

# 农牧交错带农田土壤风蚀 PM<sub>10</sub> 释放特征

南岭<sup>1,2</sup>, 董治宝<sup>1,3</sup>, 肖锋军<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062; 2. 宁夏大学 西部发展研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 粉尘释放是风蚀造成危害的一个重要过程。以农牧交错带沙区和非沙区农田土壤为研究对象, 利用室内风洞模拟实验, 实时监测了风蚀过程中释放的 PM<sub>10</sub>, 分析了 PM<sub>10</sub> 的动态变化特征, 以深入认识土壤风蚀粉尘释放机理。结果表明: 非沙区农田土壤风蚀强度远低于沙区农田, 与风速呈指数函数关系; 非沙区农田的土壤粉尘释放在不同风速下均以气流直接抬升模式为主, 平均 PM<sub>10</sub> 通量与风速呈线性函数关系, 最大 PM<sub>10</sub> 通量与风速呈幂函数关系; 沙区农田的土壤粉尘释放在风速增大到一定程度后呈气流直接抬升和砂粒跃移冲击复合模式, 最大 PM<sub>10</sub> 通量增加不明显, 但平均 PM<sub>10</sub> 通量明显高于非沙区农田; 对于沙区和非沙区农田而言, 平均 PM<sub>10</sub> 通量与风蚀速率呈对数函数关系。

**关键词:** 农牧交错带; 农田; 风蚀; PM<sub>10</sub> 释放

**文章编号:** 1000-694X(2017)06-1079-06

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00104

**中图分类号:** X169

**文献标志码:** A

## 0 引言

土壤风蚀是引起土地退化和荒漠化的主要作用过程之一, 也是全球环境问题的一个重要组成部分<sup>[1]</sup>。强烈的土壤风蚀使土地沙漠化, 降低土壤肥力和作物产量, 对农业的可持续性与生产力造成严重威胁。中国受土壤风蚀及土地沙漠化影响的面积占全国总面积的 1/2 以上, 主要分布在北方干旱、半干旱地区<sup>[2]</sup>, 尤其以旱作农田土壤风蚀最为严重<sup>[3]</sup>。每年因风蚀损失土壤有机质、氮素和磷素达到  $5.59 \times 10^7$  t, 折合化肥约  $2.68 \times 10^8$  t<sup>[4]</sup>。农牧交错带是中国沙漠化土地集中分布区, 沙漠化总面积 33 万 km<sup>2</sup>, 占中国沙漠化土地总面积的 82.9%<sup>[5]</sup>。国内外学者针对不同地区、不同耕作方式下农田土壤风蚀进行了大量研究。农田风蚀与沙漠风蚀有着明显的区别。农田沙源供应有限, 风蚀量随风速增大呈指数规律变化; 沙漠地区沙源充足, 风蚀量随风速增加呈幂函数变化<sup>[6]</sup>。

粉尘释放是土壤风蚀引起的后果之一。进入大气圈的粉尘对空气质量有着重要且复杂的影响, 虽然会增大 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的质量浓度, 但又能有效降低 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 CO 等大气污染物的浓度<sup>[7]</sup>。亚洲中部是全球粉尘的重要源区之一, 年平均排放量约为千万吨级<sup>[8]</sup>。中国北方干旱、半干旱区的粉尘释放量大约

是亚洲的一半<sup>[9]</sup>。中国北方沙漠有 2 个高粉尘释放区——以塔克拉玛干沙漠为中心的西部沙漠和以巴丹吉林、腾格里沙漠为主的北部沙漠<sup>[10]</sup>。Wang 等<sup>[11]</sup>对塔克拉玛干沙漠不同地表的风沙活动过程进行了研究, 认为塔克拉玛干沙漠地区的 PM<sub>10</sub> 释放通量范围为  $10^{-2} \sim 10$  kg · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 沙漠边缘的干涸湖盆、退化土地、戈壁等地区是潜在的高粉尘释放源区。梅凡民等<sup>[12]</sup>也认为中国北方粉尘源区主要是北方的沙漠和沙地, 其次是砂砾质戈壁和开垦的农田。崔梦淳等<sup>[13]</sup>在腾格里沙漠和毛乌素沙地的研究表明, 破碎结壳地表释放的 PM<sub>10</sub> 通量是未破碎结壳的几倍甚至几十倍, 披覆松散沙粒结壳地面的 PM<sub>10</sub> 释放通量高出未披覆的 1~2 个数量级。这些研究使得我们对于沙漠地区的粉尘释放有了深刻的认识, 然而农田是中国北方沙尘暴的重要尘源, 农田土壤在风蚀过程中的粉尘释放特征和规律还需要进一步深入研究<sup>[14]</sup>。

