

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.027.

魏亚娟, 解云虎, 党晓宏, 等. 吉兰泰盐湖防护体系不同防护功能区大气降尘特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 201-208.

WEI Yajuan, Xie Yunhu, DANG Xiaohong, et al. Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Dustfall in Different Protective Function Areas of Jilantai Salt Lake System[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 201-208.

# 吉兰泰盐湖防护体系不同防护功能区 大气降尘特征及其影响因素

魏亚娟<sup>1,2</sup>, 解云虎<sup>1</sup>, 党晓宏<sup>2,3</sup>, 郭靖<sup>4</sup>, 刘美萍<sup>1</sup>, 吴昊<sup>5</sup>

(1.包头师范学院资源与环境学院, 内蒙古 包头 014030;

2.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 3.包头市林业和草原局, 内蒙古 包头 010010;

4.内蒙古包钢稀土新材料厂, 内蒙古 包头 014010; 5.内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010051)

**摘要:** [目的]探讨吉兰泰盐湖防护体系对大气降尘的控制效应,为吉兰泰盐湖防护体系大气降尘物质的来源及其运移方式提供理论依据。[方法]利用降尘缸法采集了不同防护功能区(流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带)1年内2 m降尘样品,并利用称重法和激光粒度仪对其大气降尘量、机械组成及其影响因素进行分析。[结果](1)吉兰泰盐湖防护体系大气降尘主要由极细砂和细砂物质组成。流动沙垄、流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带极细粒和细砂物质的总含量分别为88.44%, 96.68%, 75.53%, 77.00%和68.14%。(2)流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的降尘量较流动沙垄分别减小22.40%, 53.10%, 48.05%和24.85%,不同防护功能区滞尘效应大小依次为:防风阻沙带>盐湖防护林带>封沙育草带>流沙固阻带>流动沙垄。(3)3—5月为大气沉降高峰期;12月至次年2月为大气沉降较弱期;而6—11月为大气沉降最弱期。降尘量主要集中于春冬两季,占年降尘量的77.52%~87.04%。(4)平均风速、扬沙日数、大风日数、沙尘暴日数和降雨量是影响降尘量的主要气象因子,平均风速、扬沙日数、大风日数、沙尘暴日数为盐湖防护体系降尘提供了动力条件,降雨量抑制了降尘量增加。[结论]盐湖防护体系各防护功能区降尘物质绝大部分来源于局地物质和区域物质,气象因子和植被特征的综合效应共同决定大气降尘量。

**关键词:** 降尘; 气象因子; 盐湖防护体系; 小气候; 固沙植物; 吉兰泰

**中图分类号:** P425.5<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)05-0201-08

## Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Dustfall in Different Protective Function Areas of Jilantai Salt Lake System

WEI Yajuan<sup>1,2</sup>, Xie Yunhu<sup>1</sup>, DANG Xiaohong<sup>2,3</sup>, GUO Jing<sup>4</sup>, Liu Meiping<sup>1</sup>, Wu Hao<sup>5</sup>

(1. Department of Resource and Environment, Baotou Normal College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China; 2. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Baotou Forestry and Grassland Bureau, Baotou, Inner Mongolia 010010, China; 4. Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Steel Plate Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 5. Meteorological Science Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to explore the atmospheric dustfall control effect of the Jilantai salt lake protection system in order to provide a theoretical basis for source and transport mode of atmospheric dust substances in the Jilantai salt lake protection system. [Methods] In this study, 2 m atmospheric dust-

收稿日期: 2022-08-04

修回日期: 2022-08-30

**资助项目:** 包头师范学院高层次人才引进科研启动资助项目(BTTCRCQD2020-011); 包头师范学院自然科学类一般项目(BSYKJ2021-ZY02); 包头师范学院自然科学类重点项目(BSYKJ2022-ZZ01); 内蒙古自治区重点研发和科技成果转化计划项目(2022YFDZ0027); 国家自然科学基金项目(4196700); 包头师范学院高层次人才科研启动基金(01108022/008); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41901009); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS04004)

**第一作者:** 魏亚娟(1994—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: weiyajuan0305@163.com

**通信作者:** 党晓宏(1987—), 男, 陕西合阳人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治及荒漠地区碳汇研究。E-mail: dangxiaohong1986@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

