

乌兰布和沙漠东北部近地层沙尘水平通量和降尘量变化特征分析

罗凤敏, 高君亮, 刘芳, 李新乐, 黄雅茹, 葛根巴图, 段瑞兵, 辛智鸣*
(中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站,
内蒙古 巴彦淖尔 015200)

摘要:研究沙尘随高度的变化特征对揭示沙尘物质在近地层分布特征具有重要意义。通过收集乌兰布和沙漠东北部近地层 50 m 沙尘水平通量和降尘量数据,研究了该区域防护林对沙尘水平和垂直通量变化特征的影响。结果表明:①沙尘水平通量及降尘量均随高度的增加而减小,防护林内二者与高度的关系符合幂函数,防护林外二者与高度的关系符合指数函数;②沙尘水平通量与降尘量之间为正相关关系,二者可用线性函数表示;③沙尘水平通量和降尘量均与风速呈现线性关系。
关键词:地表;沙尘水平通量;降尘量;乌兰布和荒漠生态系统
doi:10.13304/j.nykjdb.2018.0195
中图分类号:X831 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-0864(2019)02-0163-07

Variation Characteristics Analysis of Near-Surface Dust Horizontal Flux and Dust Fall Amount in Northeast of Ulan Buh Desert

LUO Fengmin, GAO Junliang, LIU Fang, LI Xinle, HUANG Yaru, GEGEN Batu, DUAN Ruibing, XIN Zhiming*
(Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Inner Mongolia Bayannur 015200, China)

Abstract:It is of great significance to study the characteristics of sand-dust varied with height for revealing the distribution traits of sand-dust in the surface layer. This paper collected data of horizontal sand-dust fulx and dust fall amount from the dust observation tower within the height of 50 m, located in the northeast of Ulan Buh Desert; and studied the effect of regional protection forest on change features of sand-dust horizontal and vertical flux. The results indicated that: ① Both horizontal sand-dust flux and dust fall amount decreased along with the height increasing. The distribution characteristics of horizontal dust flux and dust fall amount with height accorded with power function inside of the shelterbelt, and the distribution characteristics of them accorded with exponential function outside of the shelterbelt. ② The horizontal dust flux and dust fall amount were positively correlated. They could be presented by linear functions. ③ Both horizontal dust flux and dust fall amount with wind speed presented a linear relationship.
Key words:surface layer; horizontal sand-dust flux; dust fall amount; Ulan Buh desert ecosystem

沙尘颗粒的输送会给人们的生产和生活带来严重威胁,强沙尘输送还会造成长期的气候效应,影响区域乃至全球气候和环境变化。沙尘通量是

沙尘输送研究的重要内容,准确地估算沙尘通量有助于提高对沙尘输送的量化认识,并为沙尘输送的数值模拟提供关键参数^[1~3]。沙尘监测是提

收稿日期:2018-03-28; 接受日期:2018-05-12
基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2016MB003);内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站运行补助项目(2018-LYPT-DW-140)资助。
作者简介:罗凤敏,工程师,硕士,主要从事荒漠生态监测研究。E-mail:lfm359541965@126.com。* 通信作者:辛智鸣,高级工程师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:xzmlkn@163.com。

供沙尘预警、研究防治措施和减轻沙尘灾害带来损失的必要手段,近地层(0~50 m)不仅提供了沙尘释放的源地,也是人们生活及工农业生产的主要空间。因此,加强近地面沙尘的监测,在灾害防治等方面具有重要的现实意义。

近地层沙尘物质的活动主要包括释放过程(包括沙尘的起动过程、跃移高度、释放量)、输送过程(包括输送高度、水平通量、降尘量的梯度变化)及沉降过程(包括沙尘沉降速度、沉降量)^[4]。沙尘水平通量及沙尘降尘量的研究对明确沙尘在近地层的分布特征及沉降量有重要意义。目前,国外学者在近地层水平通量、降尘量等方面取得了一定的研究成果^[5,6],但是对近地层沙尘随高度的变化特征研究不多,并且其研究观测高度相对较低^[7],相关成果不能充分解释沙尘近地层水平通量、降尘量的变化趋势。我国对沙尘水平通量和降尘量的研究起步较晚,二者随高度变化特征研究相对较少^[4,8-10],研究方法以风洞试验、野外观测以及数值模拟为主^[11,12]。野外观测大多集中在城市,沙漠及其边缘地区研究较少,并且观测高度相对较低(2 m 左右)^[12-17]。风洞模拟试验高度多在 1 m 内,更高范围或不同高度的沙尘水平通量特征的研究则较少。