本研究利用室内风洞模拟实验, 对农牧交错带农田土壤在风蚀过程中释放的 PM<sub>10</sub> 进行监测, 分析了 PM<sub>10</sub> 的动态变化特征, 旨在深化对土壤风蚀粉尘释放机理的认识。

## 1 材料和方法

### 1.1 土样采集和制备

从农牧交错带西部 4 个不同地点的农田取样, 4

个采样点均位于 400 mm 等降水量线以西,采样农田分为沙区农田和非沙区农田(表 1)。由于对土体结构造成机械破坏是耕作过程的一个主要特征,因此本试验采取的土样均为扰动土样。

土壤样品带回实验室后,将土样中的土块破碎,

表 1 测试土样的采样位置及粒度组成(%)

Table 1 Location and particle size composition (%) of tested soil samples

| 土样<br>编码 | 行政区 | 经纬度                       | 农田<br>类型 | 作物     | 土壤<br>质地 | 粒径范围/ $\mu\text{m}$ |           |                           |             |             |              |       |
|----------|-----|---------------------------|----------|--------|----------|---------------------|-----------|---------------------------|-------------|-------------|--------------|-------|
|          |     |                           |          |        |          | <10                 | 10~<br>50 | 50~<br>100                | 100~<br>250 | 250~<br>500 | 500~<br>1000 | >1000 |
|          |     |                           |          |        |          | QQ                  | 鄂托克前旗     | 38.235488 N, 108.342316 E | 沙区农田        | 玉米,喷灌       | 砂土           | 1.4   |
| YY       | 榆阳区 | 37.992224 N, 109.930806 E | 非沙区农田    | 马铃薯,旱作 | 砂质壤土     | 9.823               | 26.318    | 40.916                    | 22.943      | 0           | 0            | 0     |
| GY       | 固阳县 | 41.053675 N, 110.09163 E  | 非沙区农田    | 小麦,旱作  | 壤质砂土     | 7.892               | 17.154    | 34.359                    | 24.257      | 10.811      | 5.526        | 0     |
| DT       | 大同县 | 39.948268 N, 113.478764 E | 非沙区农田    | 小麦,旱作  | 砂质壤土     | 9.669               | 25.064    | 22.392                    | 19.822      | 9.171       | 9.524        | 4.358 |

壤质地(美国制)。

## 1.2 试验设备

土壤风蚀风洞模拟试验利用陕西师范大学旅游与环境学院环境动力学实验室风洞完成。风洞是直流闭口吹气式低速风洞,由动力段、整流段、实验段和扩散段 4 部分组成,风洞总体长度为 20 m。试验段横截面宽 50 cm,高 60 cm,长度为 10 m。该风洞试验段的风速为  $3\sim 35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  连续可调。试验设定风速为皮托管(距风洞下底面高 20 cm)测定的入场风速。

本研究使用 DUSTTRAK 8533 粉尘仪监测风蚀模拟试验中的粉尘浓度。该设备监测的粉尘浓度范围为  $0.001\sim 150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,粒径范围为  $0.1\sim 15\mu\text{m}$ ,监测时间间隔  $1\sim 60\text{ s}$  可调。本研究中时间间隔设置为 5 s,监测粉尘通道为  $\text{PM}_{10}$ 。