fall samples were collected from different protection zones (fixing shifting-sand zone, fencing dune for grass recovery zone, preventing wind and stopping sand zone and salt lake protection forest zone) for 1 year using the dustfall cylinder method, and atmospheric dustfall, mechanical composition and its influencing factors were analyzed by using weighing method and laser particle size meter. [Results] (1) The atmospheric dustfall of Jilantai salt lake protection system was mainly composed of very fine sand and fine sand. Total contents of very fine sand and fine sand in fixing shifting-sand zone, fencing dune for grass recovery zone, preventing wind and stopping sand zone and salt lake protection forest zone were 88.44%, 96.68%, 75.53%, 77.00% and 68.14%, respectively. (2) Compared with shifting sandy land, atmospheric dustfall in the fixing shifting-sand zone, fencing dune for grass recovery zone, preventing wind and stopping sand zone and salt lake protection forest zone reduced by 22.40%, 53.10%, 48.05% and 24.85%, respectively. The magnitude of dust retention effect in order was: preventing wind and stopping sand zone > salt lake protection forest zone > fencing dune for grass recovery zone > fixing shifting-sand zone > shifting sandy land. (3) The peak period of atmospheric deposition was from March to May; the weaker period of atmospheric deposition was from December to next February; and the weakest period of atmospheric deposition was from June to November. The atmospheric dustfall mainly concentrated in spring and winter, accounting for 77.52% ~ 87.04% of the annual dustfall. (4) Average wind speed, blowing dust days, strong wind days, sandstorm days and rainfall were main meteorological factors affecting the amount of dust-falling amount. Average wind speed, blowing dust days, strong wind days and sandstorm days provided driving conditions for dustfall in salt lake protection system, and the amount of rainfall suppressed the amount of dustfall. [Conclusion] Most of atmospheric dust substances in different protective function areas of Jilantai salt lake system came from local and regional substances, and atmospheric dustfall was jointly determined by comprehensive effects of meteorological factors and vegetation characteristics.

**Keywords:** atmospheric dustfall; meteorological factors; salt lake protection system; microclimate effect; sand-fixing plants; Jilantai

大气降尘是指在空气环境条件下,粒度直径大于 10  $\mu\text{m}$  的颗粒物质依靠自身重力自然降落到地面。当颗粒物质小于 10  $\mu\text{m}$  时,可通过雨水冲刷降落到地面<sup>[1]</sup>。大气降尘过程是地球表层地—气系统物质交换的一种形式,对环境具有较好的表征作用<sup>[2]</sup>。通过对大气降尘强度、性质、组成和沉降速率进行正确监测,可以判断其策源地、运移路径和方式<sup>[3]</sup>。因此,探究大气降尘对大气环境区域近地层沙尘物质具有重要意义。近年来,对大气降尘的研究较多。就研究内容而言,对大气降尘主要集中于对大气重金属污染<sup>[4-5]</sup>、生态风险<sup>[6-7]</sup>和健康风险<sup>[8]</sup>的研究;就研究区域而言,对大气降尘的研究多集中在人口密集的城市和重污染的矿区,目的是探究大气降尘的分布特征、化学组成及其影响因素。但是,众所周知大气中的沙尘物质主要来源于沙漠地区或者干旱地区的风蚀物质。因此,探究沙源附近的降尘物质具有重要的意义。

吉兰泰盐湖面积为 102.4  $\text{km}^2$ ,每年开采量约 100 万 t,是我国最大的内陆盐湖之一和湖盐生产基地。但是,由于盐湖深居荒漠区,地表组成物质疏松,

极易在风力作用下就地起沙。自 20 世纪 50 年代末,乌达—吉兰泰铁路通车后,盐湖资源开采规模日益扩大,人口剧增,导致 7 万  $\text{hm}^2$  的天然梭梭遭到破坏,风沙危害直接威胁盐湖,10  $\text{km}^2$  多的盐湖有不同程度积沙,其中 1.67  $\text{km}^2$  已积沙 1 m 左右,对采盐生产和食盐纯度带来极大困难。为了防止风沙进一步入侵盐湖,保证盐业生产的稳产高产已为当务之急。为此,自 1983 年开始,盐湖北部建立起了东西长约 18 km,南北宽约 1 km 的防沙林带<sup>[9]</sup>。自北向南构成了流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的“四带一体”综合立体防护体系。吉兰泰盐湖防护体系的建立对保护吉兰泰盐湖和铁路免受乌兰布和沙漠风沙活动侵袭起着至关重要的作用。吉兰泰盐湖防护体系的建立降低了风速,阻断了风沙的输移,同时改变了地表形态、对沙尘具有一定削减作用,是固定流沙、控制盐湖沙害的重要植被措施<sup>[10]</sup>。而且,盐湖防护体系的营建改变了风沙活动方式,随着防护体系营建时间延长,逐渐由风蚀、沉积向风沙沉降方向转变。

然而,盐湖防护体系不同部位由于植被盖度及植被组成差异,使其不同部位滞尘量、粒度组成在时空分布上存在一定差异<sup>[11-12]</sup>。这主要是因为防护体系通过工程措施和植被措施增加了地表粗糙度,导致近地面气流阻力增加,此时不仅增大了地表起动风速,而且削弱了气流的携沙能力和侵蚀能力<sup>[13]</sup>。鉴于此,本研究通过对不同防护功能区为期 1 a 的连续实地观测,分析盐湖防护体系不同功能区大气降尘变化规律、空间分布和机械组成,从而揭示吉兰泰盐湖防护体系大气降尘物质的来源及其运移方式。该研究对评价吉兰泰盐湖防沙治沙技术措施取得的净化空气环境成效具有重要指导意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

