

荒漠绿洲过渡带飘尘垂直分布特征及其 主要气象影响因素

龚雪伟^{1,2}, 何学敏^{2,3}, 吕光辉^{2,3}, 陈悦^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046)

摘 要:利用激光尘埃粒子计数器,结合气象梯度自动观测系统,于 2014 年 7 月植物生长季获取新疆艾比湖湿地国家级自然保护区东大桥管护站附近 7 个高度(2,3,6,12,15,21,27 m)上 6 个粒径段($0.3\ \mu\text{m}\leq x<0.5\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}\leq x<1.0\ \mu\text{m}$, $1.0\ \mu\text{m}\leq x<3.0\ \mu\text{m}$, $3.0\ \mu\text{m}\leq x<5.0\ \mu\text{m}$, $5.0\ \mu\text{m}\leq x<10.0\ \mu\text{m}$, $10.0\ \mu\text{m}\leq x$)飘尘浓度和气象数据,探究了该区域内空气飘尘垂直分布特征与主要气象影响因素。结果表明:研究区飘尘各粒径组中, $0.3\ \mu\text{m}\leq x<3.0\ \mu\text{m}$ 所占比例最高,累计贡献率高达 97.6%。飘尘总浓度($0.3\ \mu\text{m}\leq x$)在 7 个高度上的分异规律为 $C_{3\text{m}}>C_{6\text{m}}>C_{2\text{m}}>C_{21\text{m}}>C_{27\text{m}}>C_{12\text{m}}>C_{15\text{m}}$,表现出中间低两头高的“哑铃效应”。气象—飘尘回归方程反演的飘尘数据与实测数据呈现显著正相关($p<0.05$),且与实测日变化趋势基本一致。风速对飘尘浓度有极显著($p<0.01$)的双重作用,风速小于临界值有利于飘尘积累,反之促进飘尘稀释,且正反效应的临界值随高度的增加而降低;相对湿度的增加极显著($p<0.01$)地降低飘尘浓度。

关键词:荒漠绿洲过渡带; 空气飘尘; 垂直分布; 气象—飘尘多元回归

中图分类号:X831 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2017)01-0096-07

Vertical Distribution Characteristics and the Main Meteorological Factors of Floating Dust in a Desert-oasis Ecotone of Ebinur Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

GONG Xuewei^{1,2}, HE Xuemin^{2,3}, LYU Guanghui^{2,3}, CHEN Yue^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China; 3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Six particle size interval ($0.3\ \mu\text{m}\leq x<0.5\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}\leq x<1.0\ \mu\text{m}$, $1.0\ \mu\text{m}\leq x<3.0\ \mu\text{m}$, $3.0\ \mu\text{m}\leq x<5.0\ \mu\text{m}$, $5.0\ \mu\text{m}\leq x<10.0\ \mu\text{m}$, $10.0\ \mu\text{m}\leq x$) floating dust concentrations and meteorological data on seven kinds of height (2, 3, 6, 12, 15, 21, 27 m) were measured by the laser dust particle counter and automatic observing system for meteorological gradient to study vertical distribution characteristics and the main meteorological factors of floating dust in a Desert-oasis Ecotone of Ebinur Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region. The results showed that the average contribution of $0.3\ \mu\text{m}\leq x<3.0\ \mu\text{m}$ among different size interval floating dusts accounted for the highest, add up to 97.6%. The distribution rule of floating dust overall contribution ($0.3\ \mu\text{m}\leq x$) on the seven layer heights was high on both sides of the middle low ($C_{3\text{m}}>C_{6\text{m}}>C_{2\text{m}}>C_{21\text{m}}>C_{27\text{m}}>C_{12\text{m}}>C_{15\text{m}}$), which could be called ‘dumbbell effect’. Analogue data obtained from meteorological-floating dust regression equation and measured data showed the significantly positive correlation ($p<0.05$), and the diurnal variation trend of analogue data was similar to the measured data. Wind speed had the significant positive and negative effects on floating dust concentrations (wind speed less than the critical value in favor of floating dust accumulation, whereas promoted floating dust diluted) ($p<0.01$), and floating dust concentration reduced obviously ($p<0.01$) with the increase of relative humidity.

Keywords: desert-oasis ecotone; floating dust; vertical distribution; meteorological-floating dust multiple regression analysis

气溶胶是空气中悬浮颗粒物的总称,可分为降尘和飘尘两种,通常把空气动力学当量直径大于 10.0 μm 的称作降尘^[1],小于或等于 10.0 μm 则称作可吸入颗粒物或者飘尘^[2]。飘尘在空气中滞留时间长,传播距离远,是空气污染的主要来源。飘尘表面吸附的大量有机化合物、重金属、无机盐和病毒进入呼吸系统对人体生命安全造成威胁^[3];飘尘具有消光作用,能够降低大气能见度,引起雾霾,影响辐射平衡^[4]。目前飘尘的研究重点侧重于人口密集和洁净区,对于自然界中飘尘分布规律和影响因素的研究较为缺乏。因此,有必要对其在自然界分布格局、组分特征和主要影响因素展开研究。