## 1.3 试验方法

本研究风蚀风洞模拟试验 2015 年 12 月 2—3 日进行。试验中依次设置了  $3, 6, 9, 12, 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 共 5 个风速分别对 4 个土样进行吹蚀,每个风速持续吹蚀 20 min。被试土样置于风洞试验段 3 m 处中轴位置。在每次吹蚀前后对土样称重,用于计算各个风速下的风蚀量与风蚀强度。粉尘监测点设置于风洞试验段末,高度 20 cm。由于粉尘监测仪数量的限制,本试验中只在风洞末尾对粉尘进行了监测,未对进场气流中的粉尘进行监测,这会使得试验中得到的粉尘浓度和粉尘通量偏高。本试验在相同的外部环境下进行,假定进场气流中的背景粉尘浓

经过长时间风干,然后将土壤装填于实验土槽,对土样进行镇压,使土体紧实、土样表面平整,以消除土样表面粗糙度的差异。土样长宽深分别为 0.5、0.2、0.03 m。土样经 2 mm 筛分后采用马尔文 2000 激光粒度仪进行粒度分析,确定 4 个土样的土

度在试验中不发生变化,因而不会对不同土壤和不同风速下粉尘释放的变化趋势产生实质性影响。

土样放置到风洞内后先用盖板盖住,在开启风洞后调节风洞风速,在达到预定风速后,首先开启粉尘监测仪,随后移走土样盖板,使土样暴露于预定风速发生侵蚀和粉尘释放。

## 2 结果与分析

### 2.1 风蚀强度

模拟试验对同一土样按设定风速从小到大依次吹蚀,因此根据累计风蚀量对 4 种土壤在不同风速下产生的风蚀强度进行了计算。在弱风蚀条件下( $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),所有土壤的风蚀强度随风速的变化不明显。风速增大到  $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  后,所有土壤的风蚀强度明显增加。风速增大到  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  后,土样 QQ 产生的风蚀量远远高出其他土样,达到 3 244 g,是其他土样的 60 倍以上,风蚀量占被试土样质量的 70%(使得土槽底在试验未完成时部分暴露,这可能进一步导致其风蚀量和风蚀强度数据偏大),因此未对土样 QQ 进行  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下的试验(表 2)。通过表 2 可以判断,4 个被试土壤的风蚀临界启动风速在  $6\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风蚀强度与风速之间呈幂函数或指数函数关系<sup>[6]</sup>。本研究中非沙区农田土壤风蚀强度与风速之间更符合指数函数关系(表 3)。

沙区农田土样 QQ 在  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速产生极大风蚀强度的原因是该风速下发生了持续大规模的砂粒跃移和蠕移。土壤颗粒组成是决定土壤抗蚀性的

表 2 不同农田土壤在不同风速下的累积风蚀强度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )

Table 2 Wind erosion rates ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) of different soils under different wind speeds

| 土样 | 风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |     |     |        |       |
|----|--|-----|-----|--------|-------|
|    | 3                                      | 6   | 9   | 12     | 15    |
| QQ | 30                                     | 90  | 540 | 97 860 |       |
| YY | 90                                     | 120 | 390 | 1 110  | 2 610 |
| GY | 60                                     | 90  | 300 | 1 020  | 3 000 |
| DT | 60                                     | 120 | 480 | 2 010  | 6 330 |

表 3 非沙区农田土壤风蚀强度与风速之间的相关关系  
Table 3 Relationship between wind erosion rate of no-sand area soils and wind speed

| 土样 | 函数类型 | 经验公式                       | 相关系数 ( $R^2$ ) |
|----|------|----------------------------|----------------|
| YY | 指数函数 | $Q_t = 28.1844e^{0.2986U}$ | 0.9754         |
|    | 幂函数  | $Q_t = 5.4458U^{2.1067}$   | 0.8713         |
| GY | 指数函数 | $Q_t = 15.972e^{0.3417U}$  | 0.9788         |
|    | 幂函数  | $Q_t = 2.4633U^{2.405}$    | 0.8702         |
| DT | 指数函数 | $Q_t = 14.0436e^{0.4043U}$ | 0.9891         |
|    | 幂函数  | $Q_t = 1.4342U^{2.8803}$   | 0.9001         |