本研究以吉兰泰盐湖防护体系为研究区,其位于内蒙古阿拉善左旗吉兰泰盐湖北部(105°47′08″—105°37′38″E,39°46′58″—39°48′95″N),海拔在 960~1 030 m。该区域属于典型的大陆性干旱荒漠气候,降雨量为 138.6 mm,降雨主要集中在 7—9 月,占全年降雨量的 91.77%。年均潜在蒸发量为 3 006 mm,极端最高气温为 40.4℃,年均气温为 8.6℃,极端最低气温为-31.2℃。年日照时数为 3 316 h,无霜期为

160 d。多年平均风速为 3.6 m/s,最大风速为 24.0 m/s。风力多集中在 4~5 级左右。年平均大风日数 34 d,扬沙日数为 82 d。主风向为西北风。该区域地势平坦,无人活动干扰。土壤类型为盐碱土、风沙土,地表土壤疏松,土壤发育程度较低,土壤养分贫瘠。植被包括:沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、芦苇(*Phragmites australis*)和披针叶野决明(*Thermopsis lupinoides*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 盐湖防护体系位于吉兰泰盐湖北部,近 36 年来对盐湖周边相继开展生物措施(防护林建设)、工程防护措施(PLA 沙障和麦草沙障)的营建和补充完善等工作已基本完成。在盐湖周边原有的流动沙垄、丘间低地等下垫面条件下,保留天然植被,并通过人工拉平沙垄、铺设机械沙障、封育、人工造林等活动,自盐湖由外向内建成了流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的“四带一体”综合防护体系,盐湖防护体系各防护功能区基本情况如表 1 和图 1 所示。

表 1 不同防护功能区基本情况

样地	地理位置	地貌特征	植被状况/特征		土壤类型
			种类	盖度/%	
流沙固阻带	105°43′12″—105°43′48″E, 39°46′00″—39°48′36″N	草方格沙障、PLA 沙障,规格多为 1 m×1 m。	沙米、白刺	<10	风沙土
封沙育草带	105°43′36″—105°43′48″E, 39°48′36″—39°48′48″N	半固定沙丘,分布有白刺灌丛沙堆, 沙面质软,沙堆高度 0.5~2 m。	白刺为主,其他植被有芦苇、苦豆子和 披针叶野决明。	20	风沙土
防风阻沙带	105°43′48″—105°43′58″E, 39°48′48″—39°48′54″N	地面起伏较小,沙面有结皮	沙枣、梭梭、沙拐枣、花棒、新疆杨	58	风沙土
盐湖防护林带	105°43′58″—105°43′59″E, 39°48′54″—39°48′57″N	地面起伏较小,沙面有结皮	沙枣、花棒、梭梭、怪柳,地物有芦苇等	45	风沙土、盐碱土



图 1 不同防护功能区现场图

1.2.2 降尘物质采集 风沙观测期间,降尘量采用集尘缸法进行测定。在不同防护功能区选取与主风向(NW)大致平行的风沙沉降观测断面,每个观测断面分别在北方、西南方和东南方各布设 1 组降尘装置。每组

降尘装置分别由降尘固定支架和降尘缸组成,降尘缸设置高度为 2 m,降尘缸内壁光滑,高度为 30 cm,内壁直径为 15 cm。降尘采用监测时间为 2017 年 3 月 1 日至 2018 年 2 月 28 日,各功能区的降尘量按月时间尺度进

行收集。同时,在不同防护功能区运用“S”取样法取表层 0—2 cm 和地下 30 cm 土壤,每个功能区取 10 个重复,均匀混合后最为一份土壤样品。

根据吉兰泰地区气候特征,春、夏、秋和冬四季的划分依次为 3—5 月、6—8 月、9—11 月和 12—次年 2 月。降尘采用网格干沉降法进行收集<sup>[14]</sup>,每月收集 1 次。每次观测结束后,用毛刷将缸内沙物质清扫,并装入 4 号塑封袋。同时,用记号笔进行标记,带回实验室去除样品中的植物叶片、昆虫等杂质后,在温度为 105℃ 的干燥箱中进行烘干处理后,再用电子天平(0.001 g 精度)进行称重并计算降尘量。

$$M = \frac{m}{s} \times 10^4 \quad (1)$$

式中: $M$  为降尘量( $\text{g}/\text{m}^2$ ); $m$  为降尘缸收集沙尘的净重( $\text{g}$ ); $s$  为降尘缸口面积( $\text{cm}^2$ ), $s = \pi r^2$ ;  $r$  为降尘缸口半径( $\text{cm}$ )。

