈显著负相关和指数函数关系($y=151.66e^{-0.19x}$, $R^2=0.162$, $P<0.001$),与相对湿度呈显著二次函数关系($y=-0.48x^2+6.14x-62.47$, $R^2=0.103$, $P<0.05$);PM₁₀浓度变化与气温呈显著S曲线函数关系($y=e^{5.00-5.28/x}$, $R^2=0.089$, $P<0.01$)。另外,PM₁₀浓度变化与风速、气温、相对湿度、5 cm土壤温度和湿度因子多元回归与逐步回归分析结果显示,风速影响达到显著水平($y=-16.824x_1+150.420$, x_1 为风速, $R^2=0.126$, $F=9.658$, $P<0.01$)。研究表明,在春季,受风速等多种环境因子影响,山东泗水县农田近地表空气中PM₁₀污染影响不容忽视。

关键词:PM₁₀; 大气污染; 农田; 扬尘; 风蚀; 山东泗水

中图分类号:X513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)08-1792-11 doi:10.11654/jaes.2020-0339

Changes in the PM₁₀ concentrations of air near the ground of farmlands in spring

WU Ya-tang^{1,2}, WU Jian-guo^{2*}, WANG Li¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100021, China)

Abstract: In order to improve our understanding of changes in the PM₁₀ concentrations of air near the ground of Chinese farmlands during spring (March 1 to May 31, 2019), the PM₁₀ concentrations and environmental factors of the air 80 cm above the ground surface of cultivated farmlands was observed in Sishui County, Shandong Province, China. Particulate (PM₁₀) samplers, automatic weather stations, and soil temperature and humidity data were employed, and the relationships between changes in the PM₁₀ concentrations and environmental factors were analyzed via linear regression and Pearson's correlation coefficient, curve regression, multiple linear regression, and stepwise regression. The results showed that from March to May, the average PM₁₀ concentration was 117.06 μg·m⁻³, with a range of 16.67~333.33 μg·m⁻³. Additionally, changes in PM₁₀ concentrations were significantly and negatively correlated and exhibited an exponential relationship with wind speed ($y=151.66e^{-0.19x}$, $R^2=0.162$, $P<0.001$), and had a significant quadratic relationship with relative humidity ($y=-0.48x^2+6.14x-62.47$, $R^2=0.103$, $P<0.05$). Moreover, changes in PM₁₀ concentrations displayed a significant (S-shaped) curvilinear relationship with air temperature ($y=e^{5.00-5.28/x}$, $R^2=0.089$, $P<0.01$). In the multiple regression and stepwise analyses of the

收稿日期:2020-03-26 录用日期:2020-05-09

作者简介:武亚堂(1993—),男,甘肃张掖人,硕士研究生,从事大气污染、土壤风蚀扬尘等研究。E-mail:370008176@qq.com

*通信作者:吴建国 E-mail:wujg@craes.org.cn

基金项目:大气重污染成因与治理攻关项目:“农业排放状况及强化治理——土壤风蚀扬尘排放规律”(DQGG0208-02)

Project supported: The Key Research Project on the Causes of Atmospheric Pollution and Control: "Agricultural Emissions Status and Strengthened Control——Soil Erosion and Dust Emission" (DQGG0208-02)

changes in PM₁₀ concentrations with wind speed, air temperature, relative humidity, 5-cm soil temperature, and humidity factors, the effect of wind speed was significant ($y = -16.824x_1 + 150.420$ (x_1 represents wind speed), $R^2 = 0.126$, $F = 9.658$, $P < 0.01$). These results suggest that in spring, due to the effects of various environmental factors (e.g., wind speed, humidity, etc.), the PM₁₀ pollution of the near-surface air of farmlands in Sishui County cannot be ignored.

Keywords: PM₁₀; air pollution; farmland; agricultural dust; wind erosion; Sishui County Shandong Province

PM₁₀是指以固态和液态形式悬浮于大气中,空气动力学粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒状物质^[1],在我国又称为可吸入颗粒物,是主要的大气污染物之一^[2],对生态系统、环境卫生及公共健康等都危害极大^[3-4]。随着工业化和城镇化的深入推进,区域型与复合型的大气污染问题日趋严重^[5],PM₁₀成为首要污染物^[6]。农田土壤风蚀扬尘是PM₁₀的重要来源^[7-8]。在风等环境因子影响下,裸露农田土壤颗粒物经风蚀和搬运等过程被释放到近地表空气中,形成了土壤风蚀扬尘^[9],又经扩散等过程影响近地表空气中的PM₁₀浓度及空气质量^[10]。另外,区域大气中PM₁₀也会经扩散和沉降过程而影响农田近地表空气中的PM₁₀浓度^[7]。因此,系统分析农田近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子的关系,对科学认识土壤风蚀扬尘PM₁₀排放对区域大气环境质量影响,以及确定空气中PM₁₀浓度变化与环境因子的关系等方面都具有重要的现实意义。

在国际上,空气中颗粒物浓度变化与环境因子关系研究广泛展开,但这些研究还多集中于城市及工业污染区^[11-13],在一些区域也开展了土壤风蚀扬尘排放时空分布与变化特征分析^[14]、预测^[15]、估算^[16]、模拟^[17]、理化性质分析^[18-19]、来源解析^[20]及气候变化^[21]、地形条件^[22]、地表扰动^[23]和耕作制度^[24]等对土壤风蚀扬尘排放的影响,以及土壤风蚀扬尘与盐分^[25]、地表覆盖度^[26]和土壤质地及纹理^[27]等环境因子的关系方面的分析。另外,在一些区域也开展了土壤风蚀扬尘PM₁₀排放与气象因子(风速、相对湿度)和土壤因子(土壤湿度)关系方面的研究,如Kim等^[28]研究发现1982—2008年在北非撒哈拉和萨赫勒地区扬尘PM₁₀排放量与地表风速呈显著正相关关系;Csavina等^[29]在墨西哥华雷斯研究发现2011年3—5月PM₁₀浓度与相对湿度呈正相关关系,当超过阈值后则呈负相关关系;Aimar等^[30]在阿根廷研究发现土壤风蚀PM₁₀排放与土壤湿度呈负相关关系。这些研究结果对科学认识农田土壤风蚀扬尘PM₁₀排放特征有重要的参考意义。但目前缺少气象及土壤因子对土壤风蚀扬尘PM₁₀排放影响,以及多种环境因子对土壤风蚀PM₁₀排放综合影响方面的观测分析,特别是对农田近地表空气中