荒漠绿洲过渡带是典型的生态交错带,生态环境受自然和人为因素的双重扰动,具有敏感且脆弱的特点,在荒漠与绿洲间的能量与物质交换过程中发挥着重要的缓冲作用^[5],这种作用更加体现在对沙尘的阻隔上。研究表明,新疆艾比湖干旱湖盆裸露区细小的沉淀物质^[6],加之艾比湖东南部的湖积—冲击平原上广厚的第四纪松散沉积物,为沙尘的形成提供了丰富的沙源;裸露的风沙土在阿拉山口强劲大风的推动下,长驱直入,成为中国北部重要的沙尘策源地^[7],直接威胁着农田和绿洲,影响天山北坡经济带的发展。资料显示,精河县部分乡镇和兵团农五师农牧团场年平均风沙天气超过 60 d,年降尘量超过 100 t/km²^[8]。艾比湖地区风沙天气每年造成的直接经济损失达 1 亿元,间接损失更高达 3.64 亿元^[9]。粗颗粒风沙破坏力大但作用时间短,而微米级黏粒则以气溶胶形式水平扩散,长时间悬浮于近地层污染环境^[10]。近年来,为发展经济,荒漠绿洲过渡带农垦、放牧等生产活动增加明显,过渡带面积缩减,更多的细颗粒尘埃被输送到绿洲内部^[11]。而以往的研究往往着眼于粗颗粒风沙的垂直分布特征及水平输送量^[12],微米级飘尘鲜有研究。飘尘质量轻、体积小,在地—气物质交换过程中易受气象因子和下垫面特征的影响,研究

气象因子调控下的艾比湖荒漠—绿洲过渡带飘尘空间分布特征,对于人工绿洲外围防风固沙和空气质量评价具有重要意义。本研究以典型荒漠绿洲过渡带为研究区,旨在探究飘尘在垂直梯度上的分异规律和粒径组成特征及其主要气象影响因素,结合同步气象观测数据建立气象—飘尘回归方程,并验证方程精度,以期为深入开展荒漠绿洲过渡带生态环境与自然界中空气飘尘研究提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验选择在艾比湖湿地国家级自然保护区(82°36′—83°50′E,44°30′—45°09′N)进行,保护区位于阿拉山口下风区,新疆准噶尔盆地西南。该区域属温带大陆性干旱气候,气候极端干燥,降水稀少且时空分布不均匀,主导风向为西北风。研究团队多年观测资料显示艾比湖年大风日数($\geq 10\text{ m/s}$)高达 150 d 以上,大风携带沙尘往东运输,影响范围十分广泛。独特的地形条件和苛刻的气候特征,使艾比湖流域形成了石漠、砾漠、沙漠、盐漠、沼泽和盐湖等多样化的地貌景观。本研究选取新疆大学在保护区内东大桥管护站所架设的通量观测塔(2012XJ-AiBiHu-OPEC)及周边区域为样区,该塔地处博尔塔拉蒙古自治州精河县托托乡境内艾比湖湿地保护区核心区阿其克苏河岸边,人为扰动较小,周围沙漠、戈壁和林地景观镶嵌共存,属于典型的湖沼和湖滨三角洲绿洲—荒漠过渡带。

通量塔周围为荒漠河岸杜加依林,群落盖度约为 50%~60%,优势物种胡杨(*Populus euphratica*)的平均高度约 8.5 m,伴生种有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和芦苇(*Phragmites australis*),平均高度低于胡杨^[13]。阿其克苏河沿岸河岸林下垫面的土壤粒度特征与起沙区阿拉山口相比,正偏程度较大,土壤质地较细^[14](表 1)。

表 1 研究区与上风区土壤粒度特征

区域	平均值/ μm	标准差	平均值/ μm		分选系数		峰度		偏度	
			极小	极大	极小	极大	极小	极大	极小	极大
阿拉山口	11.02	4.31	6.52	21.09	3.20	8.29	2.34	4.48	-0.68	0.01
阿其克苏河下游	15.54	11.03	2.9	43.74	3.17	8.39	1.51	5.43	1.51	5.43

1.2 试验方法

在通量观测塔上分 7 个垂直梯度(2,3,6,12,15,21,27 m)架设常规气象仪器,记录测量期间的空气温

度(air temperature,AT)、相对湿度(relative humidity,RH)、饱和水汽压(saturation vapor pressure,SVP)、风速(wind speed,WS)、风向(wind direction,WD)、光合

有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)和地面净辐射(net radiation, NR)等气象指标。本研究并未采用以往研究中常用的重量浓度定量法^[15],而是利用在飘尘污染评价方面具有直观、快速和轻便等特性的激光尘埃粒子计数器(Y09—3016, CHN)进行测定。该仪器内置气泵和激光光源,采样气流中的各粒径飘尘被气泵吸入光路,经过光敏区时(粒径通道为0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 μm),散射出与其粒径成一定比例的光通量,经光电转换、放大及处理后得到各粒径段飘尘的浓度(颗/ m^3)。