重要因素,因此不同土样之间土壤粒度组成的差异在试验中造成土壤风蚀强度的差异。风成沙的风蚀可蚀性随土壤粒度的变化而服从分段函数,粒径为 0.09 mm 者最易被风蚀。风成沙颗粒按可蚀性可以分为 3 种类型:粒径  $>0.7$  mm 和  $<0.05$  mm 的为难蚀颗粒,粒径  $0.7 \sim 0.4$ 、 $0.075 \sim 0.05$  mm 为较难蚀颗粒,粒径  $0.4 \sim 0.075$  mm 为易蚀颗粒<sup>[15]</sup>,其中粒径在  $0.08 \sim 0.25$  mm 的土壤颗粒最易遭受风蚀<sup>[16]</sup>。土样 QQ 取自毛乌素沙地内部具有灌溉条件的开垦农田,实质为风成沙,粉粒和粘粒极度缺乏,仅占 3.391%,这使得其风蚀强度远远高于其他土壤。但由于该类农田具备灌溉条件,在耕作过程中通过增加土壤含水量及由其引起的土壤物理结皮可以降低风蚀强度,在实际中未必会发生严重的风蚀,但应该特别注意该类农田休耕或弃耕后的田间管理。非沙区农田土样 GY、DT、YY 中的细粒部分在一定程度上抑制沙粒跃移的发生,降低风蚀强度。Gillette 等<sup>[17-18]</sup>的野外观测发现土壤中粘粒份额增大到一定程度后会限制跃移大的起跳运动,导致跃移量减少。邢茂等<sup>[19]</sup>的研究表明沙床中添加少量粘粒会抑制沙粒的起跳,降低跃移质的质量。本研究得到的结果与上述结论一致。对于翻耕后松散的农田表层土壤,土壤可蚀性主要取决于粒度组成,本

试验中 4 种农田土壤的粒度组成不同,最终导致它们在风蚀强度的差异。

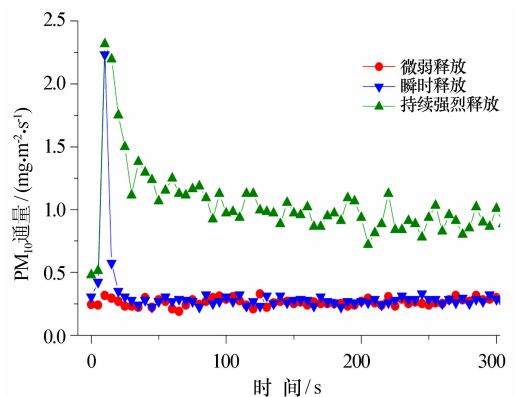
## 2.2 PM<sub>10</sub> 释放过程

本研究中所有试验的 PM<sub>10</sub> 通量变化过程曲线可分为 3 种类型——微弱释放、瞬时释放、持续强烈释放(图 1)。

微弱释放主要发生在较低风速时,PM<sub>10</sub> 释放量很小,在整个试验过程中 PM<sub>10</sub> 通量始终维持在一个很小的范围,没有随试验的进行发生变化。本试验中土样 QQ 和土样 YY 在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下表现为该类型,而土样 GY 和土样 DT 仅在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下表现为该类型。

瞬时释放主要发生在各风速增大到一定程度但又没有发生大规模的土粒跃移时。该类型下,PM<sub>10</sub> 通量在试验开始时迅速升高到最大值,接着又迅速降低到很低的水平,然后小幅波动的情况下缓慢释放。土样 QQ 在  $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下,土样 YY 在  $9, 12, 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下表现为该类型,土样 GY 和土样 DT 在  $6, 9, 12, 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下均表现为该类型。

持续强烈释放发生在风速继续增大以致于引起大规模发生跃移时,与瞬时释放的区别在于,该类型下粉尘通量达到峰值后下降幅度较小,在随后的试验过程中维持在一个较高的水平且振荡幅度较大。本试验中仅有土样 QQ 在  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下表现为该类型。