PM₁₀浓度变化与环境因子关系方面的研究报道还极少。在我国,空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系研究也在许多城市或工业区展开^[31-33],对农田土壤风蚀扬尘PM₁₀排放与环境因子关系也有一些研究报道,如高建华等^[34]在陕西中北部地区农田近地表观测发现PM₁₀排放量与地表粗糙度呈幂函数关系,与摩擦风速呈四次幂函数关系,与土壤湿度呈负相关关系;南岭等^[35]研究发现在农牧交错带非沙区农田地表平均PM₁₀排放量与风速呈显著线性关系,最大排放量与风速呈幂函数关系等。这些结果对认识农田土壤风蚀扬尘PM₁₀排放与环境因子关系有重要参考价值,但目前的研究还多集中在冬季城区及工业区PM_{2.5}污染,对春季农田近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系的研究还鲜有报道。

近年来,京津冀及周边地区一直是污染最严重的地区之一^[5]。经政府大力治理,尽管空气质量已明显改善^[36],但PM₁₀污染物问题依旧严峻^[37]。该区域旱作农田分布广泛,并且在易旱多风的春季缺少植被保护,开垦前后地表土壤处于裸露或半裸露状态^[38],进而使春季土壤风蚀扬尘排放成为影响区域空气PM₁₀的重要源^[8]。裸露农田风蚀扬尘PM₁₀排放对京津冀及周边空气质量影响较大^[39-40]。系统分析裸露农田地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系,对科学认识京津冀及周边地区大气重污染成因和制定有效防控对策有重要的现实意义。目前对京津冀及周边地区土壤风蚀扬尘与环境因子的关系已有一些研究^[41],但对农田近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子的关系却很少有研究报道。为此,本研究在农田分布广泛、大气污染严重的山东省济宁地区^[42],选择典型农田,进行春季近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子同步观测,对农田近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子的关系进行探索,希望为京津冀及周边地区大气重污染防治提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和试验地选择

研究区位于山东省济宁市泗水县,在山东省中南

部,泰沂山区南麓($35^{\circ}28' \sim 35^{\circ}48' \text{N}$, $117^{\circ}5' \sim 117^{\circ}35' \text{E}$);该县东西最大横距46 km,南北最大纵距40.6 km;地势南北高、中部低,由东向西倾斜,南部和北部多为400 m以下低山丘陵,中部为河谷平地。境内河流属淮河水系,多东西流向^[43]。该县地处暖温带大陆性季风气候区,年均气温约13.4℃,年降水量约755 mm(集中于7—9月),年相对湿度65%,无霜期180~220 d,春季(3—5月)易旱多风^[44]。该县为典型农业县,有土地面积1 118.11 km²,其中农用地约84 953.53 hm²(耕地约56 043.17 hm²),主要种植小麦、玉米及薯类和油料作物;旱田广泛分布,并且旱田前茬作物收获后秸秆多不会留存于地表,使冬春季农田地表土壤覆盖度低,呈季节性裸露和半裸露的状态^[44]。

考虑到典型性和试验的操作性,在位于距离泗水县城中心约15 km处的泗河北岸的林泉西村($35^{\circ}68' \text{N}$, $117^{\circ}38' \text{E}$),选择开垦且地表土壤完全裸露的农田作为试验观测场(海拔约122.3 m),该处地势平坦开阔,周边30~50 km范围都为类似旱田。观测场中土壤为潮土,主要实施传统耕地方式,种植小麦等^[45]。另外,为了减少人为干扰,在试验场中心位置划定了面积为667 m²(长×宽为29 m×23 m)的地块进行封围,作为架设观测仪器(颗粒物、气象与土壤因素观测)的固定场地。

1.2 颗粒物浓度观测

在2019年3月1日—5月31日,进行近地表空气中PM₁₀逐日采样观测。考虑到早晨是白天空气中颗粒物较高的时段^[33],本研究PM₁₀采样观测在每日早晨9:30—10:30进行。采样PM₁₀仪器为青岛精诚仪器仪表有限公司生产的JH-120F型智能颗粒物中流量采样器(2018年2月生产),配备有QH-100中流量PM₁₀切割器。考虑到过去土壤风蚀扬尘与PM₁₀浓度观测都集中在1 m以上的较高地表^[34],而Kasumba等^[46]研究发现在农田地表4 m以下颗粒物浓度是20~100 m处的4~7倍,且地表4 m以下颗粒物浓度随离地表高度增加而减小,近地表土壤风蚀扬尘排放对空气中颗粒物影响较大,但目前对近1 m内地表观测分析不足,对农田近地表土壤风蚀扬尘认识有限。本研究开展农田近地表1 m内空气中PM₁₀浓度观测分析,结合考虑气象站观测高度限制,采样高度设为近地表80 cm处,采样仪布设于观测场中心,采气流量为100 L·min⁻¹,每次采集60 min。利用滤膜称质量法确定所采集空气中PM₁₀的质量,即用上海佑科仪器仪表有限公司生产的FA1104B型0.1 mg精度电子天平(2018

年3月生产),在采样前和采样后分别称空白滤膜和已采集到空气中PM₁₀滤膜质量,根据采集后与采集前滤膜的质量差,计算采集空气中PM₁₀的质量,再根据采气流量100 L·min⁻¹计算采样60 min累积采样空气体积,由采样PM₁₀质量与采样空气的体积计算空气中PM₁₀的质量浓度。所用滤膜为山东青岛精诚仪器仪表有限公司生产的直径90 mm玻璃纤维滤膜(2018年6月生产)。在停止采样时,滤膜存放在干净滤膜盒内进行低温避光密封保存。在降雨天(包括3月29日及4月8、9、11日)及停电时(3月6日),停止PM₁₀采样观测。

1.3 环境因素监测

在2019年3月1日至5月31日,使用架设在观测场北偏东45°距离采样仪约2 m处的QS-3000自动气象站(由河北邯郸开发区清易电子科技有限公司2018年5月生产),在PM₁₀采样开始与结束时段进行近地表80 cm处风速、温度和相对湿度的同步监测,每隔30 min自动记录数据。同时,使用美国Decagon公司生产的5通道的Em50土壤温湿度数据采集器(2016年8月生产),在PM₁₀采样开始与结束时段测定5 cm处土壤温度和湿度,每隔30 min自动记录数据。

1.4 数据分析

为了使环境因子分析时段与PM₁₀质量浓度采样观测时段一致,把PM₁₀质量浓度观测时段对应期间的气象和土壤因子每隔30 min记录的观测数据都统一计算60 min平均值。另外,为了减少区域沙尘影响,把3月2日和5月13日受沙尘影响明显的观测数据剔除。使用线性回归和Pearson相关系数分析法,分析农田近地表空气中的PM₁₀浓度变化与风速、气温、空气相对湿度、5 cm土壤温度和湿度的关系;使用曲线回归分析方法,分析PM₁₀浓度变化与风速、气温、相对湿度、5 cm土壤温度和湿度非线性关系。另外,考虑到不同环境因子(风速、气温、相对湿度、5 cm土壤温度和湿度)可能会对PM₁₀浓度产生一定协同影响,在分析PM₁₀浓度变化与单一因子关系的基础上,为了进一步识别多种因子综合对PM₁₀浓度变化的影响,又进行了PM₁₀浓度与环境因子间的多元线性回归和逐步回归分析。