2014年7月3—29日,使用激光尘埃粒子计数器,在以上7种高度上测定6个粒径段($0.3 \mu\text{m} \leq x < 0.5 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m} \leq x < 1.0 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m} \leq x < 3.0 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m} \leq x < 5.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m} \leq x < 10.0 \mu\text{m}$, $10.0 \mu\text{m} \leq x$)飘尘的每立方米浓度(颗/ m^3),同时将这6个粒径段的浓度累加,求得飘尘总浓度($0.3 \mu\text{m} \leq x$)。测量方法为气象条件稳定的情况下(天气晴朗,无强风、无降雨),从低空到高空滚动测量,每个高度测量1天(为1个观测日),完成后即继续下个高度测量,依此类推;完成27 m高度后,继续从2 m处开始测量,如此循环,直至试验结束。受仪器工作温度范围和工作时间的限制,每个观测日的飘尘浓度测定时间为7:00—12:00, 18:00—23:00,计数间隔为8 min。为保证数据准确性,计数器采样头每次测量完成需进行清洗。

为保证不同高度上的飘尘数据具有可比性,按照

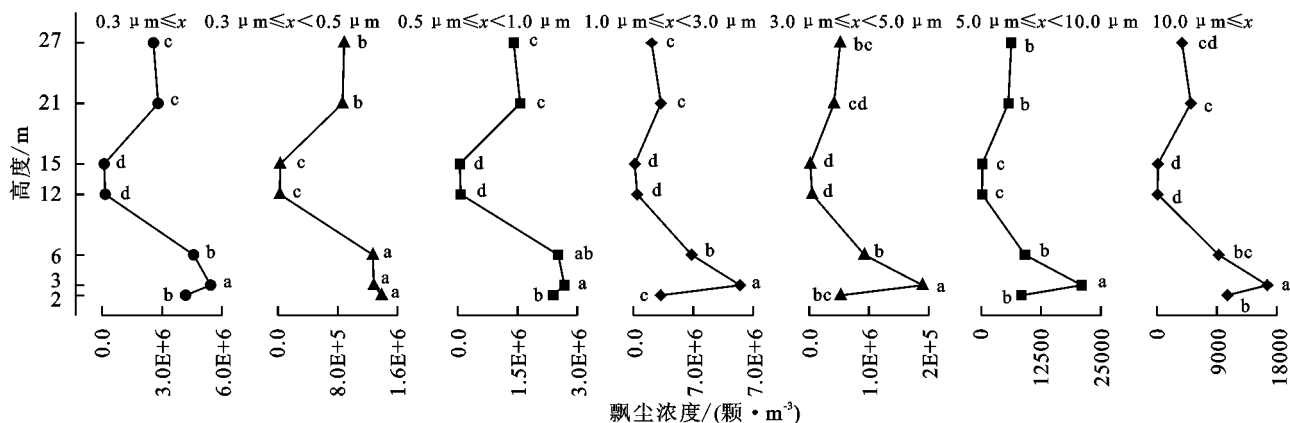


图1 大气飘尘随高度变化的分布规律

各粒径段飘尘浓度在竖直梯度上的分布规律基本相同,且与不同高度飘尘总浓度分布规律吻合。飘尘粒径越大,分布规律与总飘尘浓度趋同性越强;随着粒径的减小,逐渐与总飘尘浓度表现出差异,差异主要体现在 $0.3 \mu\text{m} \leq x < 3.0 \mu\text{m}$ 粒径段的2,3,6 m上。 $0.3 \mu\text{m} \leq x < 0.5 \mu\text{m}$ 粒径段2,3,6 m相互之间差异不显著($p > 0.05$), $1.0 \mu\text{m} \leq x < 3.0 \mu\text{m}$ 粒径段2,3,6 m相互之间差异显著($p < 0.05$), $0.5 \mu\text{m} \leq x$

气象条件基本一致的要求,对每个高度的多个观测日数据进行筛选,即最终挑出7个观测日的数据(具有基本一致的气象条件),分别代表7层高度的飘尘数据集,用于本文的统计分析。

1.3 数据处理

利用SPSS 17.0进行正态性检验、单因素方差分析、多元回归分析和相关分析,方差齐时多重比较采用Duncan检验,方差不齐时方差分析采用近似F检验Welch法,多重比较采用Dunnett's-T3方法检验。使用Sigmaplot 12.5绘制相关图件。

2 结果与分析

2.1 飘尘随高度分异规律

对不同高度飘尘数据集进行描述性统计发现,随着高度递增,飘尘总浓度($0.3 \mu\text{m} \leq x$)日均值分别为: 4.17×10^6 , 5.43×10^6 , 4.58×10^6 , 1.51×10^5 , 9.75×10^4 , 2.80×10^6 , 2.56×10^6 颗/ m^3 ,不同高度上飘尘总浓度排序结果为: $C_{3\text{m}} > C_{6\text{m}} > C_{2\text{m}} > C_{21\text{m}} > C_{27\text{m}} > C_{12\text{m}} > C_{15\text{m}}$ 。单因素方差分析表明,飘尘总浓度在空间(竖直梯度)上表现出明显的分层现象(图1),3 m处的飘尘总浓度显著($p < 0.05$)高于6 m和2 m,而21,27 m处的飘尘总浓度显著($p < 0.05$)低于2,6 m处的飘尘总浓度,且显著($p < 0.05$)高于12,15 m处的飘尘总浓度。总浓度表现为中层高度(12,15 m)低,而低空(2,3,6 m)和高空(21,27 m)较高,两头高中间低的分异规律表现出明显的“哑铃效应”。

