

吉兰泰盐湖防护体系的防风阻沙效应

管雪薇¹, 汪季^{1,2}, 党晓宏¹, 丁延龙³, 冯亚亚¹, 梁钰镁¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2.内蒙古杭锦荒漠生态系统
国家定位观测研究站, 内蒙古 杭锦旗 017400; 3.内蒙古财经大学 旅游学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要: [目的] 定量描述防护体系防风阻沙能力及地表蚀积变化, 揭示盐湖防护体系的防风阻沙作用规律, 为吉兰泰盐湖防护体系防护效果评估提供数据支撑, 为中国西北风沙区及荒漠盐湖沙害治理提供理论依据。[方法] 选择吉兰泰盐湖防护体系为研究对象, 通过野外原位监测, 对 3、10 月两场典型强风沙尘天气下不同下垫面 0—30 cm 高度内输沙以及逐月地表蚀积情况进行观测。[结果] ① 2 m 高度处风速由流动沙垄到盐湖湖心表现为衰减—急剧衰减—恢复阶段, 到盐湖湖心时风速恢复至旷野风速。从白刺灌丛至盐碱滩地风速均较流动沙垄降低了 70%~90%。② 从白刺灌丛至盐湖湖心输沙量呈现为急剧降低—降低—缓慢增加的状态, 整体较流动沙垄降低了 83.89%~94.90%。③ 防护体系对两种主害风的防风阻沙效果明显, 其风速及输沙量分别较流动沙垄降低了 98.71%, 91.79%, 且西北风向下的防风阻沙效果优于西南风向。④ 6—9 月白刺灌丛至盐湖湖心地表呈现为风积状态, 且净蚀积强度较流动沙垄最高可降低 157.04%。[结论] 虽然受季节和风向影响, 但防护体系防风阻沙效果仍保持较好状态, 它对风沙流的阻滞作用使地表由风蚀转为堆积, 并使风速及输沙量均降低了 90% 以上, 从而有效避免盐湖湖面积沙。

关键词: 蚀积强度; 风沙流特征; 风速衰减; 盐湖防护体系; 吉兰泰盐湖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0051-09

中图分类号: S714.7, S727.2

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.008; Guan Xuewei, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Windbreak and sand-blocking effects of Jilantai Salt Lake protection system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 51-59.

Windbreak and Sand-blocking Effects of Jilantai Salt Lake Protection System

Guan Xuewei¹, Wang Ji^{1,2}, Dang Xiaohong¹, Ding Yanlong³, Feng Yaya¹, Liang Yumei¹

(1. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. National Observation and Research Station of Inner Mongolia Hangjin Desert Ecosystem, Hangjin Banner, Inner Mongolia 017400, China; 3. College of Tourism, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China)

Abstract: [Objective] The ability of a salt lake protection system to protect against wind and sand damage quantitatively and the changes to surface erosion and deposition induced by the system were described in order to reveal the wind-proof and sand-resistant action law of the protection system. The purpose of this study is to provide data support for the evaluation of the protection effect of the Jilantai Salt Lake protection system, and to provide a theoretical basis for sand damage control in the sandstorm area and desert salt lake in Northwest China. [Methods] The Jilantai Salt Lake protection system was chosen as the research object. Sand transporting (at 0—30 cm height) and surface erosion sediment intensity (monthly) were observed in situ by field positioning monitoring in different parts of the Jilantai Salt Lake protection system. [Results] ① The wind speed at 2 m height from the moving sand ridge to the center of the salt lake passed through three phases (attenuation, rapid attenuation, recovery). The wind speed from the *Nitraria tangutorum*

收稿日期: 2021-05-10

修回日期: 2021-06-15

资助项目: 国家重点研发计划“绿洲、盐碱湖区沙害防治关键技术研究与示范”(2016YFC0501003)

第一作者: 管雪薇(1996—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: guanxuewei1996@163.com。