所有数据处理和图表制作都在Excel 2013中完成,所有数据分析(包括线性回归和Pearson相关系数分析、曲线回归分析、多元线性回归和逐步回归统计分析)都在SPSS 21.0中执行^[47]。

2 结果与分析

2.1 PM₁₀浓度变化

图1显示,在3—5月,农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化范围存在差异。在3、4、5月,PM₁₀浓度平均值分别为118.45、110.49、121.67 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变化范围分别为33.33~333.33、16.67~250.00、66.67~216.67 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变异系数分别为68%、43%、29%。在3—5月整个时段,农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度平均值为117.06 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变化范围为16.67~333.33

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变异系数为49%,随时间动态变化趋势不显著($R^2=0.006$, $P>0.05$)。

2.2 PM₁₀浓度变化与环境因子的关系

2.2.1 PM₁₀浓度变化与气象因子的关系

在3—5月,农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与气象因子相关性不同。3—5月平均风速为1.98 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,变化范围0.50~6.03 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,PM₁₀浓度变化与风速相关系数和线性回归关系都达显著水平($P<0.01$,表1),并且PM₁₀浓度变化与风速也呈显著指数函数关系($P<0.001$,表2);3—5月平均气温为16.91 $^{\circ}\text{C}$,

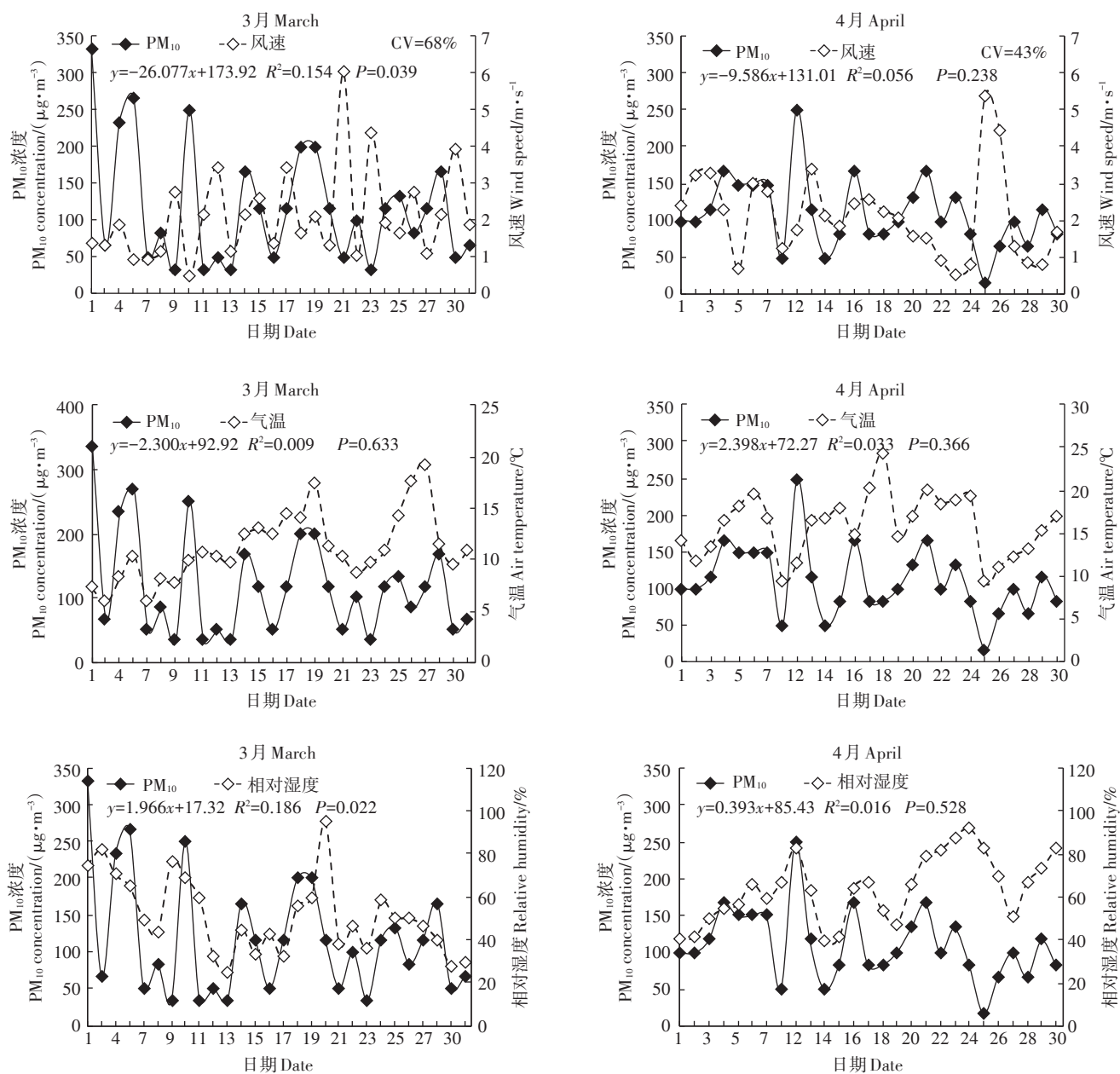
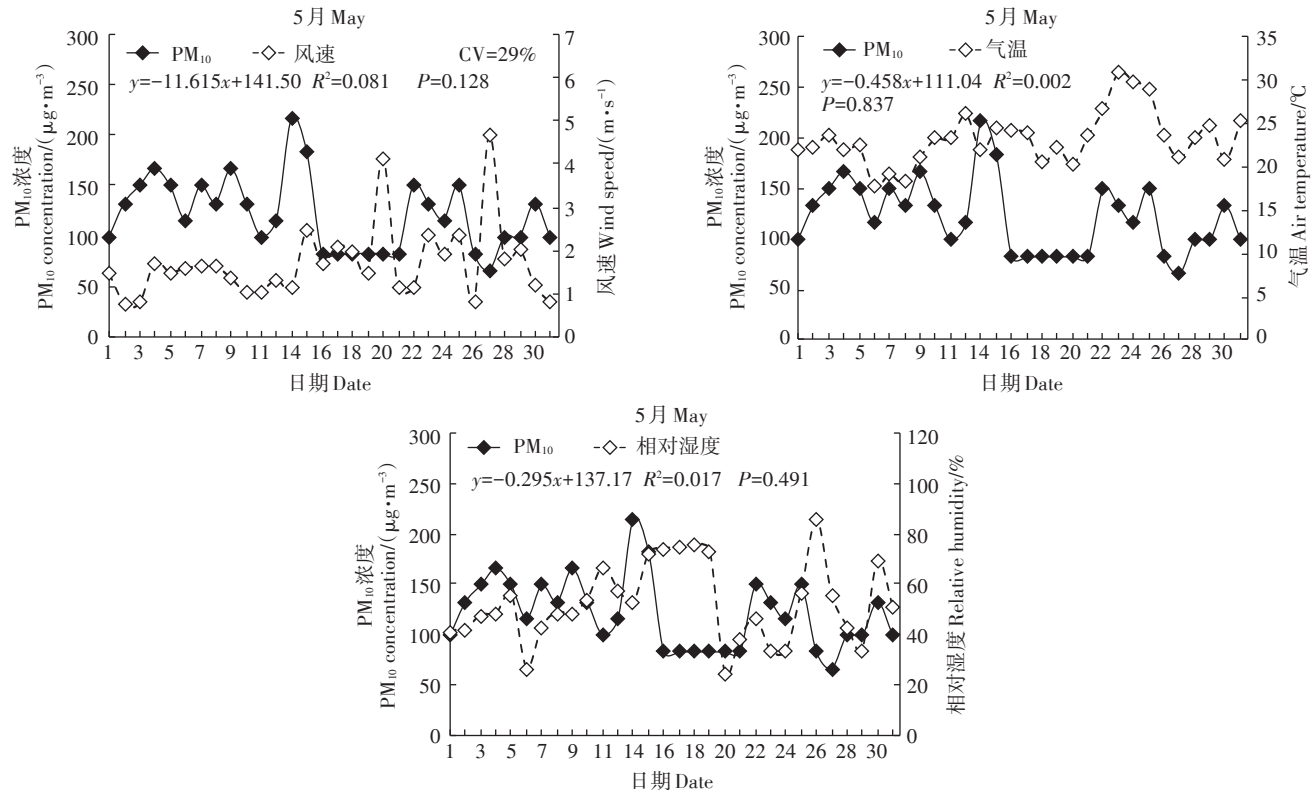