沙漠和干旱地区的风蚀以及随风扬起过程是空气中的沙尘主要来源^[18]。乌兰布和沙漠是我国北方地区沙尘源区之一,但是该区域近地层沙尘变化规律的长期观测及研究却极为稀少,因此,对该区域近地层沙尘物质的研究具有重要意义。基于此,本研究利用沙漠东北缘国家林业局内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站的风沙监测塔(高 50 m)监测的风速及沙尘数据,分析了近地层风速廓线、沙尘通量廓线变化特征,阐明了一场沙尘暴过后防护林网内外近地层风速廓线特征,沙尘水平通量和垂直通量变化特征。研究结果可为深入研究沙尘物质在近地层的分布特征提供科学依据。

1 研究内容与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北部,行政区划隶属内蒙古磴口县,中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第二实验林场。该区属于温带大陆性

气候,气候干燥,光照充足,风沙频繁。年均气温 7.8℃,年均日照 3 100~3 300 h,年均相对湿度 47%,多大风和干热风,年均风速 3.0~3.7 m/s,年平均大风日数 15.5 d,瞬时风速最高可超过 24 m/s。

1.2 研究方法

1.2.1 样地周边地貌及植被特征 防护林外围(E 40°19'36.12", N 106°47'32.28"):半固定沙地和固定沙地,地势起伏不平,相对高差较小。土壤主要为风沙土。植物主要为白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)和油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.),大部分白刺形成了灌丛沙堆,沙堆大小为(2~6)m×(4~8)m,高 1.2~3.6 m。伴生植物种主要为籽蒿(*A. sphaerocephala* Krasch.)和沙米[*Agriophyllum squarrosum*(L.) Moq.]^[19]。

人工林防护内部(E 40°20'7.44", N 106°47'38.76"):农耕地,地势平坦,周围为农田防护林网。土壤类型主要为壤土和沙壤土。防护林网的树种主要为新疆杨(*Populus. alba* L. var. *pyramidalis* Bge.),沿农田灌溉渠道种植,两行一带,株行距为 1 m×2 m,高 20~24 m。种植向日葵(*Helianthus annus* L.)和玉米(*Zea mays* L.)两种农作物^[19]。

1.2.2 沙尘采集装置 人工林防护网内部及外围分别设置 50 m 的风沙塔,每个风沙塔上安装 1 套沙尘水平通量和垂直降尘量采集器,采集器距地面高度为 48 m、44 m、40 m、36 m、32 m、28 m、24 m、20 m、16 m、12 m、8 m、4 m、2 m、1 m、0.5 m。沙尘水平通量收集采用董治宝等^[20]设计的采集器,该采集器能够跟踪风向变化收集沙尘,收集口为 20 mm×50 mm;沙尘降尘量收集装置为直径 15 cm、高 30 cm 的圆柱形平底玻璃容器。在距地面高度 48 m、36 m、24 m、16 m、12 m、8 m、4 m、2 m、1 m 处各安装一个自记式风速风向采集仪(启动风速 0.5 m/s,精度±0.3 m/s)。

风速及沙尘数据均为每月的 1~5 号进行采集,本研究所用沙尘数据为 2013 年 4 月 15 日一场大风过后采集,沙尘暴持续时间为 2 h,能见度 600 m,最大风速 11.30 m/s,沙尘气溶胶 TSP(total suspended particulates)浓度值为 1 043.09 μg/m³,PM₁₀浓度为 64.01 μg/m³;风速数据收集时段为 2013 年 1~12 月,采集频率为 10 min。每次采样均避开降水过程,以保证收集样品为自然风干状

态。所有样品数据均为现场测定。

1.3 数据分析

沙尘水平通量和降尘量观测采用梯度法。为了避免人为误差, 沙尘水平通量采集器观测前后的质量差作为沙尘水平通量。采用干集尘方式可以使降尘接近自然界实际的风沙沉积过程。本研究所用风速数据为年平均值和月平均值, 沙尘数据为一次沙尘暴过后所沉降的沙尘总量。采用 Excel 2003 和 Sigmaplot 软件进行数据整理、作图和分析。

