

农业土壤耕作大气颗粒物排放研究进展

陈卫卫

(中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102)

摘要:大面积农业活动中释放的颗粒物可能会显著影响其所在地及所在区域的空气质量。我国是农业大国,了解各农业区不同生产环节的颗粒物排放状况是编制国家农业源排放清单和探索减控措施的基础。通过综述近几十年来国内外关于农业土壤耕作造成的大气颗粒物排放的研究进展,对农业耕作产生的颗粒物组成、影响因素、排放清单编制以及模型模拟进行了归纳,重点讨论了清单编制中排放系数的问题,提出了今后我国农业人为源大气颗粒物排放研究需要加强的几方面内容。

关键词:气溶胶;PM_{2.5};PM₁₀;空气质量;整地;收割

中图分类号:X513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)07-1225-08 doi:10.11654/jaes.2015.07.001

Research Progress in Atmospheric Particulate Matter Emissions from Agricultural Tillage

CHEN Wei-wei

(Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130102, China)

Abstract: Agricultural activities in vast farmlands may profoundly affect local or regional air quality. China is a large agricultural country. Deep understanding of particulate matter (PM) emissions from different field operations is helpful to support air quality modeling and to develop suitable mitigation strategies. In this paper, we reviewed the recent advances in the research on soil aerosol or mineral dust emissions during field tillage and crop harvest processes. These two operations were identified to be two largest anthropogenic approaches of agricultural PM emissions by accident. Under mechanical disturbances, soil particles could be disintegrated and entrained to in the air, especially particle diameter less than 10 μm (i.e., PM₁₀). Three aspects were discussed here. First, various factors influencing PM₁₀ emissions during the two processes were analyzed, including tillage and harvest methods, soil texture, soil moisture content and surface wind speed as well as crop types. Second, bottom-to-up estimate methods of PM₁₀ and PM_{2.5} inventory compiling and their advantages and disadvantages were summarized and discussed. Third, field measurements of emission factor (EF) and best choice for agricultural PM inventory were described. In addition, major control measures to reduce soil aerosols from field tillage or crop harvest were presented. Finally, future research on agricultural particulate matter emissions in China is proposed.

Keywords: aerosol; PM_{2.5}; PM₁₀; air quality; land preparation; harvest

大气气溶胶对区域灰霾和气候变化的作用是当前科学研究的热点之一^[1-3]。气溶胶的排放清单对了解大气污染状况和预测未来污染趋势都有重要作用,其可靠性则是决定空气质量或气候模型模拟准确性的基础。为了准确评估气溶胶的气候和环境效应,必须减小气溶胶排放源的不确定性。

土壤气溶胶是大气气溶胶的主要成分之一。土壤气溶胶(或称矿物尘)在大气颗粒物 PM₁₀(空气动力学

直径小于 10 μm)质量浓度中所占的比例一般为 5%~20%^[4]。在某些区域或者特定的气象条件下,土壤气溶胶对大气中 PM₁₀ 的贡献可能更高^[5-7]。土壤气溶胶有多种来源,比如裸露土壤的风蚀、农业土地管理、未铺路面的车辆行驶、路面扬尘的再悬浮、道路的磨损、搬运处理的物料及建筑活动等。尽管土壤气溶胶是大气 PM₁₀ 的重要组成部分,然而目前对它的来源了解还很少。一方面是由于其中很多土壤气溶胶排放源被定义为自然源(例如土壤风蚀),其他(例如再悬浮的尘)并未被辨识为主要的排放源,而是被认为是现存排放源的再排放。另一方面,很多排放源的示踪物(例如矿物元素)是一样的,区分不同源的贡献也很困难。因此,土壤气溶胶仍然是理解大气气溶胶组成的一个很大

收稿日期:2015-02-11

基金项目:国家自然科学基金(41205106, 41275158)

作者简介:陈卫卫(1983—),男,河南焦作人,博士,副研究员,从事农业源大气污染物排放清单及数值模拟研究。

E-mail: chenweiwei@iga.ac.cn

的不确定性因素。此外,很多土壤气溶胶排放源或者半自然的源并没有编制成排放清单或者被正确地反映在排放清单之中,造成了观测数据和模型模拟的颗粒物浓度值常有很大差异。

农业耕作、收割环节和农田风蚀是农业源气溶胶排放的重要组成部分(图1)^[8],同样也是土壤气溶胶或颗粒物的重要来源,这个过程中所释放的各类气溶胶及粉尘不仅会改变当地农业区的大气环境,甚至会造成区域尺度的大气污染,特别是在农业活动强度大和沙尘天气频繁的地区^[9-13]。耕作过程本身会增加扬尘的发生频率和数量,而耕作过或者放牧过的土壤所产生的大气颗粒物的传输已经是一个全球的问题^[14]。目前对于农田的风蚀过程已经有了大量研究,然而对于农业土壤耕作过程中颗粒物排放的研究还很缺乏^[15]。在美国中西部地区及加利福尼亚州有较多农业颗粒物排放的研究报道^[16-19]。此外,德国、比利时和加拿大也有部分的农田颗粒物排放的报道^[20-23]。本文综述了世界各地农业土壤耕作颗粒物排放的最新进展与结果。