通讯作者: 汪季(1957—), 男(汉族), 山东省济南市人, 博士, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: wangji1957@163.com。

shrub to the saline-alkali beach decreased by 70%~90% compared with the moving sand ridge. ② The sediment discharge from *N. tangutorum* to the center of the salt lake passed through three states (sharp decrease-decrease-slow increase), and was 83.89%~94.90% lower than the sediment discharge of the moving sand ridge. ③ The effect of the protection system on wind prevention and sand resistance from the two main harmful wind periods was obvious. Wind speed and sediment discharge decreased by 98.71% and 91.79%, respectively, compared with the moving sand ridge. In addition, the effect on wind and sediment prevention for the northwest wind direction was better than that for the southwest wind direction. ④ The surface showed sedimentation from *N. tangutorum* to the center of the salt lake from June to September, and the net erosion intensity could be reduced by up to a maximum of 157.04% compared with the moving sand ridge. [Conclusion] Although the protection system was affected by season and wind direction, the windbreak and sand-blocking effects still maintained a good state, and its blocking effect on wind-sand flow can change the state of the surface from wind erosion to sedimentation, thereby reducing wind speed and sediment discharge by more than 90%, and thus effectively avoiding sand accumulation on the salt lake surface.

Keywords: wind erosion intensity; characteristics of wind-sand flow; wind speed attenuation; salt lake protection system; Jilantai Salt Lake

土壤风蚀是导致中国北方干旱、半干旱区域土地荒漠化、沙尘天气的主要原因之一^[1-4]。吉兰泰盐湖位于乌兰布和沙漠西南边缘吉兰泰盆地的海拔最低处(东经 105°35′—105°46′, 北纬 39°38′—39°49′), 是中国重要的湖盐生产基地。由于风沙活动频繁, 加之土壤类型以砂质土壤为主^[5], 从而使该地区土壤风蚀极为剧烈, 不仅使土壤质地粗化^[6], 同时造成盐湖湖面积沙, 严重影响盐湖正常生产^[7-8]。为治理沙害, 盐湖北部自 1983 年开始建立由前沿阻沙带、封沙育草带、防风阻沙带、绿洲防护林网构成“四带一体”盐湖防护体系, 不仅起到防风固沙、改良土壤的作用, 更是有效地控制了盐湖沙害, 从而避免盐湖积沙而带来的盐湖开采问题^[9]。目前, 关于防护林的研究多以农田防护林^[10]、绿洲防护林^[11]、固沙林等^[12]为主, 但对盐湖防护体系的相关研究较少。

营建人工植被是防治土壤风蚀最为有效的办法之一^[13], 植被通过覆盖地表、降低风速、阻挡输沙等途径影响土壤风蚀^[14-15]。而防护林作为干旱、半干旱区域生态屏障, 具有改善局部小气候、改良土壤、防风固沙等作用^[9, 16-17]。杨越等^[10]研究发现, 晋北坝上农田防护林能够明显降低风沙流高度; 边凯等^[3]对乌兰布和沙漠东部边缘绿洲防护林体系防风阻沙能力进行研究, 发现从沙漠至绿洲内部输沙水平通量减少了一半。以上研究均可以看出防护林防风固沙效果十分明显。然而, 防护林的防风固沙作用因风向、植被类型等的不同均会产生不同程度的变化。通过观测吉兰泰盐湖防护体系不同风向下风速、输沙量变化及年内各月地表蚀积变化规律, 可以清楚反映不同季节、不同植被构成及两种主害风方向下盐湖防护体系防风阻沙及地表蚀积变化规律。

风沙危害是制约荒漠盐碱湖区资源开采的重要因素之一, 长期以来, 许多学者对盐湖周边风沙沉积物理化特征^[18-19]、盐湖周边风沙地貌发育环境等^[20]进行研究, 并且取得了一系列成果, 但对如何防治荒漠盐碱湖区风沙危害及其防治措施有效性的相关研究较少。建立盐湖防护体系可以有效防风阻沙^[9], 然而, 盐湖防护体系在不同风向下的防风阻沙效果如何? 不同部位年内各月地表蚀积规律是怎样变化的? 基于此, 本文以吉兰泰盐湖防护体系为研究对象, 在 2019 年 3 月至 2020 年 1 月, 对吉兰泰盐湖防护体系不同部位年内各月地表蚀积量和风速、输沙量进行研究, 定量描述防护体系防风阻沙能力及地表蚀积变化, 以期揭示盐湖防护体系的防风阻沙作用规律, 为吉兰泰盐湖防护体系防护效果评估提供数据支撑, 为中国西北风沙区及荒漠盐湖沙害治理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