$< 1.0 \mu\text{m}$ 粒径段仅2 m与3 m之间差异显著($p < 0.05$),其他高度则与总浓度分异规律相似。

2.2 不同高度上各粒径飘尘贡献度

计算竖直梯度上各粒径段飘尘所占的比例,发现不同高度上飘尘的粒径组成比例基本相同(详见表2)。对不同高度上同一粒径段占的比例计算算术平均值,视为该粒径段的平均贡献度(average contribution, AC)。 $0.5 \mu\text{m} \leq x < 1.0 \mu\text{m}$ 粒径段的

AC 最高,为 54.7%;其次为 $0.3\text{ }\mu\text{m}\leq x<0.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.0\text{ }\mu\text{m}\leq x<3.0\text{ }\mu\text{m}$ 粒径段,分别为 28.4% 和 14.5%,三者累计贡献率(accumulative contribution rate,ACR)达到 97.6%。 $3.0\text{ }\mu\text{m}\leq x<5.0\text{ }\mu\text{m}$, 5.0

$\mu\text{m}\leq x<10.0\text{ }\mu\text{m}$, $10.0\text{ }\mu\text{m}\leq x$ 粒径段 AC 分别为 2%,0.2% 和 0.2%,合计占比仅为 2.4%。也就是说,研究区小粒径飘尘所占比例较高,这种规律并不随着高度的改变而变化。

表 2 不同粒径飘尘贡献度随高度的变化

项目	$0.3\text{ }\mu\text{m}\leq x<0.5\text{ }\mu\text{m}$	$0.5\text{ }\mu\text{m}\leq x<1.0\text{ }\mu\text{m}$	$1.0\text{ }\mu\text{m}\leq x<3.0\text{ }\mu\text{m}$	$3.0\text{ }\mu\text{m}\leq x<5.0\text{ }\mu\text{m}$	$5.0\text{ }\mu\text{m}\leq x<10.0\text{ }\mu\text{m}$	$10.0\text{ }\mu\text{m}\leq x$
2 m	0.334 ± 0.004	0.570 ± 0.005	0.078 ± 0.003	0.013 ± 0.001	0.002 ± 0.000	0.003 ± 0.000
3 m	0.266 ± 0.010	0.509 ± 0.006	0.192 ± 0.011	0.027 ± 0.002	0.003 ± 0.000	0.003 ± 0.000
6 m	0.296 ± 0.012	0.563 ± 0.009	0.122 ± 0.008	0.016 ± 0.002	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.000
12 m	0.163 ± 0.002	0.518 ± 0.011	0.284 ± 0.010	0.034 ± 0.002	0.001 ± 0.000	0.001 ± 0.000
15 m	0.275 ± 0.005	0.548 ± 0.005	0.155 ± 0.007	0.018 ± 0.001	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.001
21 m	0.303 ± 0.003	0.559 ± 0.004	0.119 ± 0.005	0.015 ± 0.001	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.000
27 m	0.351 ± 0.004	0.564 ± 0.006	0.069 ± 0.005	0.013 ± 0.003	0.002 ± 0.001	0.001 ± 0.000
AC	28.4%	54.7%	14.5%	2.0%	0.2%	0.2%
ACR	28.4%	83.1%	97.6%	99.6%	99.8%	100%

2.3 飘尘浓度与气象数据回归分析

为了建立典型气象—飘尘多元回归方程,根据飘尘浓度(下文中如无特殊说明,均指总浓度,即 $0.3\text{ }\mu\text{m}\leq x$)在竖直梯度上的多重比较结果(图 1),将整个梯度上的飘尘浓度归为 3 个梯度,即低空(2,3,6 m)、中层高度(12,15 m)、高空(21,27 m),对应的飘尘浓度为低空>高空>中层高度。在这 3 个梯度的典型高度上(3,12,21 m)将飘尘浓度分别与气象数据(AT,RH,SVP,WS,WD,PAR,NR)拟合,建立多元回归方程。回归采用多元逐次回归,进行共线性诊断,输出共线性

统计量容差、方差膨胀因子和共线性诊断表,逐步剔除存在多重共线性的自变量并重新建模,最终结果见表 3。在低空,飘尘浓度与空气温度、饱和水汽压呈极显著($p<0.01$)负相关,与风速呈极显著($p<0.01$)正相关。在中层高度,飘尘浓度与空气温度、相对湿度、光 and 有效辐射呈极显著($p<0.01$)负相关。在高空,飘尘浓度与空气温度、相对湿度、风向极显著($p<0.01$)正相关,与饱和水汽压、光 and 有效辐射呈极显著($p<0.01$)负相关。可见,气象要素中对飘尘浓度调控起主要作用的是相对湿度、饱和水汽压、风速、空气温度。