1 农业土壤耕作颗粒物排放概况

如图1所示,农田的悬浮颗粒物排放主要是农田风蚀、田间耕作和作物收割过程中一次源排放^[22]。根据粒径组成,悬浮的颗粒物主要部分是沙粒(空气动力学直径大于 $20\text{ }\mu\text{m}$)、尘粒(直径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下)、粉尘(直径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$,又称 PM_{10})。农田风蚀主要是在自然风力下发生的,而田间耕作和收割属于机械扰动,会使土壤颗粒崩解及夹带而悬浮到大气中,特别是粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物。这些颗粒物主要是由土壤源矿物质和植物源有机质粉尘形成的组合成分^[24]。颗粒物越细,其在低空大气中的停留时间越长,传输也越容易。目前的研究开始着重关注农田表层土壤所释

放的细颗粒物,无论是在农田耕作区域内或者区域之外的地区^[25]。这是因为大量的养分、有机质和其他土壤组成(比如杀虫剂和污染物)能结合或者吸附在细颗粒物上,与表层土壤总量相比,这些成分在细颗粒物中的含量可能要比其他部分高出10倍。其次,来源于农田的颗粒物包含了许多微生物,例如病毒、细菌、线虫和孢子等,这些微生物可能会随着颗粒物被输送到很远的地方。另外,农田风蚀产生的细颗粒物排放在一年之中可能会持续发生。

与农田风蚀相比,田间耕作管理中的颗粒物排放往往只发生几天到几周,然而其产生的大气颗粒物排放有可能是风蚀的数倍^[26]。欧洲的研究表明,田间土壤耕作和作物收割过程中农业机械扰动产生的颗粒物排放占农田总排放量的80%以上^[24],而来自于农业土壤的颗粒物排放是其国家和地区 PM_{10} 的主要来源^[26]。在美国加州圣金谷地(The San Joaquin Valley),农田排放占2001年当地 PM_{10} 排放总量的23%,是第二大贡献源^[27]。在我国北方城市中,土壤尘和路面扬尘之和占 PM_{10} 排放总量的30%~50%^[7]。这说明农业田间的耕作与农田风蚀一样是土壤颗粒物排放的一个重要机制。

2 影响土壤耕作颗粒物排放的因素

农田耕作产生颗粒物的排放主要取决于耕作方式和工具(有源还是无源;混合或翻耕、翻耕深度和运行速度等)、土壤类型(沙粒、粉粒和粘粒的含量)、土壤湿度(由土壤类型和天气决定)和作物类型(比如麦类和棉花)^[28]。

2.1 耕作方式

增加田间颗粒物排放的耕作方式包含翻耕、耙地、镇压、播种、扦插、除草、喷杀虫剂、施肥、刈草、堆垛、撒播粪肥以及控制杂草和害虫的烧地等。这些耕

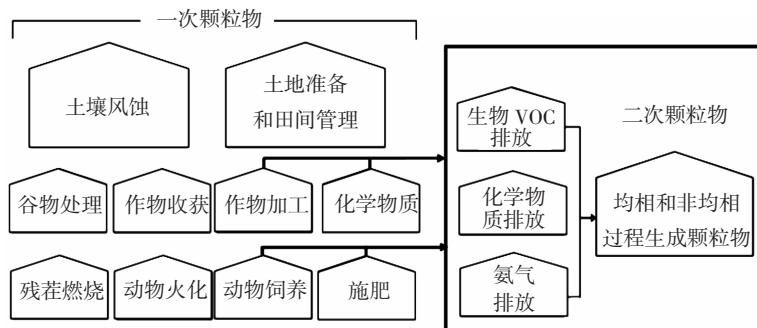


图1 农业源大气颗粒物排放基本框架^[8]

Figure 1 Framework of agricultural particulate matter emissions

作方式由于使用机械和工具并直接接触土壤和植物,容易使细颗粒物悬浮到空气中。整地环节是主要的颗粒物排放环节,占有操作颗粒物排放的 67%,且可以产生 82%的可吸入颗粒物;耕作和收割环节占有操作颗粒物排放的 33%,产生 18%的可吸入颗粒物^[29-30]。田间接地能产生更多细颗粒物的原因是该操作对土壤干扰更大,并且大多在土壤湿度比较低的情况下进行。在美国,土地平整被认为是容易产生颗粒物的操作,土壤深翻和深耕要小于土地平整,除草和扦插的颗粒物排放潜力最小。在整地过程中,农业机械类型、运行速度及机械设备的尺寸也会影响对表层土壤的干扰程度,从而影响颗粒物的释放速度。收割环节主要和作物类型有很大关系,一般麦类和棉花收割具有较高的颗粒物排放潜力^[31-32]。