沙尘水平通量和降尘量通过以下公式计算:

$$M_H = W_H / ab;$$
$$M_V = W_V / \pi r^2$$

式中, M_H 为水平通量 (g/m^2); W_H 为集尘器内收集的沙尘净重 (g); a 为集尘器集尘口宽度 (mm); b 为集尘器集尘口高度 (mm); M_V 为降尘量 (g/m^2); W_V 为集尘缸内接收的沙尘净重 (g); r 为集尘缸缸口半径 (cm)。

2 结果与分析

2.1 风速廓线

风速可直接影响沙尘的释放和输送, 风速在近地层的分布特征决定了沙尘物质的输送高度和距离。因此, 风速脉动规律研究能够为风与沙粒输移关系的进一步研究奠定坚实的理论基础。

由图 1 可知, 防护林外风速明显大于防护林网内风速, 并且两个样地近地层风速均随高度呈幂函数增加, 防护林内的风速廓线拟合方程为 $y =$

$0.86x^{0.55}$ ($R^2 = 0.99, P < 0.01$), 防护林外的风速廓线拟合方程为 $y = 1.52x^{0.42}$ ($R^2 = 0.96, P < 0.01$)。而 3~5 月是乌兰布和沙漠东部地区风速较大的时期, 因此对 3~5 月的风速廓线进行分析。对防护林内外的风速进行比较可知, 风速在近地层均随着高度的增加呈增大趋势, 防护林内在 16 m 高度内的变化较为明显, 而防护林外在 14 m 高度内的变化较为明显, 并且防护林外风速均高于防护林内。在 48 m 处, 防护林外风速在 3 月份达到最大值 6.02 m/s, 相同高度处防护林内的月均风速最大只有 5.34 m/s, 前者是后者的 1.13 倍。

由图 2 可以看出, 沙尘暴过境时防护林内外风速随高度变化特征与全年及 3~5 月一致, 均遵循幂函数, 并且防护林外风速明显大于防护林内风速。防护林内的风速廓线拟合方程为 $y = 3.21x^{0.30}$ ($R^2 = 0.98, P < 0.01$), 防护林外的风速廓线拟合方程为 $y = 4.66x^{0.30}$ ($R^2 = 0.92, P < 0.01$)。沙尘暴过境当天风速平均值在 48 m 处达到最大值 11.18 m/s, 全年最大平均风速在 48 m 处 (8.38 m/s), 3~5 月最大平均风速在 48 m 处 (6.02 m/s)。

2.2 沙尘水平通量廓线

由图 3 可知, 防护林内沙尘水平通量明显高于防护林外围, 并且随着高度的增加, 二者的差值呈下降趋势。在 0.5 m 处, 防护林内沙尘水平通量达到最大值 $2\,750.40\text{ g}/\text{m}^2$, 相同高度处防护林外的沙尘水平通量也达到最大值, 但是仅为 $1\,063.10\text{ g}/\text{m}^2$, 前者为后者的 2.59 倍。一场沙尘暴过后, 防护林外沙尘水平通量 (y) 与高度 (x) 表

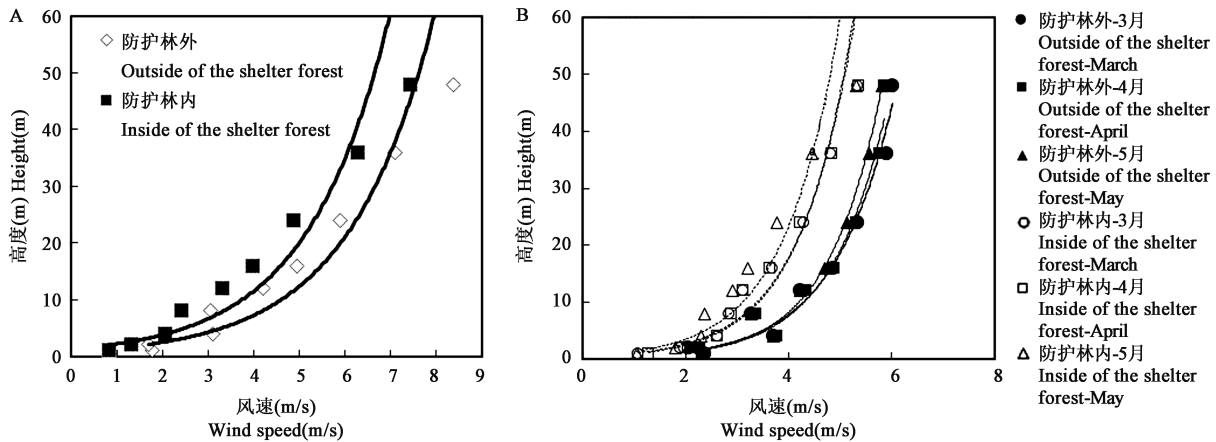


图 1 2013 年全年 (A) 及 3~5 月 (B) 防护林内外风速廓线

Fig.1 Wind velocity profile of inside and outside of the shelter forest in whole years (A) and from March to May (B) in 2013.

