

浑善达克沙地多伦生态站沙尘及颗粒物特征研究

曲娜¹, 闫德仁¹, 郭城峰²

(1. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 呼和浩特市新城区林业局, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要 [目的] 探讨近地层大气降尘量及其颗粒粒径分布特征, 对评价固沙植被生态功能具有重要意义。[方法] 利用 50 m 沙尘观测塔采集了浑善达克沙地多伦生态站不同高度水平沙尘量、垂直降尘量样品, 并利用称重法、激光颗粒分析仪和电感耦合等离子体发射光谱仪(PE ICP-OES)分别测定沙尘量、颗粒物粒径和化学元素含量。[结果] 水平沙尘通量年平均为 16.99 mg/(m²·h), 垂直降尘量平均为 0.05 mg/(m²·h); 在相同高度下, 水平沙尘量数值比垂直降尘量高 1.30~24.49 倍。水平沙尘中 >20~50 μm 粒径颗粒物含量为 50.41%, 10 μm 粒径以下颗粒物含量平均为 9.09%, 并随高度增加 >2~5 和 >5~10 μm 粒径颗粒物含量增加明显; 垂直降尘中 >20~50 和 >50~100 μm 粒径颗粒物含量分别为 40.12% 和 30.02%, 10 μm 粒径以下颗粒物含量平均为 4.91%。除 SiO₂ 外, 多伦生态站沙尘中 Fe₂O₃、Al₂O₃、MnO、MgO、P₂O₅、CaO、TiO₂ 含量分别比风沙土中各元素含量增加 5.44、0.97、6.91、6.95、4.12、2.30、2.26 倍, 比苔藓生物结皮层各元素含量分别增加 1.98、0.63、1.33、2.42、1.78、0.81 和 1.18 倍。[结论] 垂直降尘量或水平沙尘量随高度增高而减小, 并呈现出多项式或幂函数关系, 并且沙尘中细颗粒物、化学元素含量显著增加。

关键词 水平沙尘通量; 垂直降尘量; 沙尘粒径; 元素含量; 颗粒物; 浑善达克沙地多伦生态站

中图分类号 X 513 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)16-0074-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.16.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Characteristics of Dust and Particulate Matter in Duolun Ecological Station of Hunshandake Sandy Land

QU Na¹, YAN De-ren¹, GUO Cheng-feng² (1. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010; 2. Hohhot Xincheng Forestry Bureau, Hohhot, Inner Mongolia 010051)

Abstract [Objective] The research aimed to discuss the atmospheric dustfall and particle size distribution characteristics of the near-surface layer, which was of great significance for evaluating the ecological function of sand-fixing vegetation. [Method] The sand dust and vertical dustfall samples of different heights in the Duolun ecological station of Hunshandake sandy land were collected by using the 50 m sand dust observation tower, and the amount of dust, particle size and chemical element content were determined by weighing method, laser particle analyzer and inductively coupled plasma optical emission spectrometer (PE ICP-OES). [Result] The average annual horizontal dust flux was 16.99 mg/(m²·h), the vertical dustfall was 0.05 mg/(m²·h). At the same height, the horizontal dust amount was 1.30~24.49 times higher than the vertical dustfall. The content of >20~50 μm particle size in horizontal dust was 50.41%, and the average particle content below 10 μm was 9.09%, and with the increase of height, the particle content of >2~5 μm and >5~10 μm particle size increased obviously. The particle contents of >20~50 μm and >50~100 μm of the vertical dustfall were 40.12% and 30.02%, respectively. The average particle content below 10 μm was 4.91%. Compared with the sandy soil, the content of Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO, MgO, P₂O₅, CaO, TiO₂ in sand dust of Duolun ecological station were increased by 5.44 times, 0.97 times, 6.91 times, 6.95 times, 4.12 times, 2.30 times, 2.26 times, respectively, except for SiO₂. Compared with the moss biological crust, the content of Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO, MgO, P₂O₅, CaO, TiO₂ in sand dust were increased by 1.98 times, 0.63 times, 1.33 times, 2.42 times, 1.78 times, 0.81 times, 1.18 times, respectively, except for SiO₂. [Conclusion] The amount of vertical dustfall or horizontal dust decreases with the increase of height, and presents a polynomial or power function relationship, and the content of fine particles and chemical elements in sand dust increases significantly.