2.2 土壤质地

一般来说,土壤 PM_{10} 的排放随着粉粒和粘粒含量的增加而增加,随着沙粒含量的增加而减少^[33-34]。研究表明,即使在相同的土壤质地等级情况下,颗粒物或者尘的排放量也有很大差异^[35-36]。这些差异的原因可能是由于土壤有机质含量、团粒粒度和稳定性的差异造成的,但是颗粒物排放量和这些参数并没有归纳出显著相关性。作为土壤分类中更常见的两个参数,土壤质地的比例和有机质含量可以作为农田土壤 PM_{10} 排放潜力的指标^[17,37]。粉粒含量高和土壤有机质含量低更利于在机械扰动情况下土壤细颗粒物向大气中释放。

2.3 土壤湿度

土壤湿度是农业土壤耕作颗粒物排放的最重要的影响因素^[37-38]。越湿的土壤越有利于土壤颗粒的结合,增加颗粒向空气中释放的难度。Clausnitzer 等^[39]报道耕作引起的 PM_4 浓度($g \cdot g^{-1}$)在 2%到 14%范围内,并随着土壤湿度增加呈幂函数减少。Wang 等^[17]最新总结认为,土壤耕作产生的 PM_{10} 颗粒物的排放系数与土壤湿度呈指数递减关系,当表层土壤湿度接近 0 时, PM_{10} 的排放系数达最大值,而当土壤湿度超过 33%时,排放系数接近 0。一个地区的土壤湿度主要取决于降雨状况、土壤质地、容重及作物的种植方式,这造成了土壤湿度的变化具有很大的时空性。在气候湿润的地区,农用机械扰动造成田间颗粒物排放量会较少,而干旱和半干旱地区排放量会大增^[23]。

2.4 风速

风的强度是自然状况下土壤起沙的主要驱动因子^[25]。相似的风速下,自然起沙过程需要较高的风速,而在人为机械扰动下,较低的风速就可以加速农田土

壤悬浮颗粒物的释放。Kasumba 等^[18]发现无论哪种耕作方式,土壤 PM_{10} 的排放系数均随风速的增加而指数增加。相同的耕作方式下,风速为 $5 m \cdot s^{-1}$ 时的 PM_{10} 排放系数是风速为 $2 m \cdot s^{-1}$ 时的 3.5 倍,风速增加明显增大了农业土壤耕作排放源的强度。此外,风速增加利于悬浮在农田上空的颗粒物快速地进行扩散,从而影响周边地区的空气质量。

2.5 作物类型

作物类型对农业耕作颗粒物释放的影响主要体现在对耕作方式、作物收割以及对土壤参数的影响三个方面。不同的作物类型决定了其特有的土壤整地条件、耕作措施的次数以及耕作和收割的时期,而这些会造成作物田间土壤扰动、质地、湿度以及耕作时期内风速的差异。在同一种耕作方式(比如用圆盘耙耙地)和相似的土壤质地条件下,小麦地里的 PM_{10} 排放最高,土豆地次之,棉花地最小^[17]。造成这些差异的主要原因可能是不同作物的土壤根系和残茬不同,根系较小和残茬较少的田地容易产生更多的排放。长期种植特定的作物同样会影响土壤质地、有机质含量以及土壤的容重,从而间接影响土壤颗粒物或者收割时期植物体表面的颗粒物(灰尘、花粉及微生物)的释放速度。

3 耕作和收割环节 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放量估算

基于农田颗粒物排放系数来估算排放量是美国、加拿大和欧洲大气环境污染制定者确定年排放清单的主要方法^[31,33,40],因此确定农田颗粒物年排放系数是编制清单的关键环节。排放系数指单位时间内单位农田面积上产生的大气颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)排放量,农田颗粒物的年排放量为该作物农田颗粒物年排放系数(EF)和种植面积的乘积。目前,欧美国家区域和国家尺度农业颗粒物排放清单编制主要借鉴美国环保局(EUSEPA)发布的 AP-42(Air Pollutant Emission Factors)方法^[33]、CARB(California Air Resources Board, CARB, 2003)方法^[32]和欧洲环境部(EEA)推荐的方法^[31]以及一些学者提供的方法进行估算。

3.1 EPA AP-42 方法

在 AP-42 方法中,农业耕作 PM_{10} 的排放系数是以土壤质地为自变量的乘幂函数(参见下文公式 1)。该公式在 1983 年由美国中西部研究所(Midwest Research Institute)提出,随即被 AP-42 方法的第四版采用。由于没有考虑具体的农耕措施,AP-42 方法已逐渐被 CARB 提供的方法所取代,并应用于美国很多地