表 3 气象飘尘回归方程统计

高度	回归方程	统计量、概率	拟合优度
低空	$Y_3=-2.9\times10^5x_1-6.8\times10^6x_3+4.5\times10^5x_4+2.3\times10^7$	$F=34.174,p<0.01$	$R^2=0.567$
中层	$Y_{12}=-1.8\times10^4x_1-2.0\times10^4x_2-4.5\times10^2x_6+1.4\times10^6$	$F=12.561,p<0.01$	$R^2=0.347$
高空	$Y_{21}=8.0\times10^5x_1+2.3\times10^5x_2-7.2\times10^6x_3+1.3\times10^3x_5-6.3\times10^3x_6-1.7\times10^7$	$F=41.856,p<0.01$	$R^2=0.724$

注:Y 代表飘尘浓度; x_1 代表 AT; x_2 代表 RH; x_3 代表 SVP; x_4 代表 WS; x_5 代表 WD; x_6 代表 PAR; x_7 代表 NR。

根据回归结果,结合气象数据反演这 3 种典型高度上的飘尘浓度,构成了 3 个验证组,将模拟数据与实测数据进行相关分析,验证模拟数据与实测数据的拟合效果。结果表明,3 个验证组模拟数值与实测数值均表现出显著的正相关关系($p<0.05$)(表 4),相关系数变化范围为 0.45~0.57;按照相关系数等级的划分,3 m 和 12 m 高度的相关系数均小于 0.5,属低度相关,而 21 m 高度上的相关系数为 0.57,达到中度相关。

表 4 模拟与实测飘尘数据的相关性分析

高度/m	Pearson 相关系数	p 值
3	0.45	0.04
12	0.39	0.02
21	0.57	0.00

结合典型高度上的实测数据与模拟数据绘制飘

尘浓度白天的变化趋势图(图 2),发现回归方程反演数据能够很好地代表飘尘浓度的日走势,证明回归方程能在一定程度上预测浓度日变化。由于仪器工作温度的限制,正午 13:00—18:00 时段的实测数据缺失,而回归方程能够根据气象资料模拟出这一时段的飘尘浓度及其变化特征,这段时间的飘尘浓度变化平稳,在均值上下波动。

2.4 主要气象因素对飘尘浓度的影响

根据以往的研究^[16]及本研究回归方程中气象因素的权重,选取风速和相对湿度两种主要气象因素在 3 层典型高度上与飘尘浓度拟合。

风是颗粒物运移的直接动力。研究表明,艾比湖流域属于高风能环境,年均合成输沙势(resultant drift potential,RDP)约为 88.3 矢量单位(vector unit,VU)^[17]。为探究空气中飘尘浓度对风速的响

应,对二者进行分析。结果发现,风速与飘尘浓度表现出极显著($p<0.01$)的二次多项式关系,风速变化对飘尘浓度有明显的双重作用,风速低于临界值(本文中二次方程的对称轴视为临界值)会抑制污染物质的扩散,飘尘浓度随风速的升高而升高,而风速高于临界值时,则有利于空气中污染物质的稀释扩散,

飘尘浓度随风速的升高而降低。但不同高度上正负效应的临界值有所不同(图 3),3 层高度上分别为 6.21, 6.13,3.31 m/s。而相对湿度与飘尘浓度拟合结果表现出极显著($p<0.01$)线性相关。相对湿度对空气中的飘尘有着很好的“清除”作用,无论竖直高度如何,随着空气相对湿度的增加,飘尘浓度下降明显。