Key words Horizontal dust fall; Vertical dust fall; Dust particle size; Element content; Particulate matter; Duolun ecological station of Hunshandake sandy land

沙漠地区近地层水平输送的沙尘物质在不同高度处的垂直沉降量及其随高度的变化特征直接影响着风沙地区沙尘的输送过程。国外在近地层沙尘浓度、水平通量和降尘量等方面取得明显进展^[1-5], 而我国的研究主要包括沙尘天气过程沙尘颗粒分布及水溶性离子组分特征、PM₁₀浓度的区域差异、沙尘期间 PM_{2.5} 中金属元素含量、气溶胶颗粒化学组分、粒径分布以及我国大气降尘量的地域性分布特征及影响因素等方面^[6-14]。此外, 张正德等^[15] 利用 50 m 沙尘观测塔按月取样测定了水平沙尘通量和降尘量随高度的变化特征; 张锦春等^[16] 在民勤沙尘源区借助近地面沙尘暴监测系统分析了近地面降尘分布特征; 罗凤敏等^[17] 在乌兰布和沙漠东

北缘过渡带和绿洲内的研究结果表明, 近地层沙尘水平通量和降尘量均随着高度增加而减少。作为京津风沙源工程建设的重点地区, 经过近 20 年治理浑善达克沙地生态环境取得了明显成效^[18]。闫德仁等^[19] 利用 3 m 沙尘通量架测定了多伦生态站大气降尘量和颗粒物粒径分布特征。笔者在此基础上, 2017—2018 年利用 50 m 沙尘通量塔在野外开放环境下开展了浑善达克沙地多伦生态站固沙植被区全年连续沉积的沙尘积累量观测研究, 并对沙尘颗粒物特征进行分析, 以期对评价浑善达克沙地防沙治沙工程建设取得的生态环境成效起到指导作用。

1 材料与方法

1.1 研究地概况 研究地位于内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站, 地理坐标和自然条件特征与参考文献^[19] 相同。

1.2 研究方法 在 50 m 沙尘通量塔(图 1) 安装水平沙尘通量采集器和垂直降尘缸, 并对采集回的沙尘颗粒物样本进

基金项目 国家自然科学基金项目(31560239); 内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站项目(2018-LYPT-DW-012)。

作者简介 曲娜(1983—), 女, 满族, 内蒙古赤峰人, 助理研究员, 硕士, 从事沙漠治理研究。

收稿日期 2020-01-07

行粒径分析和元素组成含量的测定。同时,在沙尘通量塔安装 9 套风速仪,安装高度分别为 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、16.0、24.0、36.0 和 48.0 m。水平沙尘采集器和垂直降尘缸具体安装高度分别为 0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0、16.0、20.0、24.0、32.0、36.0、44.0、48.0 和 50.0 m。

水平沙尘通量采集器口径为 2 cm×5 cm,采集器具体规格特征见参考文献[15]。垂直降尘缸为圆柱形平底不锈钢管加工而成,内径为 16 cm,高 30 cm。



图 1 50 m 沙尘通量塔

Fig.1 50 m sand dust flux tower

1.3 样品采集及分析方法 2017 年开始采集沙尘。沙尘样本沉积周期为 2017 年 10 月—2018 年 10 月,即在 2018 年 10 月 1 次性取回不同高度处采集器和降尘缸内的样本,并带回室内烘干,称重,折算成单位重量。用 CLY-2000 型激光颗粒分析仪测定沙尘颗粒物粒径,每次测定 3 个重复,每个样品的平均值作为分析数据。此外,将全部沙尘样品混合后,采用偏硼酸锂熔融,电感耦合等离子体发射光谱仪(PE ICP-OES)测定样品中化学元素含量,并换算成氧化物含量。

2 结果与分析

2.1 水平沙尘量变化 从图 2 可以看出,50 m 高度范围内水平沙尘通量(y)随高度(x)增高表现出幂函数关系,即随着高度增加采集器中收集到的水平沙尘量呈现出降低的趋势,与张正德等^[15]在腾格里沙漠东南缘的每月观测结论为指数函数关系有所差异。导致这种差异的原因是否与研究区地表植被生长状况或连续观测时间及取样频次有关目前还无法判定。