大气降尘按照分级标准根据美国制土壤分类标准<sup>[15]</sup>,粒径分级标准共分为 7 级,分别为砾石( $> 2\,000\ \mu\text{m}$ )、极粗砂( $1\,000 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$ )、粗砂( $500 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ )、中砂( $250 \sim 500\ \mu\text{m}$ )、细砂( $100 \sim 250\ \mu\text{m}$ )、极细砂粒( $50 \sim 100\ \mu\text{m}$ )、粉粒( $2 \sim 50\ \mu\text{m}$ )和黏粒( $< 2\ \mu\text{m}$ )。

### 1.3 数据处理

用 Excel 2013 对试验数据进行前期整理。然后,运用 SPSS 20.0 对降尘量与气象因子进行相关分析;运用 Origin 2021 对降尘量与气象因子进行回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同防护功能区降尘粒度特征

由表 2 可知,盐湖防护体系不同防护功能区地表沉积物粒度组成存在较大差异。在流动沙垄、流沙固阻带和封沙育草带,主要以细砂和中砂为主,分别占沙粒总量的 70.35%,76.83%和 84.41%。在流沙固阻带和封沙育草带的细砂较流动沙垄分别增加 34.64%和 66.29%,中砂分别减少 18.60%和 30.65%。在防风阻沙带和盐湖防护林带,其粒度组成主要以极细砂和细砂为主,分别占到沙粒总量的 78.00%和 77.68%,较流动沙垄增加。在防风阻沙带和盐湖防护林带的极细砂和细砂较流动沙垄分别增加 63.61%和 64.28%。在防风阻沙带和盐湖防护林带,无粗砂和极粗砂的存在。总体而言,与流动沙垄相比,盐湖防护体系各功能区由外向内粒度组成趋于细化。

不同防护功能区降尘粒度存在一定差异。各防护功能区降尘粒度主要由极细砂和细砂物质组成。流动

沙垄、流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带极细粒和细砂物质总含量分别为 88.44%,96.68%,75.53%,77.00%和 68.14%,而粉粒物质含量分别为 3.33%,3.34%,17.99%,22.97%和 31.88%,说明降尘物质随盐湖防护距离越近逐渐趋于细化。

与地下 30 cm 土壤机械组成相比,流动沙垄、流沙固阻带和封沙育草带土壤黏粒、粉粒、极细砂和细砂含量均有不同程度降低近地表,而中砂、粗砂和极粗砂均有不同程度增加。而在防风阻沙带和盐湖防护林带变化与之相反。说明在流动沙垄、流沙固阻带和封沙育草带为大气中提供了沙尘物质;在防风阻沙带和盐湖防护林带能够有效抑制地表风蚀,具有滞尘作用。

### 2.2 降尘量空间分布特征

由图 2 可知,不同月份防护功能区月降尘量总体表现为:流动沙垄>流沙固阻带>盐湖防护林带>封沙育草带>防风阻沙带。而且,月降尘量从 1 月开始上升到 4 月达到最大值,然后逐渐下降到 7 月份最小值后又逐渐缓慢上升。由此可知,3—5 月为大气沉降高峰期;12 月至次年 2 月为大气沉降较弱期;而 6—11 月为大气沉降最弱期。流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的年降尘量分别 295.39  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{mon})$ ,125.27  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,123.53  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 180.53  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的年降尘量较流动沙垄分别减小 26.90%,69.00%,69.43%和 55.33%,说明了吉兰泰盐湖防护体系对沙尘具有一定的滞尘作用。降尘量主要集中于春冬两季,占到年降尘量的 77.52%~87.04%。可见,盐湖防护体系不同防护功能区降尘量存在较大差异。

### 2.3 主要气象因子对降尘量的影响机制

2.3.1 研究区不同月份气象因子及其与大气降尘之间的相关关系 由表 3 可知,平均风速、扬沙日数、大风日数和沙尘暴日数最大值均出现在 4 月。而降雨量最大值出现在 7 月,为 45.4 mm,初步断定降雨对大气降尘有一定抑制作用。通过对气象因子分析发现,2017 年 3 月至 2018 年 2 月,吉兰泰荒漠绿洲过渡带扬沙日数、大风日数和沙尘暴日数分别为 33 d,59 d 和 19 d。而扬沙、大风和沙尘暴主要发生于春冬两季,分别占到全年总发生量的 93.94%,91.53%和 73.68%;降雨主要集中在 5 月、6 月、7 月,占全年降水量的 62.19%。而且,这段时间降雨有利于植物生长,对防止风蚀有一定抑制作用。