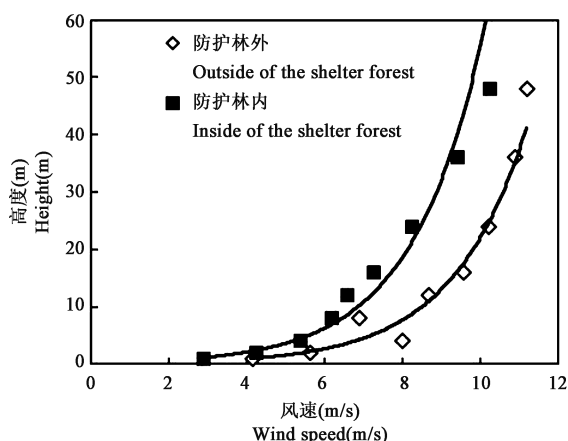


图2 风速廓线(2013年4月15日)

Fig.2 Wind velocity profile in April 15, 2013.

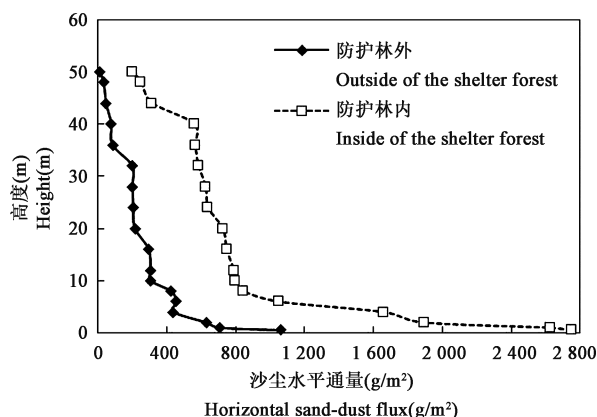


图3 沙尘水平通量廓线(2013年4月15日)

Fig.3 Horizontal sand-dust flux velocity profile in April 15, 2013.

现为指数函数的关系: $y = 801.85e^{-0.07x}$ ($R^2 = 0.89$, $P < 0.01$); 防护林内沙尘水平通量(y)与高度(x)表现为幂函数的关系: $y = 2583.5x^{-0.49}$ ($R^2 = 0.87$, $P < 0.01$)。

2.3 沙尘降尘量廓线

沙尘在近地层输送过程中,颗粒较小的沙尘物质在风力作用下能够到达更远的地方,但是因为重力或降水等因素,颗粒较大的沙尘物质则会降落到地面。

由图4可以看出,防护林内降尘量高于防护林外,但是幅度不大。总体来看,0~20 m范围内,防护林外与防护林内的降尘量差值相对较大;而20~50 m内二者的降尘量差值逐渐减小。在0.5 m处,防护林内降尘量达到最大值 25.29 g/m²,相同高度处防护林外的降尘量也达到最大

值 14.36 g/m²,前者为后者的 1.76 倍。由图4可知,一场沙尘暴过后,防护林外降尘量廓线与沙尘水平通量廓线很相似,也表现为指数函数的关系: $y = 7.52e^{-0.08x}$ ($R^2 = 0.96$, $P < 0.01$); 防护林内降尘量(y)与高度(x)表现为幂函数的关系: $y = 19.94x^{-0.81}$ ($R^2 = 0.95$, $P < 0.01$)。

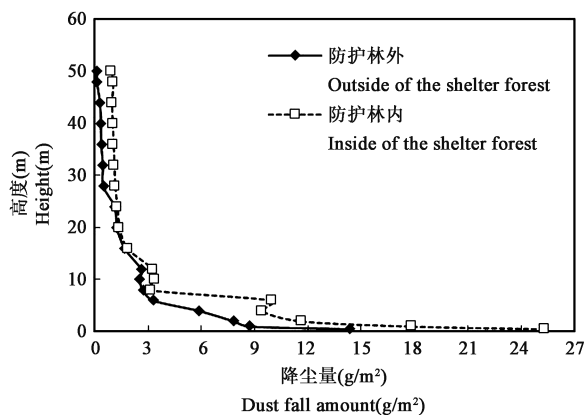


图4 降尘量廓线(2013年4月15日)

Fig.4 Dust fall amount velocity profile in April 15, 2013.