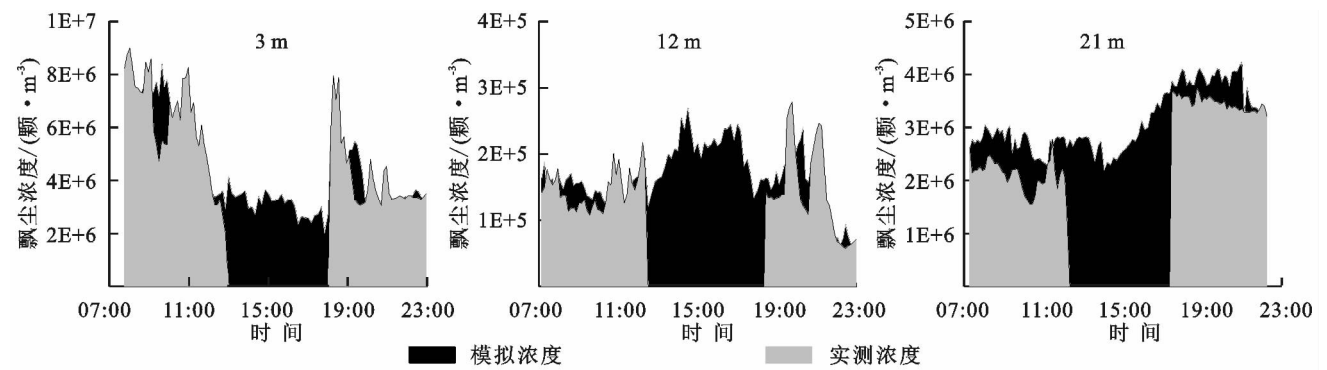
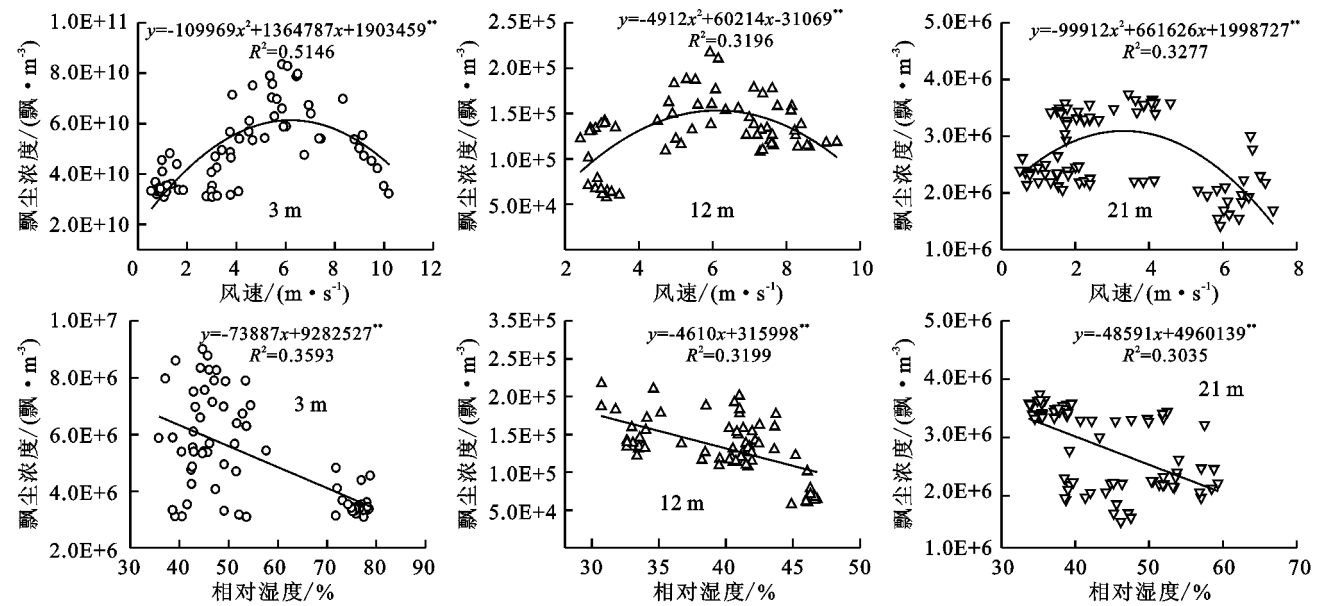


图 2 实测与模拟飘尘浓度趋势



注: * 代表拟合方程达到极显著程度($p<0.01$)。

图 3 飘尘浓度对风速与相对湿度变化的响应

3 讨论

3.1 飘尘浓度垂直分布特征

本研究发现,在所选典型荒漠绿洲过渡带上,飘尘浓度沿竖直梯度的变化并未表现出简单的线性相关,而是呈现 3 m 处飘尘浓度最大,6,2,21,27 m 次之,12, 15 m 浓度最小的垂直分异规律。简言之即低空浓度高,高空浓度较低,中间高度浓度最低的“哑铃效应”。这可能与群落特征和下垫面因素有关,观测点周围为胡杨群落,地面尘埃扬起时一部分被冠层截留,因此 2, 3,6 m 高度上(冠层下部)飘尘浓度较高,这与赵明等^[18]在民勤绿洲沙漠过渡带研究的结果一致。说明虽然广袤的荒漠土增加了人工绿洲遭受风沙袭击的可

能性,但是荒漠绿洲过渡带作为人工—自然生态系统之间的一道天然屏障,不但减小了风沙的水平通量,还能截留风沙土的垂直爬升,在一定程度上降低了研究区大气颗粒物的浓度,同时兼具保土固沙的作用。而艾比湖荒漠绿洲过渡带下垫面类型丰富,不同景观类型之间物流、能流频繁,高空大气湍流交换和扩散能力强,利于周围颗粒物的扩散^[19],因此高空(21,27 m)的飘尘浓度也较高。同时,本研究观测的气象数据表明,21,27 m 处于逆温层中,在逆温层中,上部空气暖轻而下部空气湿重,形成稳定的大气层,不利于污染物的垂直交换,导致高空飘尘总浓度较高^[20]。此外,温度的升高还能引起大气光化学反应,而光化学反应的产物二次颗粒物又是空气颗粒物的重要来源^[21]。