区颗粒物排放估算。

3.2 CARB 方法

CARB 方法考虑了不同耕作措施所产生的 PM_{10} 排放的差异。农耕操作的 PM_{10} 排放系数最初来自于加利福尼亚大学的一个研究报告,后经决策者、科研工作者和产业代表共同讨论后,结合科学实用性、一般经验和实际观测,最终调整为现有 5 种类型的农耕操作 PM_{10} 排放系数(表 1)^[41]。此外,该方法也提供了整地和耕作操作的 $PM_{2.5}$ 排放系数,主要是通过对应农耕方式 PM_{10} 的排放系数和颗粒物中 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值(0.15)来计算。对于其他 30 多种常规的农业耕作方式,每种具体耕作措施的排放系数采用与其最相似的操作所对应的排放系数进行最佳拟合得到。年排放系数为单位面积上不同耕作活动措施排放系数的加权值总和(图 2)。该方法认为整地过程中一些不同操作措施(比如圆盘耙地、耕种、松土)具有相同水平的排放,不考虑农作物的类型,并且整地过程的排放系数不随地区间地理条件的差异而变化。

3.3 EEA 方法

欧洲环境部近 10 多年也对排放清单开发比较重视,进行了大量排放系数的测定工作,并于 2009 年专门组织编制了排放源清单开发指南^[31]。欧洲农业颗粒

物排放清单指南中发布了 3 级(层次)评估方法。该指南中,农田颗粒物排放量同样是作物种植面积和耕作对应排放系数的乘积,具体每级简介如下。一级:采用默认的排放系数。 PM_{10} 的排放系数为 $1.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 95%置信区间为 $0.78 \sim 7.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 $PM_{2.5}$ 排放系数为 $0.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 95%置信区间为 $0.03 \sim 0.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[11]。当作物农田不是重要排放源,且没有直接测定数据时,采用该方法提供的默认值。二级:采用测定后发布的经验系数,这是目前应用最广泛的方法。该方法是基于田间测定后所得到的经验值。具体排放计算见下文公式 2;发布的农耕操作排放系数见表 2。三级:采用具体地区实际观测到的排放系数(实际测量法)或者基于过程模型模拟出来的排放系数。由于考虑实际气候条件和农耕操作,如果有具体地区直接的测定数据,编制清单时要尽可能用这些数据来估算颗粒物排放量。具体地区的排放系数也同时应用在不同耕作措施(免耕和保护性耕作等)控制颗粒物排放的研究中。

3.4 综合考虑土壤类型和农业操作的方法

上述三种方法中,AP-42 仅考虑了土壤类型(以粉砂粒含量计),而 CARB 和 EEA 方法尽管考虑了农耕操作的排放系数,但是没有考虑土壤类型。因此,比利时科学家在预测佛兰德斯地区农田总悬浮颗

表 1 农耕操作对应的 PM_{10} 排放系数^[41]

Table 1 PM_{10} emission factors from different agricultural soils during tillage and plant harvest

耕作类型 Operation type		排放系数 Emission factors	
		lbs·acre ⁻¹	mg·m ⁻²
整地 Soil tillage	扦插 Root cutting	0.3	34
	圆盘耙地、耕种、松土 Disking, tilling and chiseling	1.2	135
	底土深耕、深翻 Ripping, subsoiling	4.6	517
	平整土地 Land planning and floating	12.5	1404
	除草 Weeding	0.8	90
收割 Harvest	棉花 Cotton	3.4	385
	杏树 Almond	40.8	4620
	麦类 Wheat	5.8	657

注:排放系数第 1 列以 $\text{lbs} \cdot \text{acre}^{-1}$ (磅·英亩⁻¹)为单位的数据为文献中的原始数值,第 2 列为换算成国际标准单位($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)后的数值。

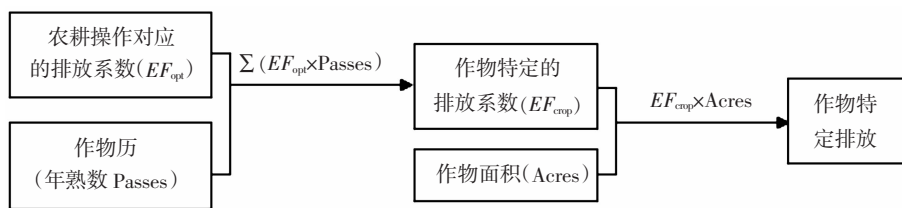


图 2 CARB 方法估算农田颗粒物排放^[41]

Figure 2 Workflow of estimating agricultural PM emissions by CARB method

表 2 欧洲湿润和干旱气候下农田 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放系数^[11](kg·hm⁻²)

Table 2 Emission factors of PM₁₀ and PM_{2.5} from agricultural operations under wet and dry climates in Europe(kg·hm⁻²)