2.4 沙尘水平通量与降尘量的关系

图5显示,防护林网内和防护林网外围的沙尘水平通量与降尘量之间均为极显著正相关关系 ($R^2 = 0.88 \sim 0.92$, $P < 0.01$),二者之间的关系均可用线性函数表示。实际中,比较容易观测近地层某一高度的沙尘质量,但是不同高度上的沙尘质量分布特征观测就比较难。因此,降尘量可以依据沙尘水平通量和降尘量的关系进行计算,腾格里沙漠东南部的沙尘通量也存在相似的规律^[4],但这只是部分地区的结论,还需在其他区域进行多次实验分析才能确定适用范围,并确定是否为普遍规律。

2.5 沙尘水平通量与风速的关系

图6为不同高度处沙尘水平通量与风速的关系拟合曲线,由图6可知,防护林外和防护林内的沙尘水平通量与风速均表现为正相关关系,可用线性函数来表示。防护林外沙尘水平通量与风速的关系为: $y = -0.0094x + 12.0640$ ($R^2 = 0.84$, $P < 0.01$); 防护林内沙尘水平通量与风速的关系为: $y = -0.0012x + 8.0396$ ($R^2 = 0.87$, $P < 0.01$)。

2.6 沙尘降尘量与风速的关系

图7为不同高度处降尘量与风速的关系拟合曲线,由图7可知,防护林外和防护林内的降尘量

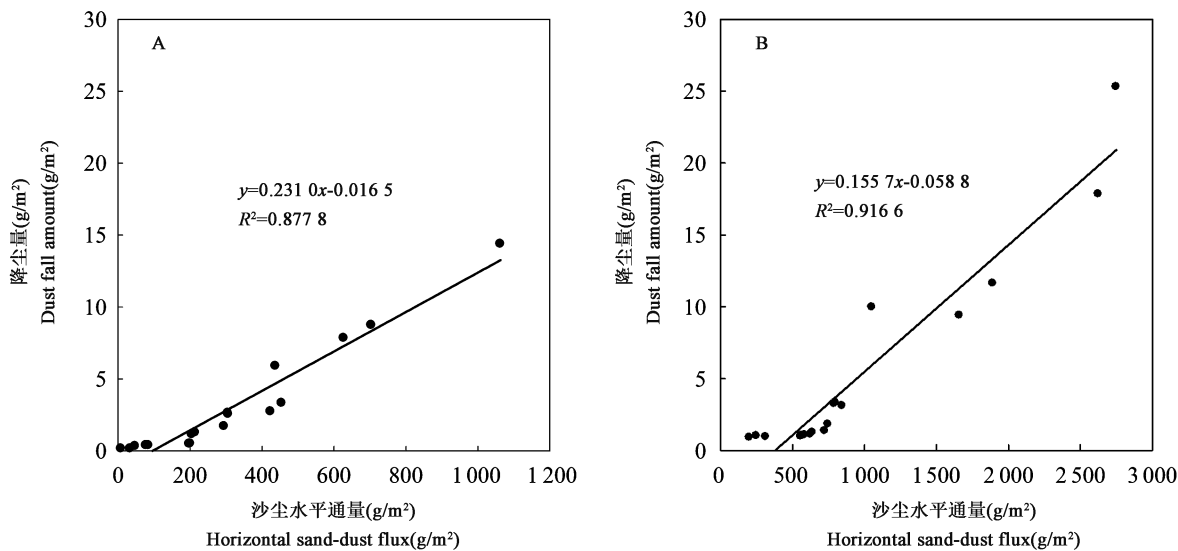


图 5 防护林外 (A) 和防护林内 (B) 沙尘水平通量和降尘量的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of the horizontal sand-dust flux and dust fall amount of outside (A) and inside (B) of the shelter forest.