微弱释放、瞬时释放、持续强烈释放分别为  $6, 9, 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下

图 1 QQ 土样风蚀过程中 PM<sub>10</sub> 通量变化的 3 种类型  
Fig. 1 Three types of PM<sub>10</sub> temporal variation during wind erosion process

Sweeney 等<sup>[20]</sup>基于 PI-SWERL 对不同沉积物开展的试验监测结果,将粉尘释放模式分为 4 种:①有限沙尘源供应条件下的气流直接抬升模式;②有

限沙尘源供应条件下的沙粒跃移冲击模式;③无限沙尘源供应条件下的沙粒跃移冲击模式;④气流直接抬升和沙粒跃移冲击共同作用模式。将该分类模式应用于本研究,可以确定本研究中粉尘瞬时释放是由气流直接抬升引起的。而持续强烈释放在起始阶段为气流直接抬升和沙粒跃移冲击共同作用引起粉尘释放,随后转变为无限沙尘源供应条件下的沙粒跃移冲击模式。

随着风蚀时间的持续,有限沙源地表的可风蚀物减少,风蚀强度降低,这一现象称为风蚀的时距效应<sup>[21-22]</sup>。时距效应在粉尘释放过程中表现为粉尘通量的快速衰减。由于粉尘粒径较小,对气流的响应敏感,粉尘释放的时距效应更为明显。本研究发现,不同土壤不同风速下粉尘释放的时距效应存在着很大差异。此前开展的很多风蚀风洞模拟试验研究中,设置的吹蚀时长随风速增大而缩短,这会使得强风蚀条件下得到的风蚀速率偏高。

### 2.3 风速对 PM<sub>10</sub> 释放的影响

尽管本研究中所有试验的 PM<sub>10</sub> 释放过程只有 3 种类型,但不同土样在不同风速下的粉尘释放过程在平均值、最大值和最小值等统计参数上存在差异。

PM<sub>10</sub> 通量平均值可以反映整个模拟试验全过程的粉尘释放状况。沙区农田土样 QQ 在 12 m · s<sup>-1</sup> 风速下的平均 PM<sub>10</sub> 通量明显高于其他土样,这说明土样 QQ 在这一风况下产生了最大的 PM<sub>10</sub> 释放总量。非沙区农田土样 YY、GY、DT 的平均 PM<sub>10</sub> 通量基本上随风速增大呈线性增大的趋势,相关系数  $R^2$  分别为 0.9889、0.9172、0.8452。平均 PM<sub>10</sub> 通量随风速变化的曲线中,土样 GY 和 DT 相似,在各个风速都低于土样 QQ 和 YY。土样 GY、DT、YY 中 PM<sub>10</sub> 的含量相当,但土样 GY 和 DT 在土壤粒径分布上的共同特征是更接近于正态分布且粒径分布范围更广,不同粒度颗粒配比良好,而土样 YY 中缺乏大颗粒,因此土样 YY 释放出更多的粉尘。土样 QQ 虽然 PM<sub>10</sub> 含量仅有 1.4%,但易于发生跃移,其粉尘释放过程为无限沙尘源供应条件下的沙粒跃移冲击,因此 PM<sub>10</sub> 通量平均值在所有试验中最高,达到 0.825 mg · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> (图 2)。可以推断,土壤中一定比例的大颗粒和小颗粒都能起到抑制粉尘释放的作用,大颗粒的抑制作用通过对细颗粒的保护实现,而细颗粒的抑制作用通过对砂粒跃移运动的抑制实现。