图1 PM₁₀浓度和气象因素的变化特征

Figure 1 Changes in the PM₁₀ concentrations and meteorological factors



续图1 PM₁₀浓度和气象因素的变化特征

Continued figure 1 Changes in the PM₁₀ concentrations and meteorological factors

表1 不同月份PM₁₀浓度与环境因素的Pearson相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient between the PM₁₀ concentrations and environmental factors in different months

月份 Month	风速 Wind speed	气温 Air temperature	相对湿度 Relative humidity	5 cm土壤温度 5 cm soil temperature	5 cm土壤湿度 5 cm soil moisture
3月 March	-0.392*	-0.094	0.431*	-0.131	0.093
4月 April	-0.235	0.181	0.127	-0.027	-0.470*
5月 May	-0.284	-0.039	-0.131	-0.307	0.355
3—5月 March to May	-0.323**	-0.052	0.182	-0.035	-0.059

注: *和**分别表示在0.05水平显著和0.01水平显著。3、4、5月及3—5月样本数分别为28、27、30和85。

Note: *and** indicate significant at 0.05 and 0.01 level, respectively. The number of samples in March, April and May and during March to May is 28, 27, 30 and 85, respectively.

变化范围5.87~30.83℃, PM₁₀浓度变化与气温呈显著S曲线函数关系($P < 0.01$, 表2); 3—5月平均相对湿度为55.74%, 变化范围24.33%~94.83%, PM₁₀浓度变化与相对湿度呈显著二次函数关系($P < 0.05$, 表2), 但PM₁₀浓度变化与气温、相对湿度相关系数和线性回归关系不显著($P > 0.05$)(表1)。

在3—5月不同月份, 农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与气象因子相关性也不同。在3月, 平均风速为2.13 m·s⁻¹, 变化范围0.50~6.03 m·s⁻¹, PM₁₀浓度变化与风速的Pearson相关系数和线性回归关系显著($P < 0.05$, 表1), 并且PM₁₀浓度变化与风速也呈显

著指数函数关系($P < 0.05$, 表2); 平均气温为11.10℃, 变化范围5.87~19.2℃, PM₁₀浓度变化与气温相关系数和线性回归关系都不显著($P > 0.05$); 平均相对湿度为51.43%, 变化范围25.27%~94.83%, PM₁₀浓度变化与相对湿度相关系数和线性回归关系都达到显著水平($P < 0.05$, 表1), 并且PM₁₀浓度变化与相对湿度也呈显著倒数函数关系($P = 0.01$, 表2)。在4月, 平均风速为2.14 m·s⁻¹, 变化范围0.53~5.37 m·s⁻¹; 相对湿度平均63.81%、变化范围39.87%~91.7%; 平均气温为15.94℃, 变化范围9.40~24.3℃, PM₁₀浓度变化与气温呈显著S曲线函数关系($P < 0.05$, 表2), 但PM₁₀浓度

表2 PM₁₀浓度与环境因素的非线性回归方程Table 2 Nonlinear regression equation of the PM₁₀ concentrations with environmental factors

月份 Month	环境因素 Environmental factor	非线性回归方程 Nonlinear regression equation	决定系数 R^2	概率 P
3月 March	风速 Wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$y=155.45e^{-0.24x}$	0.168	0.030
3月 March	相对湿度 Relative humidity/%	$y=230.56-5\ 142.60/x$	0.230	0.010
4月 April	气温 Air temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$y=e^{5.57-14.63/x}$	0.220	0.013
4月 April	5 cm 土壤湿度 5 cm soil moisture/%	$y=e^{1.07+57.06/x}$	0.319	0.004
3—5月 March to May	风速 Wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$y=151.66e^{-0.19x}$	0.162	0.000
3—5月 March to May	气温 Air temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$y=e^{5.00-5.28/x}$	0.089	0.006
3—5月 March to May	相对湿度 Relative humidity/%	$y=-0.48x^2+6.14x-62.47$	0.103	0.012

注: x 表示与PM₁₀对应的环境变量。3、4、5月及3—5月样本数分别为28、27、30和85。

Note: x represents the environment variable corresponding to PM₁₀. The number of samples in March, April and May and during March to May is 28, 27, 30 and 85, respectively.