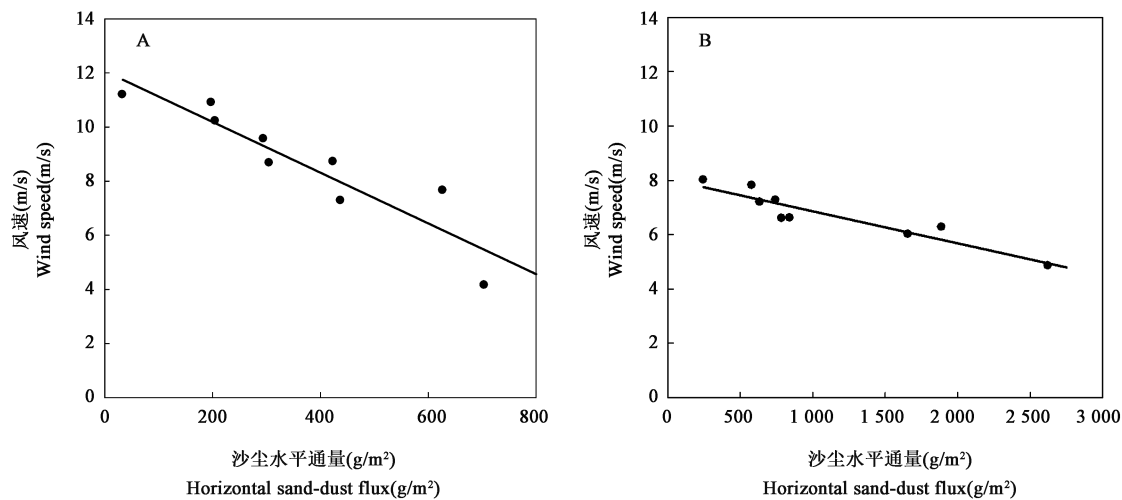


图 6 防护林外 (A) 和防护林内 (B) 沙尘水平通量与风速的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of the horizontal sand-dust flux and wind speed of outside (A) and inside (B) of the shelter forest.

与风速均表现为正相关关系,可用线性函数来表示。防护林外降尘量与风速的关系为: $y = -0.6289x + 10.8788$ ($R^2 = 0.86, P < 0.01$);防护林内降尘量与风速的关系为: $y = -0.1307x + 7.4468$ ($R^2 = 0.84, P < 0.01$)。

3 讨论

沙尘输送研究的重要内容之一为沙尘水平通

量,对沙尘水平通量进行研究可以为沙尘输送的数值模拟提供必要参数。大气降尘过程是地球表层地-气系统物质交换的一种形式,具有重要的环境指征意义,所以大气污染监测的参考性指标大多选择大气降尘量。相对而言,近地层沙尘水平通量的研究较为容易,因此众多学者试图通过研究沙尘水平通量与降尘量的相互关系,进而对降尘量进行计算^[5,7]。本研究结果表明,乌兰布和沙漠东缘的近地层(0~50 m)防护林内沙尘水

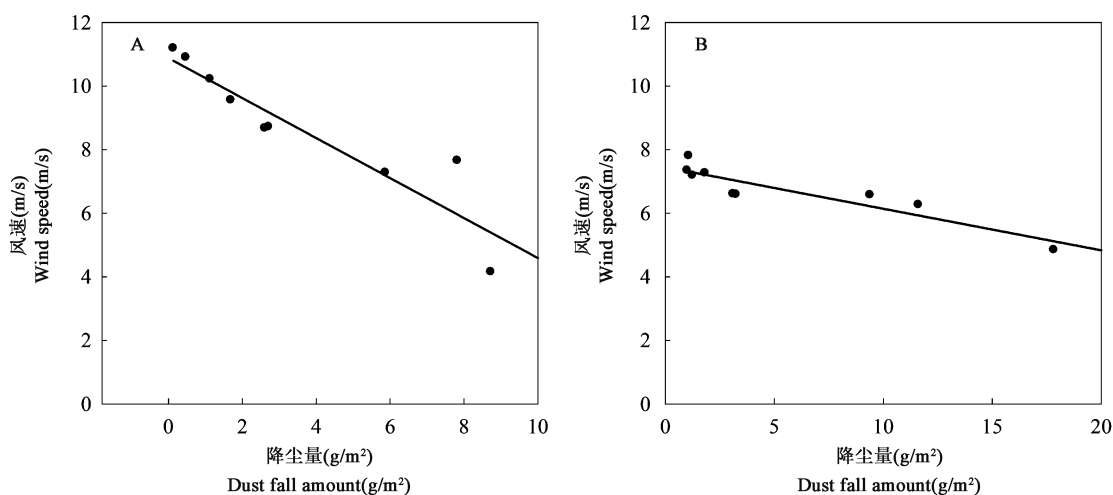


图7 防护林外(A)和防护林内(B)沙尘降尘量与风速的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of the dust fall amount and wind speed of outside (A) and inside (B) of the shelter forest.