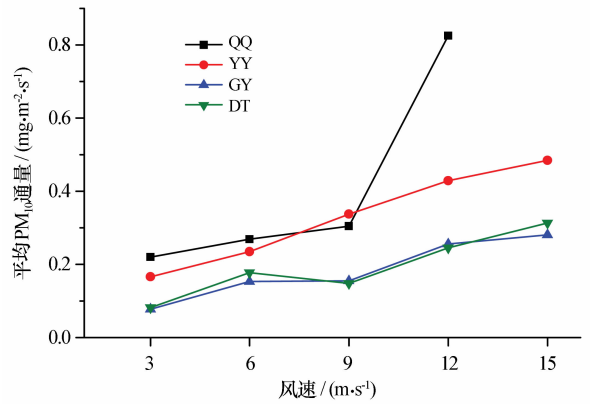


图 2 各土样在不同风速下的平均 PM<sub>10</sub> 通量

Fig. 2 Average PM<sub>10</sub> flux of soils under different wind speeds

粉尘释放过程中,粉尘通量最大值可以表明土壤中粉尘颗粒对于气流的敏感性,即 PM<sub>10</sub> 通量对于风速的响应程度,其值越高,说明对于当前风速的响应越明显;而粉尘通量平均值是整个试验过程中 PM<sub>10</sub> 通量的结果,反映粉尘释放能力中的持续性,也可以指示粉尘释放的潜力。如在 15 m · s<sup>-1</sup> 下的所有非沙区农田土壤中,土样 DT 敏感性最高但持续性较弱,土样 YY 敏感性最弱但持续性最高,使得在试验中 PM<sub>10</sub> 释放量最大,平均 PM<sub>10</sub> 通量最高。在 12 m · s<sup>-1</sup> 风速下,沙区农田的土样 QQ 具有最高的持续性,但敏感性最低(图 3)。最大 PM<sub>10</sub> 通量随风速增大呈幂函数增大(表 4)。

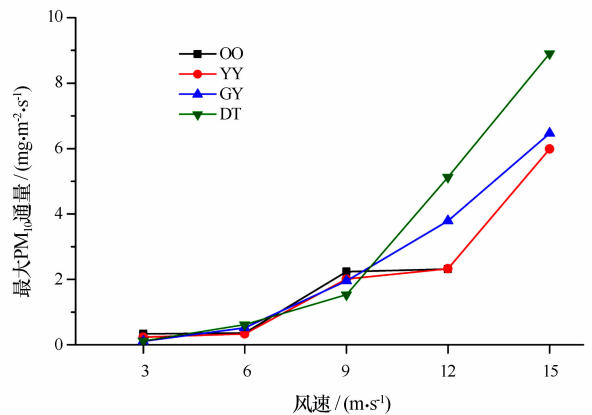


图 3 各土样在不同风速下的最大 PM<sub>10</sub> 通量

Fig. 3 Maximum PM<sub>10</sub> flux of soils under different wind speeds

来自非沙区农田的 3 个土样的最大 PM<sub>10</sub> 通量在 9 m · s<sup>-1</sup> 以下风速时差异不大,在 12 m · s<sup>-1</sup> 和 15 m · s<sup>-1</sup> 时 YY 明显小于 GY 和 DT,这与平均 PM<sub>10</sub> 通量在相同风速下的表现不一致。这说明在产生最大 PM<sub>10</sub> 通量的风蚀初始阶段,大颗粒对粉尘



释放起始阶段的抑制作用并未生效,当粉尘释放一定量后,粉尘颗粒减小,大颗粒在土壤表面的相对含量增大,这种情况下才产生对于粉尘释放的抑制作用。

表 4 各土样最大 PM<sub>10</sub> 通量与风速之间的相关关系

Table 4 Relationship between maximum PM<sub>10</sub> flux and wind speed

| 土样 | $y_0$  | $a$     | $b$    | $c$     | $R^2$  |
|----|--------|---------|--------|---------|--------|
| QQ | 0.5088 | -0.2994 | 0.0554 | -0.0006 | 0.9994 |
| YY | 0.2358 | -0.1716 | 0.0391 | 0       | 0.9993 |
| GY | 1.5552 | -0.7259 | 0.0914 | -0.0007 | 0.9941 |
| DT | 1.2528 | -0.5843 | 0.0734 | 0       | 0.9940 |