此外,从图 2 还可以看出,0.5~50.0 m 高度全年水平沙尘量总量合计为 271.89 mg/(m²·h),而 0.5 m 高度全年水平沙尘量为 43.37 mg/(m²·h),占全年总量的 15.95%;1.0 m 高度为 26.67 mg/(m²·h),占全年总量的 9.81%;20.0 m 高度为 16.21 mg/(m²·h),占全年总量的 5.96%;50.0 m 高度仅为 8.02 mg/(m²·h),占全年总量的 2.95%。也就是说,水平沙尘量主要是在 1.0 m 以下的空间范围内,而距离地面越高,沙尘

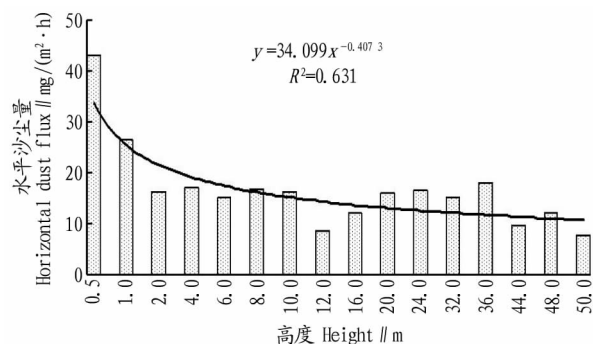


图 2 50 m 高度范围沙尘通量变化

Fig.2 The change of dust flux in the 50 m height range

量也越少。

2.2 垂直降尘量变化 一般情况,由于不同高度处风速高低的波动变化,少部分相对大的颗粒物形成垂直降尘量。从图 3 可以看出,垂直降尘量(y)随高度(x)增高表现出多项式函数关系: $y = 0.0009x^2 - 0.0229x + 0.1677$ ($R^2 = 0.8775$),而且,垂直降尘量主要发生在 0.5~6.0 m,占 0.5~50.0 m 空间范围总降尘量[0.91 mg/(m²·h)]的 60.03%。其中,0.5 m 高度垂直降尘量占总降尘量的 16.77%;1.0 m 高度占 14.32%,2.0 m 高度占 8.44%,4.0 m 高度占 11.07%,6.0 m 高度占 9.41%。

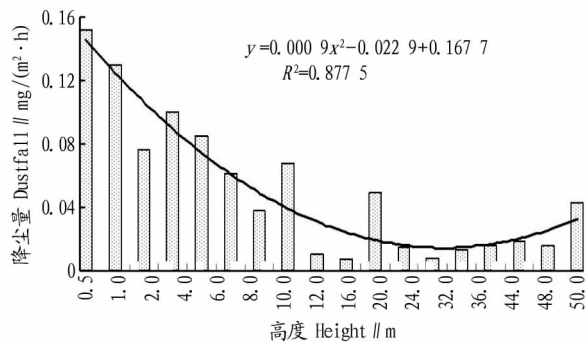


图 3 50 m 高度范围垂直降尘量变化

Fig.3 The change of vertical dustfall in the 50 m height range

另外,从距离地面相同高度的水平沙尘量(图 2)和垂直降尘量(图 3)数据变化看,水平沙尘量比垂直降尘量高 1.30~24.49 倍,并且距离地面越高,增加倍数也越大。张正德等^[15]测定的结果也有相同的趋势,说明近地表风沙流是垂直降尘量主要来源之一,而悬移质形式存在的更细颗粒的沙尘则主要是以水平运移形式向远处输送。

2.3 水平沙尘颗粒物粒径变化 从表 1 可以看出,在 50 m 高度范围内,水平沙尘的颗粒粒径主要集中在 >20~50 μm,其平均含量占 50.41%,且在 2~50 m 高度,>20~50 μm 颗粒物含量没有明显增加的趋势,但在 0.5 m 高度,>100~200 μm 颗粒物含量为 21.18%,而 >2~50 m 高度平均为 0.28%。此外,10 μm 以下颗粒物含量平均为 9.09%,并随着高度增加呈现出增加趋势,特别是 >2~5 和 >5~10 μm 颗粒物含量增加明显,表明随着高度增加,水平沙尘中的细颗粒物含量总体呈现出增加的趋势。

2.4 垂直降尘颗粒物粒径变化 从不同高度垂直降尘中颗

颗粒物粒径变化看(表2),颗粒粒径主要集中在>20~50和>50~100 μm ,其平均含量分别占40.12%和30.02%,而水平沙尘>20~50 μm 颗粒含量平均为50.41%,>50~100 μm 颗粒含量平均为19.49%。同样,垂直降尘中10 μm 以下颗粒物