与风速、气温、相对湿度相关系数和线性回归关系都不显著($P>0.05$)。在5月,平均风速为 $1.71\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,变化范围 $0.77\sim4.67\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;平均气温 $23.21\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化范围 $17.80\sim30.83\text{ }^{\circ}\text{C}$;平均相对湿度 52.50% ,变化范围 $24.33\%\sim85.87\%$,PM₁₀浓度变化与风速、气温、相对湿度相关系数和线性回归关系均不显著($P>0.05$)(图1,表1)。

2.2.2 PM₁₀浓度变化与土壤因子的关系

在3—5月不同月份,农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与土壤因子关系不同。在3月,土壤平均温度为 $8.80\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化范围 $3.97\sim14.37\text{ }^{\circ}\text{C}$;土壤平均湿度为 14.30% ,变化范围 $14.18\%\sim14.50\%$,PM₁₀浓度变化与土壤温度和湿度相关系数及线性回归关系不显著($P>0.05$)。在4月,土壤平均温度为 $15.60\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化范围 $10.43\sim20.67\text{ }^{\circ}\text{C}$,PM₁₀浓度变化与土壤温度相关系数及线性回归关系不显著($P>0.05$);土壤平均湿度为 16.11% ,变化范围 $14.26\%\sim19.17\%$,PM₁₀浓度变化与土壤湿度呈显著负相关和S曲线函数关系($P<0.01$,表2)。在5月,土壤平均温度为 $22.84\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化范围 $17.50\sim28.13\text{ }^{\circ}\text{C}$,土壤平均湿度为 18.42% ,变化范围 $17.78\%\sim19.10\%$,PM₁₀浓度与土壤温度和湿度相关系数和线性回归关系不显著($P>0.05$)(图2,表1)。在3—5月整个时段,农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与土壤因子关系不同。在3—5月整个时段,土壤平均温度为 $15.62\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化范围为 $3.97\sim28.13\text{ }^{\circ}\text{C}$,土壤平均湿度为 16.33% ,变化范围 $14.18\%\sim19.17\%$,PM₁₀浓度变化与土壤温度和湿度相关系数和线性回归关系都不显著($P>0.05$)(图2,表1)。

2.3 PM₁₀浓度变化与环境因子综合关系

以农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度为因变量,以风速、气温、相对湿度、5 cm土壤温度和湿度为

自变量,PM₁₀浓度变化与环境因子多元回归关系达到显著水平($R^2=0.159$, $P=0.027$),但只有风速标准化系数(-0.238)显著($P<0.05$)(表3)。

按变量纳入标准($P<0.05$)进行PM₁₀浓度与环境因子逐步回归分析,即气温、相对湿度、5 cm土壤温度和湿度为排除变量(表4),只有风速变量进入模型,PM₁₀浓度变化与环境因子线性回归方程为: $y=-16.824x_1+150.420$ (x_1 为风速, $R^2=0.126$, $F=9.658$, $P<0.01$),说明风速对PM₁₀浓度变化影响达到显著水平(表5)。

3 讨论

3.1 农田近地表PM₁₀排放

一些观测发现,城市空气中PM₁₀浓度变化较大。如赵晨曦等^[32]观测发现北京城区空气中PM₁₀平均浓度为 $127.99\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在冬春季空气中PM₁₀浓度范围为 $30\sim450\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;王嫣然等^[48]观测发现北京城区空气中PM₁₀平均浓度为 $136.50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。本研究表明,与以上城市空气中PM₁₀浓度相比,在山东泗水县春季(3—5月)农田近地表空气中PM₁₀浓度也较高(平均值为 $117.06\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。意味着在分析春季区域空气中的PM₁₀浓度变化中,对农田近地表空气中PM₁₀需要高度关注。这些较高的PM₁₀浓度一方面与本地污染物排放、外源输送和沙尘有关,另一方面也与裸露农田地表土壤风蚀扬尘排放有关^[9]。

3.2 环境因子对农田近地表PM₁₀排放影响

农田近地表空气中PM₁₀浓度变化受污染源排放、环境因子等的综合影响^[46]。山东泗水县春季(3—5月)农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度波动性较大($16.67\sim333.33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),这与风速、气温、相对湿度、5 cm土壤温度和湿度因子综合影响有关。在污