平通量廓线和降尘量廓线符合幂函数关系,防护林外符合指数函数关系,与张正偲等^[4]的研究结果相似。但是,关于近地层沙尘随高度变化规律的研究结果不尽相同,有的学者认为其随高度分布规律符合幂函数^[2,6,21],还有学者认为是指数函数关系^[22,23]。因此还需要进行长期的野外观测,为更进一步明确沙尘在近地层分布特征提供科学依据。

空气中的沙尘质量随高度的增加而减少,但是不同观测期的变化规律也不尽相同,春季近地层沙尘随高度的分层最明显^[6]。笔者认为,沙尘在近地层的水平通量与降尘量存在线性函数关系,这与张正偲等^[4]的研究结果相似。

大气降尘与环境因子之间是一个相互影响、相互作用的复杂反馈关系,二者之间存在密切的关系^[6~9,24]。沙尘暴天气对大气降尘均有影响^[25],风速会影响输沙通量的垂直分布,在总输沙量大致相同的条件下,随着风速增大,近地表气流层中搬运的沙量减少、而上层输沙量则相应增加^[26]。下垫面的植被覆盖状况及人类活动与大气降尘也有着紧密的关系^[14,27],防护林带能够改变林网内的小气候,对林网内的湍流交换具有减弱作用,对抑制沙尘垂直输送具有重要作用,所以防护林网内的沙尘质量较少。

参 考 文 献

- [1] McTainsh G, Strong C. The role of aeolian dust in ecosystems [J]. *Geomorphology*, 2007, 8(9): 39-54.
- [2] 杨兴华,何清,霍文,等.塔克拉玛干沙漠南缘风沙跃移运动研究——以策勒为例[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 910-914.
Yang X H, He Q, Huo W, *et al.*. Sand saltation in the south margin of the Taklimakan desert——A case study in Cele county [J]. *J. Desert Res.*, 2012, 32(4): 910-914.
- [3] Dong Z B, Man D Q, Luo W Y, *et al.*. Horizontal aeolian sediment flux in the Minqin area, a major source of Chinese dust storms [J]. *Geomorphology*, 2010, 116: 58-66.
- [4] 张正偲,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.
Zhang Z C, Dong Z B, Zhao A G. Variation characteristics of near-surface dust horizontal flux and deposition amount with height in the southeastern Tengger desert [J]. *Res. Environ. Sci.*, 2010, 23(2): 165-169.
- [5] Shao Y P, Leslie L M. Wind erosion prediction over the Australian continent [J]. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 1997, 102: 30091-30105.
- [6] 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]. *J. Arid Environ.*, 2004, 57(1): 117-140.
- [7] Zobeck T M, Scottvan P R. Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agriculture field [J]. *J. Hazardous Materials*, 2006, 132(1): 26-38.
- [8] 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.
Yang X H, He Q, Mamtimin A, *et al.*. Observational study on near-surface horizontal sand-dust flux of sandstorms in the southeastern fringe of the Taklimakan desert [J]. *J. Desert Res.*, 2013, 33(5): 1299-1304.
- [9] 高君亮,辛智鸣,刘芳,等.乌兰布和沙漠东北部大气降尘特征及影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(8): 145-150.