3.2 各粒径段飘尘贡献度分析

不同高度上各粒径段飘尘的贡献度基本相同, $0.5\ \mu\text{m} \leq x < 1.0\ \mu\text{m}$ 和 $0.3\ \mu\text{m} \leq x < 0.5\ \mu\text{m}$ 粒径段所占比例最高,直径小于 $3.0\ \mu\text{m}$ 贡献度合计达 97.6%,说明研究区大气环境中细颗粒物的每立方米含量远大于粗颗粒物,整体污染水平较高。究其原因有二,一是因为,艾比湖流域常年主导风向为西北风,通量塔位于风沙输送的下风区,湖积平原上特殊的土壤粒度特征和稀疏的植被盖度是风沙运动的内因,来自阿拉山口的大风为沙尘的起运提供了充足的外力。当流域独特的下垫面遭遇强风侵袭时,沙尘被气流卷起扬到空中,往下风区搬运;随着风沙的不断深入,下垫面类型不再单一,靠近绿洲边缘时,下垫面植被盖度逐渐增加,对跃起高度有限的粗颗粒风沙形成阻截。除此之外,粗颗粒风沙本身搬运距离有限,风力稍有减弱便会依次沉降,而细颗粒物由于其独特的空气动力学特性得以在空气中长时间悬浮并远距离运输,成为研究区空气污染的主要组分。二是因为,研究区属于典型绿洲荒漠交错带,阿其克苏河以南为人工绿洲景观,持续的人类生产(农业耕作和游牧)会带起大量的空气尘埃^[11]。

3.3 主要气象因素对飘尘浓度的影响与气象—飘尘回归方程

飘尘浓度与气象数据回归分析表明,气象要素对空气飘尘在垂直梯度上的扩散、稀释和累积有明显作用。但这种作用是极为复杂的,不同的气象要素对飘尘浓度制约的方式也不同,不能简单线性相加。本研究对两种主要气象因素分别与飘尘浓度的定性分析表明,二者的调控机制不同。相对湿度影响飘尘吸湿特性,促进微粒之间的吸附再结合,使细颗粒物不断形成粗颗粒物,而粗颗粒物再吸湿沉降,如此往复,促进飘尘的局部交换。从而对飘尘的浓度起到调控作用^[22]。风场是边界层内影响污染物稀释和扩散的主要因子,风速影响污染物扩散稀释的速度。结果表明,研究区的平均风速对飘尘浓度的影响有着明显的双重性,临界值两侧的风速变化趋势对飘尘浓度的作用不同。风速高于临界值时,有利于空气中污染物质的稀释扩散,飘尘浓度随风速的升高而降低;而风速低于临界值则会抑制污染物质的扩散,飘尘浓度随风速的升高而升高,使空气中颗粒物含量成倍增加^[16]。但不同高度上,决定正反效应的临界值并不相同,高度越高临界值越小。这是因为随着高度增加通量塔周围更加空旷,没有了植物冠层及地形因素对风力的阻挡,飘尘浓度对风速变化的响应更敏感。这也进一步验证了下垫面特征(植被覆盖)对荒漠绿洲过渡带

上飘尘浓度有着重要的调控作用,而植被覆盖的增加又能在小区域范围内影响气象因子,如植物通过蒸腾作用影响近地层温度和空气湿度,覆盖度影响风速等;下垫面特征和气象因子共同作用对飘尘浓度调控起到积极作用。因此,加大退耕还林力度,有效提升艾比湖保护区公益林覆盖度,改善局部小气候,对减少人工绿洲风沙侵袭率并降低过渡带上飘尘浓度具有重要意义。

回归方程反演飘尘数据与实测数据之间的 Pearson 相关系数表明,二者之间呈现出显著的正相关关系($p < 0.05$),且反演数据对飘尘日变化趋势的预测较理想,证明了利用气象数据推算荒漠绿洲过渡带飘尘浓度的可能。近年来,大气飘尘逐渐成为环境污染研究的热点,但由于成本和技术限制导致自然界中的飘尘研究资料缺乏,不能给人口密集区的相关研究提供本底对照。而本文涉及的气象资料均为气象台站的常规监测指标,以数值模拟的方法推算飘尘浓度,可为相关研究工作带来极大便利。但本研究立足于干旱区荒漠绿洲过渡带,对于飘尘分布特征和气象飘尘回归方程研究发现的规律是否能够在其他地区适用,还需要进一步的验证和完善。

4 结论

(1) 研究区典型荒漠—绿洲过渡带空气飘尘总浓度($0.3\ \mu\text{m} \leq x$)垂直分布特征为:低空(2,3,6 m) > 高空(21,27 m) > 中层高度(12,15 m),两头高中间低的分布特征表现出明显的“哑铃效应”。不同粒径段颗粒物的贡献率随着高度的增加保持稳定, $0.3\ \mu\text{m} \leq x < 3.0\ \mu\text{m}$ 粒径段的细颗粒物累计占比 97.6%,是主要污染组分。

(2) 3种典型高度上(3,12,21 m)实测飘尘数据与气象—飘尘多元回归方程反演的模拟数据之间表现为显著正相关($p < 0.05$),且方程模拟数值与实测数值的日变化趋势基本一致,证明了利用气象数据推算荒漠绿洲过渡带飘尘浓度的可能。

(3) 风速对飘尘浓度有着明显的正反效应,风速低于临界值会抑制飘尘的扩散,反之则有利于飘尘的稀释,在3种典型高度(3,12,21 m)上的临界值分别为 6.21,6.13,3.31 m/s;相对湿度的增加能够极显著($p < 0.01$)地降低飘尘浓度。

参考文献:

- [1] 徐莉,李艳红.乌鲁木齐市大气降尘环境磁学特征[J].干旱区地理,2014,37(2):274-280.
- [2] 谭荣.制度环境与自然资源的可持续利用[J].自然资源学报,2010,25(7):1218-1228.