吉兰泰盐湖地处中国最大的沙尘暴策源地阿拉善高原东南部, 为贺兰山—巴音乌拉山山间盆地的最低处, 盆地西南边缘为腾格里沙漠, 东北部毗邻乌兰布和沙漠, 西北部与亚玛雷克沙漠隔山相望, 为三大沙漠的交界地带, 行政上隶属于阿拉善左旗。据吉兰泰气象站(距离研究区直线距离 6.5 km)1971—2016 年气象数据统计, 吉兰泰地区冬春季盛行西北风、东北风, 最大瞬时风速 24 m/s, 年均扬沙日数为 82.5 d, 年风沙流出现频率为 112.9 次, 在不同月份, 输沙势在 4—8 月均处于较高水平, 在 6 月达到最高。多年平均降水量为 107.8 mm, 并集中于 6—8 月。年蒸发

量为 2 956.8 mm, 是降水量的 27.4 倍^[21]。由于吉兰泰地区特定的气候特征和地貌环境导致吉兰泰盐湖地区稀疏分布的植被多为耐旱、耐碱的小灌木及草本植物^[9], 主要有盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、白刺 (*Nitraria tangutorum*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*) 等^[9]。

1.2 防护体系构成

吉兰泰盐湖防护体系位于吉兰泰盐湖北部 10 km 处, 属吉兰泰镇希勃图嘎查, 为乌兰布和沙漠的西南边缘。该体系于 1983 年建立, 整体垂直于西北风向, 从北向南依次由前沿阻沙带、封沙育草带、防风阻沙带、绿洲防护林网 4 部分组成。

前沿阻沙带主要布设在流动沙垄上, 以新型固沙材料 (PLA) 与传统草方格相结合构成。

封沙育草带毗邻植被稀少、地表疏松、风沙活动强烈的流动沙地, 沙丘上分布有白刺 (*Nitraria tangutorum*)、沙蒿 (*Artemisia desertorum*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*) 等天然植被, 以白刺为主,

主要阻滞 0—50 cm 高度内风沙流。

防风阻沙带处于天然灌草植被与绿洲防护林之间, 以沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*) 等灌木构成, 其作用是继续削弱风速, 拦截风沙流中剩余沙粒。

绿洲防护林网以人工栽植的沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*)、新疆杨 (*Populus alba* var. *pyramidalis*) 等为主要树种, 地物以苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 为主, 兼有禾本科杂类草。其目的是改善近地层小气候条件, 拦截部分悬浮运移的沙尘, 同时控制绿洲内部在大风天气下不会起沙。

由于防风阻沙带和绿洲防护林网为补植性造林, 为了方便观测, 本文将防风阻沙带及绿洲防护林网合为防护林带, 并将防护体系划分为流动沙垄、白刺灌丛、防护林带、盐碱滩地 (盐湖周边生长植被地区)、盐湖湖心 (盐湖边缘无植被地带) (表 1)。

表 1 吉兰泰盐湖防护林体系观测样地位置及地形、植被特征

样地	经纬度	地貌状况	植被特征
流动沙垄	39°49'08"N, 105°44'06"E	流沙, 沙丘高度 5~10 m, 长 200~500 m。沙面结构松散	沙垄上部无植被, 丘间偶见沙米、白刺, 盖度 < 10%
白刺灌丛	39°48'32"N, 105°44'02"E	白刺沙包高度 0.5~5 m, 沙表面质软, 半固定	白刺为主, 灌丛之间有少量芦苇、沙米、苦豆子, 盖度 15%
防护林带	39°48'07"N, 105°43'48"E	地面起伏较小, 沙面有结皮	沙枣、花棒、梭梭, 盖度 80%
盐碱滩地	39°47'13"N, 105°43'51"E	地势平坦, 表面盐结皮发育	盐爪爪、芦苇, 盖度 30%
盐湖湖心	39°46'26"N, 105°43'40"E	地势平坦, 覆沙表面为盐结皮	无植被

1.3 研究方法

(1) 样地设置。根据吉兰泰盐湖防护体系布设情况划分调查样地, 依次从流动沙垄、白刺灌丛、防护林带、林带后盐碱滩地, 到达盐湖湖心, 共计 5 种样地类型 (表 1)。试验于 2019 年 4 月至 2020 年 1 月在吉兰泰盐湖防护体系进行 (2019 年 12 月、2020 年 1 月地面积雪覆盖, 未取得测钎数据)。通过野外实地调查, 根据典型性和代表性原则, 在防护体系地表平坦处, 利用手持 GPS 确定样点位置, 并均匀布设 3 条调查样带 (即每个样地类型取 3 个重复), 涵盖整个防护体系, 每条样带基本保持平行, 且均包含上述 5 种样地类型。以流动沙垄为对照, 防护林带每条样带分别在林前、林中、林后布设 3 个样地, 其余样地类型每条样带各布设一个样地 (为避免影响盐湖正常开采, 盐湖湖心样地选择在盐湖周围无植被裸露地表), 共计 21 个样地。地表蚀积状况采用矩阵式插钎法进行测