含量平均为4.91%,随着高度增加,其含量并没有表现出增加趋势,表明垂直降尘中颗粒物粒径相对粗一些,且垂直降尘中颗粒物受到不同高度气流运动状态变化的影响。

表1 不同粒径水平沙尘颗粒物含量变化

Table 1 The changes of horizontal dust particle content at different particle size levels

%

颗粒物粒径 Particle size// μm	距离地面高度 Height from the ground//m								
	0.5	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	24.0	50.0
≤ 1	0.38	0.03	0.20	0.19	0.12	0.09	0.06	0.24	0.12
>1~2	0.46	0.16	0.50	0.41	0.38	0.32	0.28	0.62	0.39
>2~5	2.53	2.46	3.66	3.42	3.65	3.17	3.59	4.41	3.61
>5~10	2.62	4.42	5.51	5.18	5.98	4.77	5.85	6.81	5.29
>10~20	9.17	18.04	19.23	16.44	21.55	17.41	20.79	23.42	18.35
>20~50	40.63	52.67	50.44	50.32	53.98	50.23	51.33	53.26	50.85
>50~100	21.95	21.92	20.17	23.60	14.33	23.54	17.64	11.25	21.07
>100~200	21.18	0.30	0.31	0.39	0.01	0.47	0.46	0.00	0.33
>200~500	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>500	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表2 不同粒径垂直降尘颗粒物含量变化

Table 2 The changes of vertical dust particle content at different particle size levels

%

颗粒物粒径 Particle size// μm	距离地面高度 Height from the ground//m								
	0.5	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	24.0	50.0
≤ 1	0.06	0.05	0.00	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
>1~2	0.26	0.08	0.00	0.34	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
>2~5	1.53	1.79	0.81	2.95	2.07	2.13	2.63	2.07	2.32
>5~10	3.09	4.03	0.83	5.06	3.47	3.47	1.75	1.56	1.47
>10~20	14.81	28.46	15.74	17.82	14.17	14.01	15.09	15.6	15.87
>20~50	38.48	36.43	37.13	43.8	41.01	39.70	40.86	41.8	41.91
>50~100	24.91	29.06	30.04	25.14	32.45	32.06	32.32	32.28	31.94
>100~200	4.59	0.10	1.86	3.69	6.57	5.09	5.07	5.01	3.87
>200~500	11.30	0.00	12.15	0.97	0.02	1.86	1.25	0.86	1.52
>500	0.97	0.00	1.44	0.14	0.00	1.68	1.03	1.02	1.02

2.5 降尘颗粒物元素组成特征 随着大气降尘的落地,其全量化学元素参与物质循环,进一步影响到生物结皮层和风沙土全量化学元素组成含量的变化,并通过物质和能力交换为构建相对稳定的沙漠生态系统提供土壤物质保证。从表3可以看出,浑善达克沙地多伦生态站大气降尘的全量化学元素含量(SiO_2 除外)均比生物结皮层和风沙土全量化学元素含量高。其中降尘颗粒物中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MnO 、 K_2O 、 MgO 、 P_2O_5 、 CaO 、 TiO_2 元素含量比风沙土中各元素含量分别增加5.44、0.97、6.91、0.21、6.95、4.12、2.30和2.26倍,降尘颗粒物中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 P_2O_5 、 CaO 、 TiO_2 元素含量比苔藓生物结皮层各元素含量分别增加1.98、0.63、1.33、2.42、1.78、

0.81和1.18倍。表明大气降尘在对改善生物结皮层和风沙土养分状况方面具有突出贡献。此外,降尘颗粒物中 Fe_2O_3 含量增加,随着水平沙尘悬移质的长距离输送对海洋生物繁殖具有重要意义。Jickells等^[20]认为来自大陆的含铁沙尘能够影响海洋中的生物地球化学过程,高会旺等^[21]研究指出沙尘沉降是海洋营养物质和污染物质的来源之一。Zhang等^[22]研究发现我国塔克拉玛干沙漠沙尘中铁含量约60.0 g/kg,而巴丹吉林沙漠沙尘中铁含量约40.0 g/kg; Formenti等^[23]报道北非沙尘中铁含量达109~127 g/kg,而该研究测定的沙尘中铁含量约106 g/kg(Fe_2O_3 含量为151.43 g/kg)。说明不同地区沙尘中铁含量差异显著。