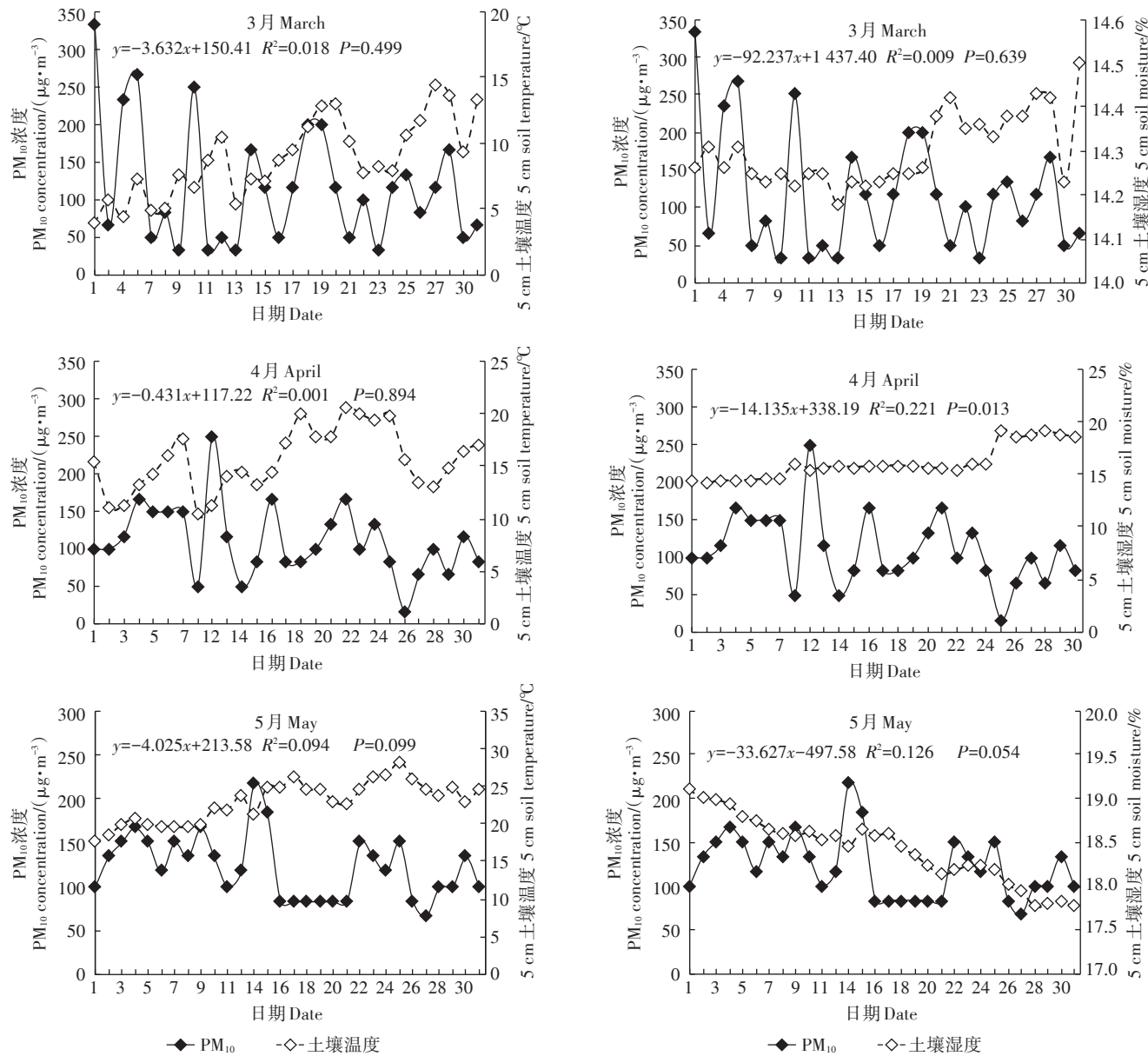


图2 PM₁₀浓度和土壤因素的变化特征

Figure 2 Changes in the PM₁₀ concentrations and soil factors

表3 PM₁₀浓度与环境因素多元线性回归方程参数

Table 3 Parameters of multiple linear regression equation of the PM₁₀ concentrations with environmental factors

变量 Variable	非标准化回归系数β	标准化回归系数β*	概率P
常数 Constant	106.420		0.271
风速 Wind speed	-12.942	-0.238	0.022
气温 Air temperature	5.400	0.313	0.125
相对湿度 Air relative humidity	0.730	0.154	0.143
5 cm 土壤温度 5 cm soil temperature	-5.831	-0.437	0.124
5 cm 土壤湿度 5 cm soil humidity	0.678	0.019	0.913

染源强度和分布相对稳定的条件下,气象因子对空气中PM₁₀浓度变化起主导作用^[13],但不是单一因子影

响,而是多种因子的共同作用^[13]。风是空气中PM₁₀稀释扩散和输送最重要的动力

表4 PM₁₀浓度与环境因素多元线性逐步回归方程已排除变量参数

Table 4 Parameters of stepwise multiple linear regression equation has excluded variable of the PM ₁₀ concentrations with environmental factors				
变量 Variables	标准化回归系数β*	概率 P	偏相关 Partial correlation	共线性统计量/容差 Collinearity statistics/Tolerance
气温 Air temperature	0.020	0.815	0.020	0.960
相对湿度 Air relative humidity	0.115	0.281	0.119	0.949
5 cm 土壤温度 5 cm soil temperature	-0.074	0.485	-0.077	0.987
5 cm 土壤湿度 5 cm soil humidity	-0.110	0.299	0.115	0.978

表5 PM₁₀浓度与环境因素多元线性逐步回归方程参数

Table 5 Parameters of stepwise multiple linear regression equation of the PM ₁₀ concentrations with environmental factors			
变量 Variable	非标准化回归系数 β	标准化回归系数 β*	概率 P
常量 Constant	150.420		<0.001
风速 Wind speed	-16.824	-0.323	0.003

因子^[28]。风速变化直接决定近地表空气中PM₁₀浓度变化^[31]。本研究表明,山东泗水县春季(3—5月)农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与风速呈显著负相关和指数函数关系($P<0.001$),这与赵晨曦等^[32]和Kim等^[28]研究结果相似。说明春季大风多有利于农田近地表空气中PM₁₀稀释扩散。另外,与4月和5月相比,3月农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与风速呈显著负相关和指数函数关系,可能因为3月农田地表裸露程度高,风速对裸露程度高的农田土壤风蚀扬尘PM₁₀排放和近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化影响更大。

本研究表明,山东泗水县春季(3—5月)农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与气温线性关系并不显著。但是,PM₁₀浓度变化与气温的S曲线函数关系却达到显著水平($P<0.01$)。这可能与空气对流活动有关。在春季大气环流背景下,山东泗水县农田近地表气温变化不足以改变大气湍流运动和垂直对流变化的影响,而近地表气温较高却反而与冷空气活动少、大气较稳定直接相关^[49]。

有研究发现,空气中PM₁₀浓度变化与空气相对湿度Pearson正相关系数达到显著水平^[32]。本研究表明,山东泗水春季(3—5月)农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与空气相对湿度二次函数关系达到显著水平。这可能由于水汽对PM₁₀具有吸附作用而引起空气中PM₁₀浓度增加所致。湿度越大越有利于农田近地表空气中PM₁₀凝聚和成核,从而使空气中

PM₁₀浓度升高(未发生沉降情况下),但当超过阈值后则呈负相关关系,因重力作用质量较大的PM₁₀易发生湿沉降,使空气中PM₁₀浓度降低^[29]。另外,本研究也表明,与4月和5月相比,3月农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与相对湿度呈显著负相关和倒数函数关系($P=0.01$)。这可能与3月气温回升较快造成空气干燥及相对湿度大幅降低有关。

本研究表明,山东泗水县春季(3—5月)农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与5 cm土壤温度相关系数和线性回归关系都不显著。这可能与土壤温度变化和气温直接相关^[9]。虽然3—5月土壤温度随气温升高而有一定幅度增加,但仍处于较低水平,所以农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与5 cm土壤温度相关系数和线性回归关系并没有达到显著水平。

有研究发现土壤湿度较高使土壤颗粒表面形成水膜层,土壤颗粒受表面水膜静电作用及张拉力和黏聚力约束,不易被风扬起^[9],从而抑制农田土壤风蚀扬尘颗粒物排放^[30]。本研究表明,山东泗水县春季(3—5月)农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与5 cm土壤湿度相关系数和线性回归关系都不显著。这可能因为春季空气中PM₁₀粒径较大,造成水膜静电作用和表面拉张力及黏聚力约束力较小而容易被风扬起。另外,本研究也表明,与3月和5月相比,4月农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与土壤湿度呈显著负相关和S曲线函数关系($P<0.01$),这可能与4月降雨频繁导致土壤湿度较大有关。

3.3 农田近地表PM₁₀排放对空气质量影响

春季农田土壤风蚀扬尘PM₁₀排放潜在输送距离大,对区域尤其对城市区域大气PM₁₀浓度具有一定的贡献。Ge等^[50]研究发现新疆艾比湖地区土壤风蚀扬尘输送路径具有明显季节差异,在春夏两季达到最大输送距离(影响我国整个北方空气中颗粒物浓度,轨迹从中亚延伸到朝鲜半岛和俄罗斯东部,甚至到达