拟合函数为  $y=y_0+ax+bx^2+cx^3$ ;  $y_0, a, b, c$  为拟合参数;  $R^2$  为相关系数。

### 2.4 PM<sub>10</sub> 释放与风蚀速率之间的关系

平均 PM<sub>10</sub> 通量与风蚀速率之间呈对数函数关系(图 4)。这说明在弱风蚀条件下,PM<sub>10</sub> 通量对风速变化的响应要强于风蚀速率,在强风蚀条件下风蚀速率对风速变化的响应强于 PM<sub>10</sub> 通量。这一结论与王仁德等<sup>[23]</sup>的研究结果一致,粉尘释放强度是随风速增大而增强的,但其在风蚀物中的含量则随风速增大而降低,说明风蚀物中粒径较粗的跃移颗粒流量随风速增加的更快。邢茂等<sup>[19]</sup>认为,对于给定的土壤地表,不同粒径的粉尘通量和沙粒通量正比于它们在地表的质量比,比例系数与风速无关。该结论与本研究结果矛盾可能是因为其采用的土样是由不同粒径的沙粒和粉粒按不同比例混合而成,土壤颗粒之间没有不同程度的粘结力。而本试验的试验土样为自然土壤,在自然状态下土壤颗粒之间存在着不同程度的粘结力。

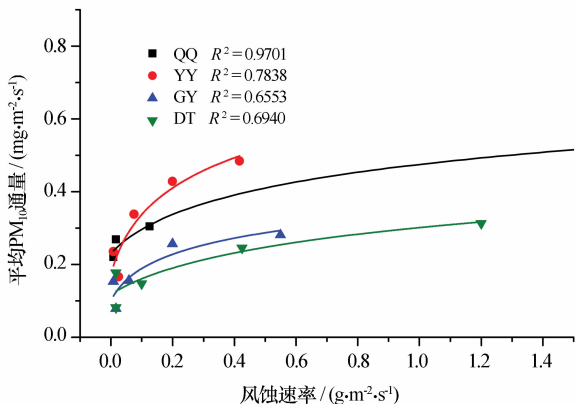


图 4 各土样平均 PM<sub>10</sub> 通量与风蚀速率的相关关系  
Fig. 4 Relationship between average PM<sub>10</sub> flux and wind erosion rate

## 3 结论

沙区农田土壤的风蚀强度远高于非沙区农田,非沙区农田土壤风蚀强度与风速呈指数函数关系。非沙区农田土壤的 PM<sub>10</sub> 释放过程具有明显的瞬时性,释放模式为气流直接抬升;沙区农田土壤的 PM<sub>10</sub> 释放过程具有一定的持续性,释放模式为气流直接抬升和砂粒跃移冲击混合模式。沙区农田土样 QQ 更容易发生砂粒跃移,发生大规模土壤颗粒跃移时其平均 PM<sub>10</sub> 释放通量远高于其他未发生大规模土壤颗粒跃移的非沙区农田土壤。3 个非沙区农田土壤 YY、GY、DT 中,YY 的平均 PM<sub>10</sub> 通量明显高于 GY 和 DT,而 GY 和 DT 之间差异不明显,这反映了它们风蚀过程中 PM<sub>10</sub> 释放的持续性。在较强的风蚀条件下,最大 PM<sub>10</sub> 通量 DT>GY>YY,这反映了它们风蚀过程 PM<sub>10</sub> 释放的敏感性。对于各个农田土壤,平均 PM<sub>10</sub> 通量与风蚀速率成对数函数关系,粉尘释放对整体风蚀的贡献在弱风蚀条件下较大且随着风速增大而减弱,在强侵蚀条件下粉尘释放增量有限但风蚀速率急剧增加。

### 参考文献:

- [1] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International, 2003, 29(4): 437-450.
- [2] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50 a (II) [J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 795-815.
- [3] 董治宝, 董光荣. 以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 31-37.
- [4] 罗万银, 董治宝. 风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 75-83.
- [5] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 739-747.
- [6] 王仁德, 肖登攀, 常春平, 等. 农田风蚀量随风速的变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1120-1127.
- [7] 陈杰, 赵素平, 殷代英, 等. 沙尘天气过程对中国北方城市空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 423-430.
- [8] Xuan J, Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(31): 4863-4876.
- [9] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(24): 5-8.
- [10] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 29-40.
- [11] Wang H, Jia X. Field observations of windblown sand and dust in the Takimakan Desert, NW China, and insights into modern dust sources[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24