颗粒物 Particulate matter	作物 Crop	湿润气候 Wet climate				干燥气候(地中海区域)Dry climate			
		耕作 Tilling	收割 Harvest	清洁 Cleaning	干燥 Drying	耕作 Tilling	收割 Harvest	清洁 Cleaning	干燥 Drying
PM ₁₀	小麦 Wheat	0.19	0.25	0.49	0.56	2.25	2.45	0.19	0
	黑麦 Rye	0.25	0.37	0.16	0.37	2.25	1.85	0.16	0
	大麦 Barley	0.25	0.41	0.16	0.43	2.25	2.05	0.16	0
	燕麦 Oat	0.25	0.62	0.25	0.66	2.25	3.1	0.25	0
	其他麦类 Other wheat	0.25	NA	NA	NA	2.25	NA	NA	NA
	草地 Grassland	0.25	0.25	0	0	2.25	1.25	0	0
PM _{2.5}	小麦 Wheat	0.015	0.02	0.009	0.168	0.12	0.098	0.009 5	0
	黑麦 Rye	0.015	0.015	0.008	0.111	0.12	0.074	0.008	0
	大麦 Barley	0.015	0.016	0.008	0.129	0.12	0.082	0.008	0
	燕麦 Oat	0.015	0.025	0.012 5	0.198	0.12	0.125	0.012 5	0
	其他麦类 Other wheat	0.015	NA	NA	NA	0.12	NA	NA	NA
	草地 Grassland	0.015	0.01	0	0	0.12	0.05	0	0

颗粒物(TSP)和 PM₁₀ 排放时将两种方法融合起来(参见下文公式 3)^[24]。此外, Penfold 等^[42]直接将 AP-42 方法和 CARB 方法结合开展了美国中部地区农业耕作操作的大气颗粒物排放清单的编制工作(参见下文公式 4)。

$$EF=1.01\ s^{0.6}$$

(1)

式中: EF 是 PM₁₀ 的排放系数(lbs·acre⁻¹); s 是表层土壤(0~10 cm)中粉砂粒部分(粒径小于 75 μm)的百分含量(质量比, g·g⁻¹)。

$$E_{PM}=\sum_{i=1}^I\sum_{n=0}^{N_{i,k}}EF_{PM_{i,k}}\cdot A_i\cdot n$$

(2)

式中: E_{PM} 为第 i 种作物农田 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放量, kg·a⁻¹; I 为年耕种次数; A_i 为第 i 种作物的年耕种面积, hm²; $N_{i,k}$ 为第 k 种耕作活动在每季作物生长过程中的操作次数; $EF_{PM_{i,k}}$ 为第 i 种作物生产过程中第 k 种操作的排放系数, kg·hm⁻²。

$$E=\sum_{i=1}^N(EF_i\times P_i)\times K\times B\times A$$

(4)

式中: E 是每块土地上的 PM₁₀ 排放量, t·a⁻¹; EF_i 是第 i 种农耕操作的排放系数, t·hm⁻²; P_i 为第 i 种操作(如碾压)每年进行的次数; K 是从 TSP 到 PM₁₀ 的转化系数; B 是土壤因子; A 是土地面积, hm²; N 是不同农耕操作的数量。

EF_i 和 P_i 主要使用文献测定的 14 个作物类型^[15,20,23,32,42]。在该模型中, 矿物尘和有机尘的 K 值分别采用 0.35 和 0.20。 B 值根据比利时的土壤分类方法来确定(重粘土, 0.32; 粘土, 0.44; 粉砂, 0.85; 砂壤土, 1.00; 轻砂壤土, 0.85; 壤砂土, 0.66; 砂土, 0.38)。

$$E=c\times k\times s^{0.6}\times p\times a$$

(3)

式中: E 代表每年 PM 的排放量, lbs·a⁻¹; c 采用固定排放系数(4.8 lbs·acre⁻¹); k 代表计算 PM₁₀ ($k=0.21$) 和 PM_{2.5} ($k=0.042$) 时的系数; p 代表每项耕作每年的操作次数; a 代表作物面积, acre。

4 农业耕作颗粒物(PM₁₀ 和 PM_{2.5})排放系数测定方法

目前报道的排放系数研究并不多。 Holmén 等^[16]报道的美国不同耕作方式的 PM₁₀ 排放系数变化范围为 0~800 mg·m⁻²; Bogman 等^[24]评估的比利时农田耕作和收割的 PM₁₀ 排放系数变化范围为 150~230 mg·m⁻²; Qiu 等^[19]报道的加拿大小麦田收割 PM₁₀ 排放系数为 74 mg·m⁻²; Kasumba 等^[18]和 Wang 等^[17]在美国新墨西哥州测定棉花田、小麦田和土豆田 PM₁₀ 排放系数变化范围为 8~488 mg·m⁻²。由此可见, 不同地区土壤质地、水分条件、农作物类型和耕种方式差异增加了排放系数的多样性和不确定性, 同一个生产环节的排放系数变幅可能成倍或者在数量级以上。因此, 在世界各地不同农业区加大对生产环节的颗粒物排放研究, 包括田间排放系数测定、影响因子调查及理化性质分析, 对于提高清单编制的精确性以及改善评估方法(如 AP-42 法)都有重大意义^[17]。

国际上测定农田颗粒物排放的方法主要有三种, 扩散模型法、质量平衡法和示踪技术法^[19]。其中, 扩散模型法使用最多, 也是 EPA 推荐的方法。扩散模型主要基于排放系数和气象数据来预测下风向污染物的浓度, 常在空气污染调控管理中使用。在农田颗粒物