- Gao J L, Xin Z M, Liu F, *et al.*. Analysis of the characteristics and affecting factors of atmospheric dustfall in northeastern Ulan Buh desert [J]. *J. Arid Land Res. Environ.*, 2014, 28(8): 145–150.
- [10] 严平, 董光荣. 青海共和盆地降尘观测与 ^{137}Cs 测定的初步结果[J]. *环境科学*, 2001, 22(2): 64–68.
- Yan P, Dong G R. Dust deposition and its measurement by ^{137}Cs in the Gonghe basin, Qinghai province, China [J]. *Environ. Sci.*, 2001, 22(2): 64–68.
- [11] 刘佳, 管清玉, 张君弟. 大气降尘研究方法综述[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46: 85–89, 95.
- Liu J, Guan Q Y, Zhang J D. Review of atmospheric dust research methods [J]. *J. Lanzhou Univ. (Nat. Sci.)*, 2010, 46: 85–89, 95.
- [12] 张正偲, 董治宝, 赵爱国. 2006年春季天气背景下腾格里沙漠近地面气象要素与输沙通量的变化趋势[J]. *科学通报*, 2008, 53(16): 1953–1960.
- [13] 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.
- Zhang J C, Zhao M, Fang E T, *et al.*. Study on character of dustfall near the ground in Minqin dust source regions [J]. *Res. Environ. Sci.*, 2008, 21(3): 17–21.
- [14] 李晋昌, 董治宝, 王训明. 中国北方东部地区春季降尘量及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 195–201.
- Li J C, Dong Z B, Wang X M. Amount of spring dustfall and its environmental significance in east part of northern China [J]. *J. Desert Res.*, 2008, 28(2): 195–201.
- [15] 冯鑫媛, 王式功, 杨德保, 等. 近几年沙尘天气对中国北方环保重点城市可吸入颗粒物污染的影响[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 735–740.
- Feng X Y, Wang S G, Yang D B, *et al.*. Influence of dust events on PM_{10} pollution in key environmental protection cities of northern China during recent years [J]. *J. Desert Res.*, 2011, 31(3): 735–740.
- [16] 杨兴华, 何清, 霍文, 等. 沙漠地区不同下垫面近地表沙尘水平通量研究[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 564–569.
- Yang X H, He Q, Huo W, *et al.*. Near-surface horizontal sand-dust flux over different underlying surfaces in a desert [J]. *Arid Zone Res.*, 2014, 31(3): 564–569.
- [17] 汪季. 乌兰布和沙漠东北缘植被抑制沙尘机理的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 博士学位论文, 2004.
- Wang J. Research on sand-dust control mechanism of vegetation at the northeast edge of Ulan Buh desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, Doctor Dissertation, 2004.
- [18] 韩晶晶, 王式功, 祈斌, 等. 气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 362–369.
- Han J J, Wang S G, Qi B, *et al.*. Distribution of aerosol optical thickness and its relation with dusty weather in China [J]. *J. Desert Res.*, 2006, 26(3): 362–369.
- [19] 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.
- Luo F M, Xin Z M, Gao J L, *et al.*. Characteristics of near-surface wind speed and sand-dust flux at northeast edge of Ulan Buh desert [J]. *Trans. CSAE*, 2016, 32(24): 147–154.
- [20] 董治宝, 赵爱国, 邓俭. 沙尘水平通量测量器[P]. 中国, ZL0313453414.
- [21] 杨兴华, 李红军, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠荒漠过渡带春季风沙活动特征: 以肖塘为例[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 915–920.
- Yang X H, Li H J, He Q, *et al.*. Blown sand activities in spring in the desert transitional zone of the Taklimakan desert: A case in Xiaotang area [J]. *J. Desert Res.*, 2012, 32(4): 915–920.
- [22] 杨东亮, 王雪芹, 胡永峰, 等. 风沙流输沙通量垂向分布研究: 以塔克拉玛干沙漠南缘流沙地表风沙流观测为例[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 631–639.
- Yang D L, Wang X Q, Hu Y F, *et al.*. Vertical distribution of aeolian sand mass flux based on field observation at southern rim of the Taklimakan desert [J]. *J. Desert Res.*, 2012, 32(3): 631–639.
- [23] 何清, 杨兴华, 艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究——试验介绍与观测结果初报[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 315–322.
- He Q, Y X H, Mamtimin A, *et al.*. Dustfall particle-size and sediment rate at the southern edge of Taklimakan desert: Field experiment and preliminary report [J]. *J. Desert Res.*, 2011, 31(2): 315–322.
- [24] 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征和沉积速率[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(2): 127–132.
- Xiao H L, Zhang J X, Li J G. Properties of dust fall particle size and depositing rate in southeast Tengger desert [J]. *Chin. J. Desert*, 1997, 17(2): 127–132.
- [25] 刘新春, 钟玉婷, 王敏仲, 等. 塔里木盆地大气降尘变化特征及影响因素分析[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 954–960.
- Liu X C, Zhong Y T, Wang M Z, *et al.*. Atmospheric dustfall variation and factor analysis in Tarim basin [J]. *J. Desert Res.*, 2010, 30(4): 954–960.
- [26] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1194–1203.
- Feng D J, Ni J R, Li Z S. Vertical mass flux profiles of different grain size groups in aeolian sand transport [J]. *Acta Geographica Sin.*, 2007, 62(11): 1194–1203.
- [27] 宋阳, 刘连友, 严平, 等. 中国北方5种下垫面对沙尘暴的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 15–18.
- Song Y, Liu L Y, Yan P, *et al.*. Study on the influence of five kinds of underlying matches on sandstorm in north China [J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2005, 19(6): 15–18.

(责任编辑: 陈凌云)