表3 不同类型颗粒物全量化学元素含量变化

Table 3 The change of chemical element content of different types of particles

g/kg

类型 Type	Fe_2O_3	Al_2O_3	MnO	K_2O	Na_2O	MgO	P_2O_5	CaO	TiO_2	SiO_2
风沙土 Aeolian sand	23.49	123.91	0.23	46.76	23.86	3.08	0.88	6.43	2.10	696.64
苔藓结皮 Moss crust	50.76	149.60	0.78	51.66	29.65	7.16	1.61	11.74	3.14	607.71
大气降尘 Atmospheric dust	151.43	244.42	1.82	56.64	32.89	24.50	4.49	21.28	6.86	595.29

3 讨论

沙尘粒径大小及其垂直分布特征对沙尘输送起着重要作用,并且不同粒径颗粒物在大气中输送方式和输送距离也不同。因此浑善达克沙地大气降尘特征对京津地区环境质量有着重要影响。康永德等^[24]研究表明不同沙尘天气过程的沙尘输送量存在显著差异,并随着风速的增加,输沙率大致呈增大趋势。杨兴华等^[25]测定了沙尘暴天气过程中沙尘水平通量变化,表明 2 m 高度范围沙尘水平通量与高度的关系为幂函数关系,并且约 66% 的沙尘在 50 cm 高度范围内传输,80% 的沙尘在 100 cm 高度范围内传输。该研究结果表明,垂直降尘量或水平沙尘量变化趋势随高度增高而减小,并分别呈现出多项式或幂函数关系,这种变化规律与国内其他地区的研究结论存在差异^[15-16],与笔者前期测定结果也存在差异^[19],导致这种差异的原因是否与研究区地表植被生长状况或连续观测时间、取样频次以及观测高度差异有关目前还无法判定。此外,由于沙尘采集时间长度的不同,垂直降尘量或水平沙尘量差异明显。如张宏升等^[7]研究表明浑善达克沙地沙尘通量数值呈现正值为主,非沙尘天气沙尘通量为 18 mg/(m²·h),且沙尘天气过程开始时,15 m 高度处沙尘浓度低于 3 m 高度处浓度,当沙尘天气过程中风速减小时,沙尘气溶胶浓度刚好相反。而该研究全年水平沙尘通量平均为 16.99 mg/(m²·h),垂直降尘量平均为 0.05 mg/(m²·h)。

风沙流中颗粒物大小与沙源区土壤颗粒特征有密切关系,而不同粒径沙尘颗粒物随高度变化的分布特征与不同高度风速变化也有密切关系。该研究结果表明不同高度沙尘颗粒物粒径存在明显差异。在 0.5~50.0 m 高度水平沙尘颗粒集中在>20~50 μm,平均占降尘总量的 50.41%,10 μm 以下颗粒物含量平均为 9.09%,并随着高度增加呈现出增加趋势,特别是>2~5 和>5~10 μm 颗粒物含量增加明显,表明随着高度增加,水平沙尘中的细颗粒物含量总体呈现出增加趋势。而垂直降尘颗粒粒径集中在>20~50 和>50~100 μm,其平均含量分别占 40.12% 和 30.02%,10 μm 以下颗粒物含量平均为 4.91%,随着高度增加,其含量并没有表现出增加趋势,表明垂直降尘中颗粒物粒径相对粗一些,这些颗粒物一旦降落到地表,并为生物结皮提供物质条件。

4 结论

(1) 利用 50 m 沙尘观测塔收集 365 d 连续沉积的沙尘样品,测定结果表明,水平沙尘通量或垂直降尘量均随着距离地面高度的增加而降低;且在 0.5~50.0 m 高度,水平沙尘通量平均为 16.99 mg/(m²·h),垂直降尘量平均为 0.05 mg/(m²·h);在相同高度下,水平沙尘量比垂直降尘量高 1.30~24.49 倍,且距离地面越高,增加倍数也越大。

(2) 垂直降尘中颗粒物粒径相对更粗。在 50 m 高度范围内,水平沙尘中>20~50 μm 颗粒物含量为 50.41%,10 μm 以下颗粒物含量平均为 9.09%;垂直降尘中>20~50 和>50~100 μm 颗粒物含量分别为 40.12% 和 30.02%,10 μm 以下颗粒物含量平均为 4.91%。