表 2 不同防护功能区大气降尘和近地表粒度特征

位置	类型	机械组成/%				
		流动沙垄	流沙固阻带	封沙育草带	防风阻沙带	盐湖防护林带
地下 30 cm	黏粒	2.47	1.89	2.00	2.19	0.99
	粉粒	13.12	14.00	6.07	6.25	1.96
	极细砂	20.49	15.09	11.86	17.28	4.64
	细砂	59.13	71.25	61.35	67.06	46.07
	中砂	4.79	7.77	18.67	7.22	33.75
	粗砂	0.00	0.00	0.05	0.00	11.88
	极粗砂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70
近地表	黏粒	1.17	1.81	1.90	4.20	2.89
	粉粒	7.71	8.69	4.54	12.36	13.65
	极细砂	10.73	9.93	8.92	19.11	19.42
	细砂	36.75	49.48	61.11	58.89	58.26
	中砂	33.60	27.35	23.03	5.43	5.78
	粗砂	9.02	2.51	0.22	0.00	0.00
	极粗砂	1.99	0.20	0.00	0.00	0.00
大气降尘	黏粒	0.00	0.00	6.48	0.00	0.00
	粉粒	3.33	3.34	17.99	22.97	31.88
	极细砂	39.09	38.64	50.65	51.28	32.57
	细砂	49.38	58.02	24.88	25.72	35.57
	中砂	8.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	粗砂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	极粗砂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

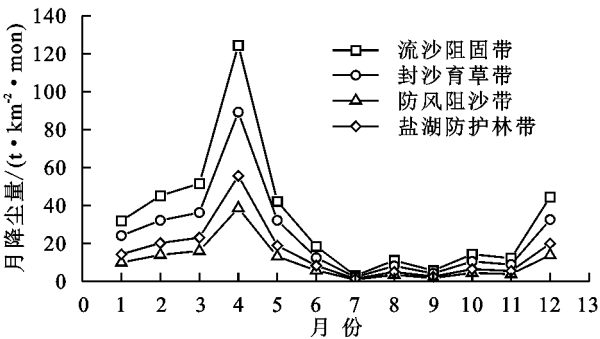


图 2 不同季节各防护功能区的降尘量

研究发现,大气降尘不仅与植被盖度和植被高度等植被生长状况有关,还与扬沙、浮尘等气象因子的持续时间和强度有关。由表 4 可知,不同防护功能区降尘量与平均风速、扬沙日数和大风日数在 0.01 水平上呈显著正相关( $p<0.01$ ),与沙尘暴日数和降雨量在 0.05 水平上分别呈显著正相关和负相关。这充分说明了平均风速、扬沙日数、大风日数、沙尘暴日数

和降雨量是影响降尘量的主要气象因子,平均风速、扬沙日数、大风日数、沙尘暴日数有利于降尘增加,而降雨量抑制大气降尘。

表 3 不同月份气象因子

月份	平均风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	扬沙 日数/d	大风 日数/d	沙尘暴 日数/d	降水量/ mm
1	4.0	0	5	0	4.2
2	3.7	6	7	0	0.2
3	4.2	9	15	6	4.6
4	4.5	11	17	5	1.2
5	3	0	1	0	12.8
6	2.9	0	1	1	20.9
7	2.2	0	0	0	45.4
8	2	0	0	1	9.3
9	2.3	0	1	1	5.4
10	3.3	2	3	2	23.2
11	2.7	0	0	0	0.0
12	3.8	5	9	3	0.0

表 4 不同防护功能区降尘量与气象因子之间的相关关系

气象因子	流动沙垄	流沙固阻带	封沙育草带	防风阻沙带	盐湖防护林带
平均风速	0.725 **	0.701 *	0.696 *	0.707 *	0.723 **
扬沙日数	0.848 **	0.826 **	0.819 **	0.823 **	0.848 **
大风日数	0.862 **	0.847 **	0.842 **	0.846 **	0.864 **
沙尘暴日数	0.648 *	0.634 *	0.624 *	0.640 *	0.646 *
降雨量	-0.447 *	-0.421 *	-0.419 *	-0.443 *	-0.451 *

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

### 2.3.2 研究区气象因子与大气降尘量的回归关系

由表5可知,气象因子与降尘量的拟合关系不同。各防护功能区降尘量与平均风速呈幂函数关系,其幂指数均大于2.9,说明随着风速强度逐渐增大,大气降尘量逐渐增大;降尘量与扬沙日数和大风日数呈多项式函数关系,说明随着扬沙和大风持续时间越长,降尘

量增加幅度逐渐增大。降尘量与沙尘暴日数呈一次线性函数关系,说明沙尘暴持续时间影响着大气降尘量,沙尘暴持续时间越长,大气降尘越大。降尘量与降雨量呈指数函数关系,且 $x$ 的系数为负值,说明随着降雨量的增加,大气降尘量逐渐减小,降雨对大气降尘有一定抑制作用。