排放中,利用扩散模型、上下风向颗粒物浓度和气象数据,通过反推可获得排放源的排放系数^[43-44]。此外,Hinz等^[45]采用了简易的层状模型和烟羽模型结合田间观测来确定排放系数。以下简要介绍目前在美国应用最广的田间观测法。

Holmén等^[46]详细描述了上下风向排放源隔离和垂直扩散结合来测定农耕措施的颗粒物PM₁₀排放系数的过程,是目前排放系数的田间直接测定的主要依据。该方法中,上风向设置一个颗粒物浓度观测点、下风向设置一个垂直廓线颗粒物浓度观测点(至少3个高度)以及气象要素是必要条件。单个耕作操作颗粒物排放系数由以下公式计算得到:

$$E = \int_{Z_0}^H \frac{U(h)C(h)t\cos\theta}{w} dh \quad (5)$$

式中: E 是排放系数, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; $C(h)$ 是每个高度上PM₁₀浓度差值,即上下风向浓度的差值; $U(h)$ 是水平风速的平均值; Z_0 是地表的粗糙度(0.006 m); H 为烟羽顶部距地面的高度, m,该值利用垂直廓线的数据拟合出来(线性、指数或块状模式),即净PM₁₀浓度外推为0时对应高度; w 为每个测试田块的宽度, m; θ 为测定的风向和垂直田地的角度, ($^\circ$); t 为测试的时间, s。

线性、指数和块状模式获得的排放系数不确定性由误差传递法来评估。PM₁₀浓度测定的不确定性和测试期间每个高度风速的标准偏差用来评估水平的排放通量。

5 农业耕作大气颗粒物排放的减控措施

减控措施主要针对农业耕作和收割环节引起的大气颗粒物排放机制及影响因素(风、土壤、作物系统和湿度)来调节^[45]。

第一,减少强风期耕作,终止夜间耕作,特别是凌晨2:00到早8:00之间。因为高风速和低边界层下的颗粒物滞留是大气中高浓度PM₁₀的主要原因之一。调整耕作时间,精确耕种减少重叠耕种,将土壤对风蚀的敏感性降到最低,因为地表越是光滑、干燥,土壤粒子越细。土壤对风蚀越敏感,就会造成PM₁₀的排放。

第二,使用化学灌溉法,将肥料、杀虫剂和其他农业化学物质通过灌溉系统施入农田,减少田间管理扰动土壤的次数。在土壤播种后尽快灌溉,这样土壤表层会有一层薄的硬壳,可以稳固土壤颗粒物。综合病虫害管理或者采用转基因作物抗病虫害,减少

耕作和种植的操作以及减少土壤干扰,同样也可以减少化学物质的使用。

第三,使用整合机械作业,用一个单独拖拉机或者收割机等同时执行耕作、栽培、种植和收割等作业,从而减少耕作和收割的趟数。改进耕作设备,阻止和减少农田颗粒物的产生,比如改进挡板和导流板,将废气引向上风向,使颗粒物不能向下风向释放;还可以增加灰尘收集袋,或者在整地机械后加装一个喷杆喷水雾阻止PM₁₀排放。

第四,保护性耕作是一种减少土壤扰动强度和次数的很好方式。我国的一些研究表明,保护性耕作能够减轻农田风蚀扬尘PM₁₀的排放^[46-47],比如低茬地、粉碎秸秆覆盖地、直立秸秆地PM₁₀发生量比翻耕地分别减少41%、69%和77%。

6 展望

我国是农业大国,耕地面积占国土总面积约14%,其中很多地区属于干旱和半干旱地区,因此农业耕作所产生的大气颗粒物排放潜力很大。然而,由于我国农业生产区气候类型复杂,土壤类型、耕作制度和管理方式多样以及机械化程度与欧美国家的差异,直接套用发达国家所提供的农田颗粒物排放评估方法和系数会产生很大不确定性。尽管我国对于土壤风蚀产生的颗粒物已有一些报道,但是对于农业耕作过程颗粒物排放的报道较少^[7,48]。现有区域大气主要颗粒物排放源调查和排放清单研究中很少全面地考虑农业生产过程中的颗粒物排放^[7,49-50]。因此,结合目前公众关注的大气环境问题以及土壤退化问题,提出三个需要加强的研究方向:一是了解我国主要农业区大气环境质量状况、影响因子及大气颗粒物的主要来源,这有利于深化区域大气复合污染;二是明确农业源大气颗粒物排放源框架下各环节的颗粒物排放机制、关键参数和排放量,建立精确的农业源排放清单,开发农业源大气颗粒物排放模型,这有利于提高空气质量模型模拟的准确性,并为减控环节提供支持;三是春耕期机械扰动及耕作后的土壤风蚀会一定程度地引起土壤表层有机质的流失,必须深化大气环境和土壤保护的综合作业,加深保护性耕作对两者的综合影响。

参考文献:

- [1] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al., Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze

- distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12:779–799.
- [2] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9:4081–4139.
- [3] Aneja V P, Schlesinger W H, Erisman J W. Effects of agriculture upon the air quality and climate: Research, policy, and regulations [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(12):4234–4240.
- [4] Goossens D, Riksen M. Wind erosion and dust dynamics: Observations, simulations modeling[M]. Netherlands: ESW Publications, 2004: 7–14.
- [5] Hinz T, Tamoschat-Depolt K. Particulate matter in and from agriculture [M]. Braunschweig: Landbauforschung Völkenrode, 2002: 1–7.
- [6] Nordstrom K F, Hotta S. Wind erosion from cropland in the USA: A review of problems, solutions and prospects[J]. *Geoderma*, 2004, 121(3–4): 157–167.
- [7] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, 5: 15–19.
- HU Min, TANG Qian, PENG Jian-fei, et al. Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2011, 5: 15–19.
- [8] Pattey E, Qiu G. Primary particulate matter emissions from Canadian agriculture[C/OL]//A&WMA International Specialty Conference: Leapfrogging Opportunities for Air Quality Improvement. 9–14 May 2010, Xi'an, China. [2014–12–10]. https://www.dri.edu/images/stories/editors/leapfrog/techprog/Ila_6_Pattee.pdf.
- [9] 赵鹏, 朱彤, 梁宝生, 等. 北京郊区农田夏季大气颗粒物质量和离子成分谱分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 193–199.
- ZHAO Peng, ZHU Tong, LIANG Bao-sheng, et al. Characteristics of mass distributions of aerosol particle and its inorganic water-soluble ions in summer over a suburb farmland in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 193–199.
- [10] 康富贵, 李耀辉. 近 10 a 西北地区沙尘气溶胶研究综述[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 144–150.
- KANG Fu-gui, LI Yao-hui. Review of study on dust aerosol in North-west China[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(2): 144–150.
- [11] Hinz T, Funk R. Particle emissions of soils induced by agricultural field operations[C/OL]//Dust Conf 2007, International Conference Maastricht[2014–12–21]. <http://www.sortsites.com/www.dustconf.org>.
- [12] Baker J B, Southard R J, Mitchell J P, et al. Agricultural dust production in standard and conservation tillage systems in the San Joaquin Valley[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(4): 1260–1269.
- [13] Holmén, B A, Miller D R, Hiscox A L, et al. Near-source particulate emissions and plume dynamics from agricultural field operations[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2007, 59(2): 117–134.
- [14] Nordstrom K F, Hotta S. Wind erosion from cropland in the USA: A review of problems, solutions and prospects[J]. *Geoderma*, 2004, 121(3–4): 157–167.
- [15] Hinz T. Agricultural PM₁₀ emission from plant production. Proceedings of the PM emission inventories scientific workshop 2001[EB/OL]. [2014–12–21]. <http://tfeip-secretariat.org/assets/Meetings/Documents/Previous-Meetings/Italy-Oct-2004/0411AgriculturalPM10Emissions-fromPlantProduction.pdf>.
- [16] Holmén B A, James T A, Ashbaugh L L, et al. Lidar-assisted measurement of PM₁₀ emissions from agricultural tilling in California's San Joaquin Valley-Part II: Emission factors[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(19): 3265–3277.
- [17] Wang J, Miller D R, Sammis T W, et al. Local dust emission factors for agricultural tilling operations[J]. *Soil science*, 2010, 175(4): 194–200.
- [18] Kasumba J, Holména 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.
- [19] Qiu G, Pattey E. Estimating PM₁₀ emissions from spring wheat harvest using an atmospheric tracer technique[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(35): 8315–8321.
- [20] Goossens D, Gross J, Spaan W. Aeolian dust dynamics in agricultural land areas in lower saxony, Germany[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(7): 701–720.
- [21] Funk R, Reuter H I. Dust production from arable land caused by wind erosion and tillage operations[C/OL]//International Symposium on Sand and Dust Storms, Beijing, China. [2014–12–21]. <http://sds-was.aemet.es/about-us>.
- [22] Hinz T. Agricultural PM₁₀ emission from plant production[C/OL]//Proceedings of the PM emission Inventories Scientific Workshop. [2014–12–21]. <http://tfeip-secretariat.org/assets/Meetings/Documents/Previous-Meetings/Italy-Oct-2004/0411AgriculturalPM10Emissions-fromPlantProduction.pdf>.
- [23] Qettl D, Funk R, Sturm P. PM emission factors for farming activities[EB/OL]. [2014–12–21]. <http://www.worldcat.org/title/14th-international-symposium-transport-and-air-pollution-proceedings-1-3-june-2005-graz-university-of-technology/oclc/426086756>
- [24] Bogman P, Cornelis W, Rolle H, et al. Prediction of TSP and PM₁₀ emissions from agricultural operations in Flanders, Belgium[EB/OL]. [2014–12–21]. http://www.dustconf.com/CLIENT/DUSTCONF/UPLOAD/S9/BOGMAN_B.PDF
- [25] Goossens D. Wind erosion and tillage as a dust production mechanism on North European farmland[M]//Goossens D, Riksen M. Wind Erosion and Dust Dynamics: Observations, Simulations, Modeling. Netherlands: ESW Publications, 2004: 15–39.
- [26] Visser H, Buring E, Breugel P B. Composition and origin of airborne particulate matter in the Netherlands[EB/OL]. [2014–12–21]. <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/500099007.pdf>.
- [27] Cassel T, Trzepla-Nabaglo K, Flocchini R. PM₁₀ emission factors for harvest and tillage of row crops[EB/OL]. [2014–12–21]. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei12/poster/cassel.pdf>.
- [28] Hinz T, Tamoschat-Depolt K. Particulate matter in and from agriculture[M]. Germany: Landbauforschung Völkenrode, 2002: 1–7.
- [29] Clausnitzer H, Singer M J. Respirable-dust production from agricultural operations in the Sacramento Valley, California[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(4): 877–884.
- [30] Clausnitzer H, Singer M J. Intensive land preparation emits respirable dust[J]. *California Agriculture*, 1997, 51(2): 27–30.
- [31] EEA, Crop production and agricultural soils, in EMEP/EEA Emission