- (4):323—333.
- [12] 梅凡民,张小曳,曹军骥,等. 定量评价中国北方粉尘源区地表覆盖类型对表土风蚀强度的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质,2004,24(1):119—124.
- [13] 崔梦淳,鹿化煜,冯哈,等. 便携式粉尘观测仪测定腾格里沙漠和毛乌素沙地 PM<sub>10</sub> 释放通量[J]. 科学通报,2015,60(17):1621—1630.
- [14] 李锋. 沙尘暴物质来源的研究进展综述[J]. 林业资源管理,2009(1):101—106.
- [15] 董治宝,李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):1—5
- [16] 杨会民,王静爱,邹学勇,等. 风水复合侵蚀研究进展与展望[J]. 中国沙漠,2016,36(4):962—971.
- [17] Gillette D A,Chen W N. Particle production and aeolian transport from a “supply-limited” source area in the Chihuahuan desert, New Mexico, United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2001,106(D6):5267—5278.
- [18] Gillette D A,Herbert G,Stockton P H, et al. Causes of the fetch effect in wind erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1996,21(7):641—659.
- [19] 邢茂,郭烈锦. 土壤风蚀中粉尘释放规律研究[J]. 中国科学:G辑,2008,38(8):984—998.
- [20] Sweeney M R,Mason,Joseph A. Mechanisms of dust emission from Pleistocene loess deposits,Nebraska,USA[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2013,118(3):1460—1471.
- [21] Liu L Y,Shi P J,Zou X Y, et al. Short-term dynamics of wind erosion of three newly cultivated grassland soils in Northern China[J]. Geoderma,2003,115(1):55—64.
- [22] 张春来,董光荣,董治宝,等. 用风洞实验方法计算土壤风蚀量的时距问题[J]. 中国沙漠,1996,16(2):200—203.
- [23] 王仁德,邹学勇,赵婧妍. 半湿润地区农田土壤粉尘释放的风洞模拟研究[J]. 地理科学,2012,32(11):1364—1369.

## Characteristic of PM<sub>10</sub> Emission of Cultivated Soil in Ecotone between Agriculture and Animal Husbandry

Nan Ling<sup>1,2</sup>, Dong Zhibao<sup>1,3</sup>, Xiao Fengjun<sup>1</sup>

(1.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2.Research Center for Western Development, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Dust emission is a process triggered by wind erosion to deteriorate atmospheric environmental quality. By taking cultivated soils from sandy area and no-sandy area in the ecotone between agriculture and animal husbandry as research object, we monitored concentration of PM<sub>10</sub> in the wind-flow emitted from soil surface in wind tunnel simulation experiment. In order to understand the mechanic of PM<sub>10</sub> emission during the wind erosion, we analyzed the characteristic and regularity of temporal variation of PM<sub>10</sub>. The following conclusions have been obtained: wind erosion rate of cultivated soils from no-sandy area is much lower than sandy area while there is a exponential function relationships between wind erosion rate and wind speed; Being mainly aroused by the direct suspension, the average PM<sub>10</sub> flux of cultivated soils from no-sandy area linearly increase with increasing wind speed, and maximum PM<sub>10</sub> flux of those soils increase in a power function trend with wind speed. Resulted from uplift by combination of direct suspension and saltation, the average PM<sub>10</sub> flux of soils from sandy area is much higher than those from no-sandy area while maximum PM<sub>10</sub> flux increase is low. For all soil samples, there is a logarithm function relationship between average PM<sub>10</sub> flux and wind erosion rate.

**Key words:** ecotone between agriculture and animal husbandry; cultivated soil; wind erosion; PM<sub>10</sub> emission