表5 降尘量与主要气象因子的回归分析

防护功能区	气象因子	拟合函数	$R^2$	$p$	关系
流动沙垄	平均风速	$y=0.982x^{2.902}$	0.702	$<0.002$	幂函数
	扬沙日数	$y=0.878x^2-0.531x+18.352$	0.805	0	多项式
	大风日数	$y=0.793x^2+1.610x+14.814$	0.769	$<0.001$	多项式
	沙尘暴日数	$y=10.097x+17.688$	0.420	$<0.02$	线性
	降雨量	$y=36.408e^{-0.048x}$	0.3807	$<0.05$	指数
流沙固阻带	平均风速	$y=0.662x^{2.964}$	0.747	$<0.003$	幂函数
	扬沙日数	$y=0.769x^2-2.205x+13.568$	0.797	0	多项式
	大风日数	$y=0.173x^2+0.783x+10.943$	0.753	$<0.002$	多项式
	沙尘暴日数	$y=7.594x+12.592$	0.403	$<0.03$	线性
	降雨量	$y=24.981e^{-0.04x}$	0.3134	$<0.05$	指数
封沙育草带	平均风速	$y=0.302x^{2.907}$	0.729	$<0.003$	幂函数
	扬沙日数	$y=0.331x^2-1.022x+5.891$	0.790	0	多项式
	大风日数	$y=0.074x^2+0.295x+4.787$	0.745	$<0.002$	多项式
	沙尘暴日数	$y=3.129x+5.485$	0.389	$<0.03$	线性
	降雨量	$y=10.369e^{-0.036x}$	0.2755	$<0.05$	指数
防风阻沙带	平均风速	$y=0.301x^{2.901}$	0.721	$<0.002$	幂函数
	扬沙日数	$y=0.320x^2-0.958x+5.818$	0.794	0	多项式
	大风日数	$y=0.074x^2+0.263x+4.788$	0.755	$<0.002$	多项式
	沙尘暴日数	$y=3.133x+5.334$	0.410	$<0.02$	线性
	降雨量	$y=11.376e^{-0.049x}$	0.4194	$<0.05$	指数
盐湖防护林带	平均风速	$y=0.389x^{3.016}$	0.724	$<0.002$	幂函数
	扬沙日数	$y=0.425x^2-0.888x+8.030$	0.814	0	多项式
	大风日数	$y=0.095x^2+0.659x+6.420$	0.776	$<0.001$	多项式
	沙尘暴日数	$y=4.654x+7.676$	0.418	$<0.02$	线性
	降雨量	$y=16.335e^{-0.05x}$	0.4069	$<0.05$	指数

## 3 讨论

大气降尘是指直径大于10  $\mu\text{m}$ 的颗粒物依靠自身重力沉降到地面的固体颗粒物<sup>[8]</sup>。通过对大气降尘的测定,可以了解降尘的组成、沉降速率和强度,进而判断大气降尘的来源。运移方式和路径<sup>[16]</sup>。本研究发现,4种防护功能区降尘粒度主要以细砂和极细砂为主,且随着距离流动沙垄越远,细砂和极细砂含量逐渐减小,粉粒含量逐渐增加,该研究结果与陈新闯等<sup>[16]</sup>对乌兰布和沙漠的研究结果相同。但是与毛东雷对新疆策勒绿洲—沙漠过渡带大气降尘粒度相悖,其研究结果表明大气降尘沙尘物质以粗粉砂和极粗粉砂为主。这可能与测定高度和风速强度有关。

因为气流携带的沙物质距离地面越高越细,反之亦然<sup>[17]</sup>。新疆策勒绿洲—沙漠过渡带地表植被盖度仅为5%,加之降雨量仅为35.10 mm,为风沙活动频繁,为地表风蚀创造了条件。研究表明,降尘物的粒度可以反向推测降尘物的来源<sup>[16]</sup>。当降尘粒度直径小于20  $\mu\text{m}$ 时,降尘物质来源于远源物质,粒度直径在20~70  $\mu\text{m}$ ,降尘物质来源于区域物质,粒度直径大于70  $\mu\text{m}$ 来源于局地物质<sup>[18]</sup>。因此,盐湖防护体系各防护功能区降尘物质可能绝大部分来源于局域物质和区域物质,少量来源于远源物质。但是,不同地区其气候条件、地形条件和植被类型存在一定差异。该结果有待于进一步论证。闫德仁等研究表明,直径>500  $\mu\text{m}$ 的颗粒物主要以蠕移的方式输送,直

径大于 70  $\mu\text{m}$  小于 500  $\mu\text{m}$  的颗粒物主要以跃移方式输送,直径小于 70  $\mu\text{m}$  的颗粒物主要以悬移方式<sup>[19]</sup>。本研究中,各防护功能区降尘粒度直径在 2~250  $\mu\text{m}$ ,说明研究区大气降尘物质主要通过跃移方式和悬移方式进行输送,且距离流动沙垄越远,通过悬移方式输送的颗粒物质越多。这主要因为直径相对较大的颗粒物质进入到风沙流中更容易沉降到地面,而直径相对较小的颗粒物质更容易输送到更远的地方。本研究中,不同防护功能区地表土壤机械组成由外向内逐渐趋于细化,说明盐湖防护体系能有效抑制地表起尘<sup>[20]</sup>。研究地表机械组成与风沙活动密切相关,且大于 0.1 mm 的沙粒是主要的降尘物。因此,不同防护功能区土壤均具有提供沙尘的能力。