(3) 浑善达克沙地多伦生态站沙尘中全量化学元素含量

(SiO₂ 除外)平均比生物结皮层和风沙土全量化学元素含量分别高 0.63~2.42 和 0.21~6.95 倍,特别是 Fe₂O₃ 含量为 151.43 g/kg,比国内其他地区沙尘中铁含量高近 1 倍。

参考文献

- [1] GILLETTE D A, FRYREAR D W, XIAO J B, et al. Large-scale variability of wind erosion mass flux rates at Owens Lake: I. Vertical profiles of horizontal mass fluxes of wind-eroded particles with diameter greater than 50 μm [J]. *J. Geophys Res*, 1997, 102(D22): 25977-25987.
- [2] GOOSSENS D, GROSS J, SPAAN W. Aeolian dust dynamics agricultural land areas in Lower Saxony, Germany [J]. *Earth surface and process and landforms*, 2001, 26(7): 701-720.
- [3] OFFER Z Y, GOOSSENS D. Thirteen years of aeolian dust dynamics in a desert region (Negev desert, Israel): Analysis of horizontal and vertical dust flux, vertical dust distribution and dust grain size [J]. *Journal of arid environments*, 2004, 57(1): 117-140.
- [4] SHAO Y P, LESLIE L M. Wind erosion prediction over the Australian continent [J]. *J. Geophys Res*, 1997, 102(D25): 30091-30105.
- [5] ZOBECK T M, VAN PELT R S. Wind induced dust generation and transport mechanics on a bare agriculture field [J]. *J. Hazard Mater*, 2006, 132(1): 26-38.
- [6] 刘新春, 代亚亚, 陈红娜, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘天气过程粗细颗粒中水溶性离子组分垂直分布特征 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(6): 991-1000.
- [7] 张宏升, 朱好, 彭艳, 等. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究 [J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 744-752.
- [8] 李思思, 黄正旭, 王存美, 等. 张家口市一次沙尘天气气溶胶单颗粒理化特征和来源研究 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 437-444.
- [9] 师华定, 史华伟, 白鹤鸣, 等. 沙尘与大雾天气对京津空气环境质量影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 262-266.
- [10] 韩博, 冯银广, 毕晓辉, 等. 无锡市区环境空气中 PM₁₀ 来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 35-39.
- [11] 张志刚, 矫海燕, 毕宝贵, 等. 沙尘天气对北京大气重污染影响特征分析 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 309-314.
- [12] 王明仕, 李哈, 王明娅, 等. 中国大气降尘地域性分布特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 1933-1937.
- [13] 玉散·吐拉甫, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 等. 极干旱地区沙尘与非沙尘天气 PM_{2.5} 及所含金属元素的浓度特征分析 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(9): 1529-1538.
- [14] 关欣, 李巧云, 文倩, 等. 和田降尘与浮尘、扬沙、沙尘暴关系的研究 [J]. *环境科学学报*, 2000, 13(6): 1-3, 7.
- [15] 张正德, 董治宝, 赵爱国, 腾格里沙漠东南部近地层沙尘水平通量和降尘量随高度的变化特征 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23(2): 165-169.
- [16] 张锦春, 赵明, 方峨天, 等. 民勤沙尘源区近地面降尘特征研究 [J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 17-21.
- [17] 罗凤敏, 辛智鸣, 高君亮, 等. 乌兰布和沙漠东北缘近地层风速和降尘量特征 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 147-154.
- [18] 闫婷, 王春. 多伦县防沙治沙工程建设成效分析 [J]. *内蒙古林业科技*, 2017, 43(3): 18-20.
- [19] 闫德仁, 黄海广, 薛博. 浑善达克沙地大气降尘颗粒物特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 87-92.
- [20] JICKELLS T D, AN Z S, ANDERSEN K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean, biogeochemistry, and climate [J]. *Science*, 2005, 308(5718): 67-71.
- [21] 高会旺, 祁建华, 石金辉, 等. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 1-10.
- [22] 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): 1-8.
- [23] FORMENTI P, RAJOT J L, DESBOEUF K, et al. Regional variability of the composition of mineral dust from western Africa: Results from the AMMA SOP0/DABEX and DODO field campaigns [J]. *Journal of geophysics research*, 2008, 113: 1-12.
- [24] 康永德, 夏开伟, 杨兴华, 等. 近地层沙尘水平通量与集沙效率野外观测分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 168-174.
- [25] 杨兴华, 何清, 艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠东南缘沙尘暴过程中近地表沙尘水平通量观测研究 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1299-1304.