日本北部并进入北太平洋),在秋冬季,输送距离在1 km以下;Zhu等^[51]基于向后运动轨迹分析方法对北京PM₁₀浓度输送路径进行分析发现,2003—2009年春季蒙古南部、内蒙古西部和黄土高原等地往北京输送PM₁₀频率最高;韩旸等^[52]评估裸土风蚀型开放源扬尘对城市空气颗粒物影响发现,PM₁₀起尘量对城区空气中颗粒物平均贡献值为41.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。本研究表明,在春季受风等多种环境因子综合作用下,农田土壤风蚀扬尘对近地表空气中PM₁₀浓度有一定的影响。

需要指出,山东泗水县春季典型农田近地表80 cm处空气中的PM₁₀浓度变化是多种环境因子综合作用的结果。特别是风速对春季农田近地表空气中PM₁₀浓度变化影响涉及了两方面的过程,一方面风速增大使近地表空气中PM₁₀浓度降低,另一方面风速增大也使土壤风蚀扬尘和沙尘增多而使近地表空气中PM₁₀浓度增多。此外,陈卫卫^[53]总结发现农田PM₁₀排放也受到春耕期机械扰动、耕作方式(如翻耕、耙地、播种、撒播粪肥以及控制杂草和害虫的烧地等)、田间管理(除草、喷杀虫剂、施肥、灌溉等)、土壤质地(有机质含量、团粒粒度和稳定性等)、作物类型的影响。另外,本地污染物排放与外源输送、烟尘悬浮物及其他气态污染物等也对农田近地表空气中PM₁₀浓度变化有影响。这使本研究结论会存在一定误差。此外,本研究只是在山东泗水县进行了2019年春季观测,结论是否适用于其他年份及地区,还需要更多试验去明确。目前空气中颗粒物浓度观测研究还集中在城市和工业污染地区,对农田近地表空气中PM₁₀浓度观测研究还较少。本研究开展的典型农田近地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系的分析结果,对确定农田土壤风蚀扬尘PM₁₀排放对大气环境的影响及科学制定防控对策能提供一定的参考依据,对相关研究具有一定的参考价值。

4 结论

(1)在春季,山东泗水县农田近地表空气中PM₁₀污染不容忽视。相比相关城市空气中PM₁₀浓度,农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度也不低。

(2)在春季,山东泗水县典型农田近地表80 cm处空气中PM₁₀浓度变化与风速相关性最高,与相对湿度、气温、5 cm土壤温度和土壤湿度的相关性其次。同时,PM₁₀浓度变化与环境因子非线性关系也达到显著水平。

(3)在春季,山东泗水县农田近地表80 cm处空

气中PM₁₀浓度变化受风速的影响最大。

(4)在春季,在风等多种环境因子综合作用下,农田土壤风蚀扬尘对近地表空气中PM₁₀浓度产生一定影响。控制土壤风蚀扬尘PM₁₀排放,对治理大气PM₁₀污染有重要的意义。

参考文献:

- [1] 田刚, 黄玉虎, 樊守彬, 等. 扬尘污染控制[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
TIAN Gang, HUANG Yu-hu, FAN Shou-bin, et al. Dust pollution control[M]. Beijing: China Environment Press, 2013.
- [2] Panda S, Nagendra S M S. Chemical and morphological characterization of respirable suspended particulate matter (PM₁₀) and associated health risk at a critically polluted industrial cluster[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(5): 791–803.
- [3] Zhao H J, Che H Z, Zhang X Y, et al. Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2013, 4(4): 427–434.
- [4] Shaughnessy W J, Venigalla M M, Trump D. Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 102–111.
- [5] Xu H, Xiao Z M, Chen K, et al. Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 280–293.
- [6] Xu L Z, Batterman S, Chen F, et al. Spatiotemporal characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ at urban and corresponding background sites in 23 cities in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 2074–2084.
- [7] Panebianco J E, Mendez M J, Buschiazio D E. PM₁₀ emission, sand-blasting efficiency and vertical entrainment during successive wind-erosion events: A wind-tunnel approach[J]. *Boundary-layer Meteorology*, 2016, 161(2): 335–353.
- [8] Avecilla F, Panebianco J E, Buschiazio D E. A wind-tunnel study on saltation and PM₁₀ emission from agricultural soils[J]. *Aeolian Research*, 2016, 22: 73–83.
- [9] 姬亚芹, 单春艳, 王宝庆. 土壤风蚀原理和研究方法及控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
JI Ya-qin, SHAN Chun-yan, WANG Bao-qing. Principles and research methods of soil wind erosion and control technology[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] Hoffmann C, Funk R. Diurnal changes of PM₁₀-emission from arable soils in NE-Germany[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 117–127.
- [11] Perrone M R, Vecchi R, Romano S, et al. Weekly cycle assessment of PM mass concentrations and sources, and impacts on temperature and wind speed in Southern Italy[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 218: 129–144.
- [12] Łowicki D. Landscape pattern as an indicator of urban air pollution of particulate matter in Poland[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 97: 17–24.