本研究中,不同防护功能区大气降尘量在 180.53~404.11  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,该研究结果显著小于党晓宏等<sup>[21]</sup>对乌兰布和沙漠东南缘不同下垫面的研究结果相悖,其研究表明,当降尘测定高度为 2 m 时,不同下垫面的降尘量介于 380.53~914.43  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。我认为风动力和物质来源是造成这种差异的主要原因。盐湖防护体系的建立改变了局部流场分布。而且,盐

湖防护体系内的机械沙障、灌丛沙堆和人工植被通过增大地表粗糙度,分解了近地表风力强度,减弱了携沙气流的携沙能力和侵蚀能力<sup>[22-23]</sup>。大气降尘量由大到小依次为:流动沙垄>流沙固阻带>盐湖防护林带>封沙育草带>防风阻沙带,该研究结果与高君亮等<sup>[24]</sup>和李晋昌等<sup>[25]</sup>分别对乌兰布和沙漠东北部和我国北方东部地区大气降尘的研究结果一致。这说明吉兰泰盐湖防护体系具有减少降尘的作用,这主要与不同防护功能区地表植被生长状况有关。由于降尘物质主要来源于风沙流的水平运移。流动沙垄植被盖度较低,其风沙流较大,输沙能力较强,导致沙粒吹送到更高、更远的距离<sup>[11]</sup>。通过年降尘量与植被高度和植被盖度进行回归分析发现,年降尘量与植被高度和植被盖度呈一元函数关系,且函数小于 1,表示年降尘量随着植被高度和植被盖度而逐渐降低(图 3)。盐湖防护体系的建立增加了植被盖度和植被高度。同时改变了林内小气候,改变了下垫面的状况,增加了地表粗糙度,对风力有一定分解作用,减缓风力对地表的侵蚀作用,从而到达抑制地表起尘量<sup>[24,26-27]</sup>。

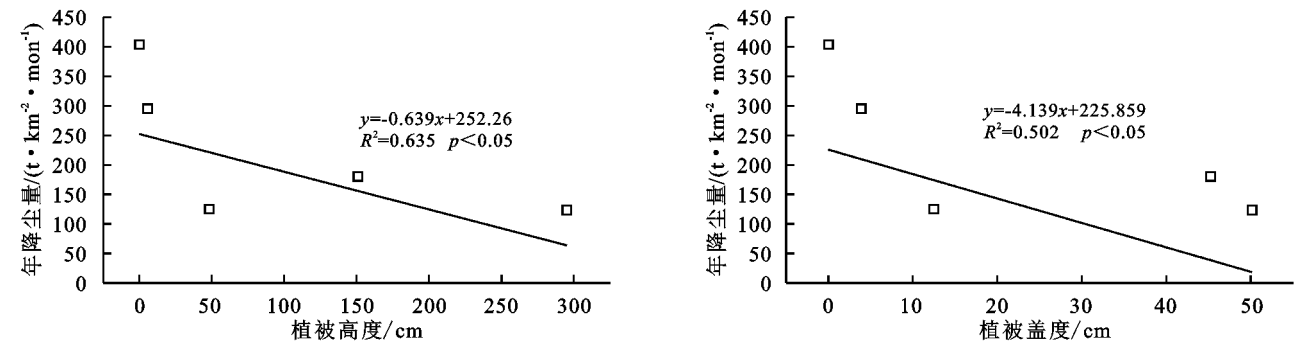


图 3 年降尘量与植被高度和植被盖度之间的关系

环境因子是影响大气降尘的重要因子<sup>[28-29]</sup>。本研究中,降尘主要集中于春冬两季,占全年降尘量的 77.52%~87.04%。这主要与平均风速、扬沙日数、大风日数和沙尘暴日数等气象因子有关。春冬季节由于冷空气和蒙古气旋活动频繁,导致大气层不稳定,造成风沙天气出现频率较高<sup>[30]</sup>。因此,春冬两季发生平均风速大小、扬沙日数、大风日数和沙尘暴日数明显大于夏秋两季。而且,春冬两季地表缺乏地表覆盖,为沙尘释放创造了条件<sup>[8]</sup>。在夏秋两季属于植物生长季,地表植被生长增加了地表粗糙度,能够减弱风力和拦截沙粒运动,从而减小起尘量<sup>[7]</sup>。加之夏秋两季降雨量明显大于春冬两季,在一定程度上抑制了大气降尘。研究中还发现,流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的年降尘量较流动沙垄分别减小 26.90%, 69.00%, 69.43% 和 55.33%。可见,盐湖防护体系有一定的滞尘作用。