- [3] Makkonen, Hellén H, Anttila P, et al. Size distribution and chemical composition of airborne particles in south-eastern Finland during different seasons and wild-fire episodes in 2006[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(3): 644-651.
- [4] 韩冰雪, 张国华, 毕新慧, 等. 广州城区夏季大气颗粒物数浓度谱分布特征[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 198-204.
- [5] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 等. 再议绿洲—沙漠过渡带: 以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 195-202.
- [6] 常铁深, 钱亦兵, 王忠臣, 等. 艾比湖地区南北典型断面的土壤力度特征[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(6): 968-977.
- [7] 马晓飞, 楚新正, 马倩. 艾比湖地区冻融作用对梭梭群落土壤酶活性及微生物数量的影响[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1190-1201.
- [8] 吉力力·阿不都万里, 穆桂金. 艾比湖干涸湖底尘暴及其灾害分析[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(2): 149-154.
- [9] 田涛. 艾比湖“撒盐”经济带“抽搐”[N]. *中国环境报*, 2001-05-15(2).
- [10] 霍文, 何清, 杨兴华, 等. 中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 6-11.
- [11] 毛东雷, 雷加强, 曾凡江, 等. 策勒绿洲—沙漠过渡带风沙活动强度的空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 13-19.
- [12] 霍文, 何清, 杨兴华, 等. 塔里木盆地多种沙源类型沙通量异变特征研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 102-125.
- [13] 何学敏, 吕光辉, 秦璐, 等. 艾比湖荒漠—湿地生态系统非生长季碳通量数据特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6655-6665.
- [14] 毛吉旦木·地力夏提. 艾比湖湿地典型区表层土壤粒度空间分布特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
- [15] Li Han, Guo Bin, Han Mengfei, et al. Particulate matters pollution characteristic and the correlation between PM($PM_{2.5}$, PM_{10}) and meteorological factors during the summer in Shijiazhuang [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2015, 6(11): 457-463.
- [16] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2154-2163.
- [17] 李红军, 杨青, 何清. 艾比湖地区的输沙势分析[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(4): 322-325.
- [18] 赵明, 詹科杰, 杨自辉, 等. 民勤沙漠—绿洲低空沙尘暴结构特征研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(2): 234-242.
- [19] 刘昌伟, 赵勇, 苗蕾, 等. 城市高层建筑大气颗粒物污染和噪声垂直分布特征[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1793-1797.
- [20] Karar K, Gupta A K, Kumar A, et al. Characterization and identification of the sources of chromium, zinc, lead, cadmium, nickel, manganese and iron in PM_{10} particulates at the two sites of Kolkata, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120(1/3): 347-360.
- [21] Whiteaker J, Suess D, Prather K. Effects of meteorological conditions on aerosol composition and mixing State in Bakersfield, CA [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(11): 2345-2353.
- [22] 李沐珂, 沈振兴, 李旭祥, 等. 西安市可吸入颗粒物污染水平及其与气象条件的关系[J]. *过程工程学报*, 2006, 6(S2): 15-19.

(上接第95页)

- [12] 张少良, 刘威, 张兴义, 等. 黑土区典型小流域土壤侵蚀空间格局模拟研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 224-227.
- [13] 辛刚, 关连珠. 不同开垦年限黑土磷素的形态与数量变化[J]. *土壤通报*, 2002, 33(6): 425-428.
- [14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [15] Greenwood D J, Cleaver T J, Turner M K, et al. Comparison of the effects of phosphate fertilizer on the yield, phosphate content and quality of 22 different vegetable and agricultural crops[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1980, 95(2): 457-469.
- [16] 苏德纯. 从土壤中磷的空间分布特征探讨提高磷肥及土壤磷有效性的新途径[J]. *磷肥与复肥*, 1995, 10(3): 74-76.
- [17] 何万云, 张之一, 林伯群. 黑龙江土壤[J]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [18] Morgan R. *Soil Erosion and Conservation*[M]. Manhattan, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [19] Pratt P F. Potassium removal from Iowa soils by greenhouse and laboratory procedures[J]. *Soil Science*, 1951, 72(2): 107-118.
- [20] 何长高, 尹忠东. 紫色土区土壤侵蚀对土地生产潜力的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 110-114.
- [21] 葛方龙, 张建辉, 苏正安, 等. 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 459-464.
- [22] 陈永宝, 黄传伟, 陈志伟, 等. USLE 在我国的应用和发展[J]. *中国水土保持*, 2003(10): 11-13.