- Inventory Guidebook, 2009[EB/OL]. [2014-12-10]. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.
- [32] CARB. Assessing Area Source Emissions[EB/OL]. [2014-12-21]. http://www.wrapair.org/forums/dej/.../Ch10-Harvesting_Rev06.doc
- [33] U. S. Environmental Protection Agency. Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition[EB/OL]. [2014-12-21]. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>.
- [34] Carvacho O F, Ashbaugh L L, Brown M S, et al. Measurement of PM_{2.5} emission potential from soil using the UC Davis resuspension test chamber[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1-4):75-80.
- [35] Gill T E, Zobec T M, Stout J E, et al. Fugitive dust generation in the laboratory[EB/OL]. [2014-12-21]. <http://www.weru.ksu.edu/symposium/proceedings/gill.pdf>
- [36] Alfaro S C. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion[J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3-4):157-167.
- [37] Aymar S B, Mendez M J, Funk R. Soil properties related to potential particulate matter emissions(PM₁₀) of sandy soils[J]. *Aeolian Research*, 2012, 3(4):437-443.
- [38] Funk R, Reuter H I, Hoffman C, et al. Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils[J]. *Earth Surface Process Landforms*, 2008, 33(12):1851-1863.
- [39] Clausnitzer H, Singer M J. Environmental influences on respirable dust production from agricultural operations in California[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(11):1739-1745.
- [40] Environment Canada. Canadian Criteria Air Contaminants[EB/OL]. [2014-12-21]. <https://www.ec.gc.ca/air/>.
- [41] Flocchini R G, James T A, Ashbaugh L L. Sources and sinks of PM₁₀ in the San Joaquin Valley, Interim Report 2001[EB/OL]. [2014-12-21]. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei12/fugdust/yy.pdf>.
- [42] U. S. Environmental Protection Agency. 14th International Emission Inventory Conference: Transforming Emission Inventories - Meeting Future Challenges Today, Las Vegas, US EPA[EB/OL]. [2014-12-21]. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei14/>.
- [43] Wanjura J D, Parnell C B, Shaw B W, et al. A protocol for determining a fugitive dust emission factor from a ground level area source[EB/OL]. [2014-12-21]. http://cafoaq.tamu.edu/files/2012/01/PU01207_6.pdf.
- [44] Goodrich L B. A PM₁₀ emission factor for free stall dairies[EB/OL]. [2014-12-21]. <https://repository.tamu.edu/handle/1969.1/3858>.
- [45] Thelander D. Guide to agricultural PM₁₀ best management practices; Agriculture improving air quality[EB/OL]. [2014-12-21]. <http://www.azdeq.gov/enviro/air/plan/download/webguide.pdf>.
- [46] 臧英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2):56-60.
- ZANG Ying, GAO Huan-wen, ZHOU Jian-zhong. Experimental study on soil erosion by wind under conservation tillage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2):56-60.
- [47] 聂磊, 邵霞, 樊守彬, 等. 保护性耕作对减轻农田风蚀扬尘 PM₁₀ 排放的作用[C/OL]. 全国保护性耕作与农机农艺结合技术交流研讨会. [2014-12-21]. <http://www.taodocs.com/p-12947.html>.
- [48] 崔键, 彭颖, 周静, 等. 典型红壤农田区气溶胶浓度特征及其与降雨的关系[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4):386-389.
- CUI Jian, PENG Ying, ZHOU Jing, et al. Characteristic of aerosol concentration and its relationship with rainfall in a typical red soil agricultural region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):386-389.
- [49] 张楚莹, 王书肖, 赵瑜, 等. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析[J]. *环境科学*, 2009, 30(7):1881-1887.
- ZHANG Chu-ying, WANG Shu-xiao, ZHAO Yu, et al. Current status and future prospects of anthropogenic particulate matter emission in China[J]. *Environment Science*, 2009, 30(7):1881-1887.
- [50] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. *科学通报*, 2011, 56(3):261-268.
- CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, GONG Shan-ling, et al. Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(3):261-268.