- [13] Tiwari S, Tunved P, Hopke P K, et al. Observations of ambient trace gas and PM₁₀ concentrations at Patna, Central Ganga Basin during 2013–2014: the influence of meteorological variables on atmospheric pollutants[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 180: 138–149.
- [14] Todd M C, Cavazos–Guerra C. Dust aerosol emission over the Sahara during summer time from Cloud–Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) observations[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 128: 147–157.
- [15] Kontos S, Liora N, Giannaros C, et al. Modeling natural dust emissions in the central Middle East: Parameterizations and sensitivity[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 190: 294–307.
- [16] Chen S Y, Jiang N X, Huang J P, et al. Estimations of indirect and direct anthropogenic dust emission at the global scale[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 200: 50–60.
- [17] Kontos S, Liora N, Giannaros C, et al. Modeling natural dust emissions in the central Middle East: Parameterizations and sensitivity[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 190: 294–307.
- [18] Masoumi A, Laleh E, Bayat A. Optical and physical properties, time-period, and severity of dust activities as a function of source for the main dust sources of the Middle East[J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2019, 185: 68–79.
- [19] Chen W W, Tong D, Zhang S C, et al. Temporal variability of atmospheric particulate matter and chemical composition during a growing season at an agricultural site in northeastern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 38: 133–141.
- [20] Masoumi A, Laleh E, Bayat A. Optical and physical properties, time-period, and severity of dust activities as a function of source for the main dust sources of the Middle East[J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2019, 185: 68–79.
- [21] Jury M R. Climatic modulation of early summer dust emissions over West Africa[J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 152: 55–68.
- [22] Zhai L, Sun Z B, Li Z M, et al. Dynamic effects of topography on dust particles in the Beijing region of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 213: 413–423.
- [23] Van Pelt R S, Baddock M C, Zobeck T M, et al. Total vertical sediment flux and PM₁₀ emissions from disturbed Chihuahuan Desert surfaces[J]. *Geoderma*, 2017, 293: 19–25.
- [24] Gao F, Feng G, Sharratt B, et al. Tillage and straw management affect PM₁₀ emission potential in subarctic Alaska[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144: 1–7.
- [25] Avecilla F, Panebianco J E, Buschiazzo D E. A wind-tunnel study on saltation and PM₁₀ emission from agricultural soils[J]. *Aeolian Research*, 2016, 22: 73–83.
- [26] Kang J Y, Tanaka T Y, Mikami M. Effect of dead leaves on early spring dust emission in East Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 86: 35–46.
- [27] Avecilla F, Panebianco J E, Mendez M J, et al. PM₁₀ emission efficiency for agricultural soils: Comparing a wind tunnel, a dust generator, and the open-air plot[J]. *Aeolian Research*, 2018, 32: 116–123.
- [28] Kim D, Chin M, Remer L A, et al. Role of surface wind and vegetation cover in multi-decadal variations of dust emission in the Sahara and Sahel[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 148: 282–296.
- [29] Csavina J, Field J, Félix O, et al. Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 82–90.
- [30] Aimar S B, Mendez M J, Funk R, et al. Soil properties related to potential particulate matter emissions (PM₁₀) of sandy soils[J]. *Aeolian Research*, 2012, 3(4): 437–443.
- [31] 于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 降水和风对大气PM_{2.5}、PM₁₀的清除作用分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4620–4629.
- YU Cai-xia, DENG Xue-liang, SHI Chun-e, et al. The scavenging effect of precipitation and wind on PM_{2.5} and PM₁₀[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12): 4620–4629.
- [32] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418–427.
- ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 418–427.
- [33] 王剑, 徐美, 叶霞, 等. 沧州市冬春季PM₁₀污染特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 46–51.
- WANG Jian, XU Mei, YE Xia, et al. The pollution characteristics and influencing factors of PM₁₀ mass concentration in winter and spring at Cangzhou City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(7): 46–51.
- [34] 高建华, 张承中, 王颖钊, 等. 陕西中北部农田地表粉尘释放影响因素研究[J]. 西北农业学报, 2010, 19(11): 203–206.
- GAO Jian-hua, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ying-zhao, et al. Effect of various factors on dust emission in central-north Shaanxi[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(11): 203–206.
- [35] 南岭, 董治宝, 肖锋军. 农牧交错带农田土壤风蚀PM₁₀释放特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1079–1084.
- NAN Ling, DONG Zhi-bao, XIAO Feng-jun. Characteristic of PM₁₀ emission of cultivated soil in ecotone between agriculture and animal husbandry[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(6): 1079–1084.
- [36] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, et al. The impact of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012–2020[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 197–209.
- [37] Zhang H Y, Cheng S Y, Li J B, et al. Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 244: 495–502.
- [38] Song H Q, Zhang K S, Piao S L, et al. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 126: 117–127.
- [39] 刘奥博, 吴其重, 陈雅婷, 等. 北京市平原区裸露地风蚀扬尘排放量[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 471–477.
- LIU Ao-bo, WU Qi-zhong, CHEN Ya-ting, et al. Estimation of dust

- emissions from bare soil erosion over Beijing plain area[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(2):471-477.
- [40] Bi J R, Huang J P, Shi J S, et al. Measurement of scattering and absorption properties of dust aerosol in a Gobi farmland region of North-Western China: A potential anthropogenic influence[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17:1-41.
- [41] 吴建国, 徐天莹. 气候变化对河北坝上地区草地土壤风蚀扬尘季节和年排放速率的影响[J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(3):68-78.
- WU Jian-guo, XU Tian-ying. Effects of climate change on emission rate of dust of grassland soil by wind erosion in Bashang area, Hebei Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, 35(3):68-78.
- [42] 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 等. 济宁市近地表大气降尘地球化学特征及污染源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1):40-48.
- DAI Jie-rui, ZHU De-cheng, PANG Xu-gui, et al. Geochemical characteristics and pollution sources identification of the near-surface atmosphere dust-fall in Jining[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1):40-48.
- [43] 郝晋珉. 黄淮海平原土地利用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- HAO Jin-min. Land use in Huanghuaihai Plain[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.
- [44] 顾庭敏. 华北平原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991:202-236.
- GU Ting-min. Climate of North China Plain[M]. Beijing: Meteorological Press, 1991:202-236.
- [45] 济宁市土壤肥料工作站. 济宁市土壤[M]. 济南: 山东省地图出版社, 1990.
- Jining Soil and Fertilizer Workstation. Soil of Jining[M]. Jinan: Shandong Province Map Press, 1990.
- [46] Kasumba J, Holmén B A, Hiscox A, et al. Agricultural PM₁₀ Emissions from cotton field disking in Las Cruces, NM[J]. *Atmospheric environment*, 2011, 45(9):1668-1674.
- [47] 刘仁权. SPSS统计分析教程[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2016.
- LIU Ren-quan. SPSS statistical analysis tutorial[M]. Beijing: China Traditional Chinese Medicine Press, 2016.
- [48] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 北京地区不同季节 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度对地面气象因素的响应[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(2):34-41.
- WANG Yan-ran, ZHANG Xue-xia, ZHAO Jing-yao, et al. Study on the response of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations to the ground meteorological conditions in different seasons in Beijing[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(2):34-41.
- [49] Meng C, Cheng T H, Gu X F, et al. Contribution of meteorological factors to particulate pollution during winters in Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656:977-985.
- [50] Ge Y, Abuduwaili J, Ma L, et al. Potential transport pathways of dust emanating from the playa of Ebinur Lake, Xinjiang, in arid northwest China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 178:196-206.
- [51] Zhu L, Huang X, Shi H, et al. Transport pathways and potential sources of PM₁₀ in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(3):594-604.
- [52] 韩旻. 裸土风蚀型开放源起尘对城市空气颗粒物的影响评估[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(10):5-8, 14.
- HAN Yang. Effect of open source blowing dust resulting from wind erosion of bare soil on urban ambient air particulate matter[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010, 32(10):5-8, 14.
- [53] 陈卫卫. 农业土壤耕作大气颗粒物排放研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7):1225-1232.
- CHEN Wei-wei. Research progress in atmospheric particulate matter emissions from agricultural tillage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1225-1232.