当风沙流由流动沙垄吹向盐湖防护体系时,灌木和乔木对风沙流有一定的阻碍作用。在本研究中,扬沙日数和大风日数均与降尘量呈二次函数关系,该研究结果与党晓宏等<sup>[21]</sup>对乌兰布和沙漠不同下垫面的研究结果相同。而平均风速、沙尘暴日数和降雨量与降雨量分别呈幂函数、一元线性函数和指数函数关系,该研究结果党晓宏等<sup>[21]</sup>对乌兰布和沙漠不同下垫面的研究结果相同相悖,其研究表明,平均风速、沙尘暴日数与降尘量呈二次多项式函数关系。其原因有待于进一步研究。

4 结 论

(1) 吉兰泰盐湖防护体系降尘主要由极细砂和细砂物质组成。流动沙垄、流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带极细粒和细砂物质的含量分别为 88.44%, 96.68%, 75.53%, 77.00% 和 68.14%。

(2) 盐湖防护林带的年降尘量介于 123.53 ~ 295.39 t/(km<sup>2</sup> · a)。流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带的降尘量较流动沙垄分别减小 22.40%, 53.10%, 48.05% 和 24.85%。年内降尘量在 4 月份达到最大, 在 6 月份最小。年内降尘量主要集中于春冬两季, 占到年降尘量的 77.52% ~ 87.04%。

(3) 平均风速、扬沙日数、大风日数、沙尘暴日数和降雨量是影响降尘量的主要气象因子。平均风速、扬沙日数、大风日数、沙尘暴日数促进降尘量增加, 降雨量抑制降尘量增加。

#### 参考文献:

- [1] 奚晓霞, 李杰. 兰州市城关区 2000 年春季大气气溶胶特征及分析[J]. 环境科学研究, 2002, 15(6): 33-34, 38.
- [2] 罗凤敏, 高君亮, 刘芳, 等. 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[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(2): 163-169.
- [3] 钱广强, 董治宝. 大气降尘收集方法及相关问题研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 119-122.
- [4] 杨新明, 钟雅琪, 李国锋, 等. 典型工业城市大气降尘中重金属分布特征及其来源解析: 以济南市为例[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 94-103.
- [5] 孙昂, 曹景丽, 王明仕, 等. 典型工业城市中小学降尘重金属风险评估和源解析研究[J]. 地球与环境, 2021, 49(6): 655-664.
- [6] 张忠地, 邵天杰, 卫佩茹. 开封市大气降尘中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 156-162.
- [7] 张桂芹, 谭路遥, 张怀成, 等. 济南城市主干道降尘重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 156-164.
- [8] 王丽丽, 金团圉, 武志宏, 等. 不同类型施工降尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1055-1065.
- [9] 丁延龙, 汪季, 胡生荣, 等. 吉兰泰盐湖风沙防护林体系建立 35 a 以来防沙效益评估[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 111-119.
- [10] 管雪薇, 汪季, 党晓宏, 等. 吉兰泰盐湖防护体系的防风阻沙效应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 51-59.
- [11] 张清海, 叶功富, 林益明. 海岸沙地木麻黄人工林凋落物归还量及其热值动态研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 600-605.
- [12] 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.
- [13] 张加琼, 张春来, 吴晓旭, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系内的风沙沉降规律[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 16-22.
- [14] 张正偲, 董治宝. 降尘收集方法对降尘效率的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 499-508.
- [15] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120.
- [16] 陈新闻, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘下风向降尘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 295-301.
- [17] 毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 88-99.
- [18] Pye K. Aeolian dust and dust depositions[M]. London: UK Academic Press, 1987.
- [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] 汪季, 董智. 荒漠绿洲下垫面粒度特征与供尘关系的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 11-13, 16.
- [21] 党晓宏, 魏亚娟, 蒙仲举, 等. 乌兰布和沙漠东北缘不同下垫面降尘特征研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(5): 1122-1133.
- [22] Lal R, Follett R F, Kimble J, et al. Managing U. S. cropland to sequester carbon in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(1): 374-381.
- [23] Wan D, Mu G, Jin Z, et al. The effects of oasis on aeolian deposition under different weather conditions: a case study at the southern margin of the Taklimakan desert[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(1): 103-114.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 刘艳萍, 高永. 防护林降解近地表沙降尘机理的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 162-165.
- [27] 马全林, 尚雯, 王新友, 等. 风沙活动对人工梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 林土壤碳氮含量的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 71-78.
- [28] 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): 23-28.
- [29] 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 Environment, 2004, 57(1): 117-140.
- [30] 郝玉光. 乌兰布和沙漠东北部绿洲化过程生态效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.