定, 每根测钎直径约 2 mm, 长 1 m, 在距下端 40 cm 处进行标记 (测钎插入土层深度为此标记与地面平行), 测量精度为 1 mm。每根测钎间隔 100 cm, 布置成 5 m × 5 m 的网格格式样方, 白刺灌丛布置成 4 m × 5 m 的网格格式样方, 布设测钎时迎风一侧与主害风方向保持垂直。

(2) 地表风速观测。选取 2019 年 3, 4, 10 月共 3 场典型风沙活动 (风向为西北、东北、西南风), 以上风向流动沙垄为对照点, 自北向南使用 H-21 型 HOBO 小型气象站观测各样地地上 20, 30, 50, 85, 200 cm 高度处风速。

(3) 输沙量观测。试验于 2019 年 3 月、10 月进行, 从流动沙垄至盐湖湖心, 每种样地类型布设一个 30 cm 高度, 进沙口为 2 cm × 2 cm 的正方形截面的阶梯式集沙仪进行输沙量采集, 集沙仪可根据风向自动转向以保证集沙口始终对准来沙方向, 共布设

5 个集沙仪。观测时间视风速大小确定,在集沙仪最下层集沙盒收满前同时停止。每次观测结束后,将集沙盒内的风蚀物快速取出,分层装入塑封袋内,随后开始下一批采样。观测结束后,将风蚀物样品带回试验基地烘干后用天平称重,得出每层输沙率 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})]$ 。

1.4 数据分析

(1) 风速衰减评估指标。采用风速衰减因子 WDR 来评价防护林体系各部位风速相对流动沙垄风速的衰减情况。

$$\text{WDR}_i = \frac{v_0 - v_i}{v_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:WDR_i 为防护林体系内某一下垫面风速降低比(%); v_0 为对照流动沙垄处某一高度处风速(m/s); v_i 为某一下垫面对应高度处风速(m/s)。

(2) 地表净蚀积强度计算。

$$Q = \frac{a-b}{s} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中:Q 为净侵蚀强度(m^3/m^2); a 为正体积, b 为负体积(m^3)(a, b 均为 suffer 中经计算所得数值); S 为测杆布设面积(m^2); $Q > 0$ 时,为风蚀, $Q < 0$ 时,为风积。

(3) 风蚀率、风积率计算。

$$Q_1 = Q_b / Q \quad (3)$$

$$Q_2 = Q_a / Q \quad (4)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为风蚀率和风积率(%); Q 为净侵蚀强度(m^3/m^2); Q_a, Q_b 分别为净堆积强度和净侵蚀强度(m^3/m^2)。

(4) 空气动力学粗糙度及摩阻风速计算。

①粗糙度。

$$\lg Z_0 = \frac{u_1 \lg Z_2 - u_2 \lg Z_1}{u_1 - u_2} \quad (5)$$

式中: Z_1, Z_2 为距地表面任意两个高度(cm); u_1, u_2 分别为 Z_1, Z_2 两个高度上的风速(m/s); Z_0 为空气动力学粗糙度(cm)。

②风速廓线。

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (6)$$

式中: u_* 为摩阻风速(m/s); k 为卡曼常数(0.4); U_z 为高度 z 处的风速(m/s)。

用高度取自然对数值为纵轴,风速值为横轴,再用最小二乘法拟合所得风速廓线方程为:

$$U_z = A + B \ln z \quad (7)$$

式中: A, B 为回归系数。

③摩阻风速。

$$u_* = kB \quad (8)$$

(5) 分析方法。采用 Origin 9.1 及 Excel 2019 进行图表绘制;用 Excel 2019 统计各样方内不同观测时间各杆高度差,插杆高度差 > 0 时表示风蚀,用正值表示,插杆高度差 < 0 时为风积,用负值表示,根据各杆高度差采用 suffer8 软件克里格插值法计算地表蚀积量。

2 结果与分析

2.1 吉兰泰盐湖防护体系不同部位防风效应

2.1.1 不同部位风速廓线变化特征 不论何种风向,防护体系整体风速随高度的增高而增加,且符合指数函数规律, R^2 在 0.84~0.99 之间(图 1)。

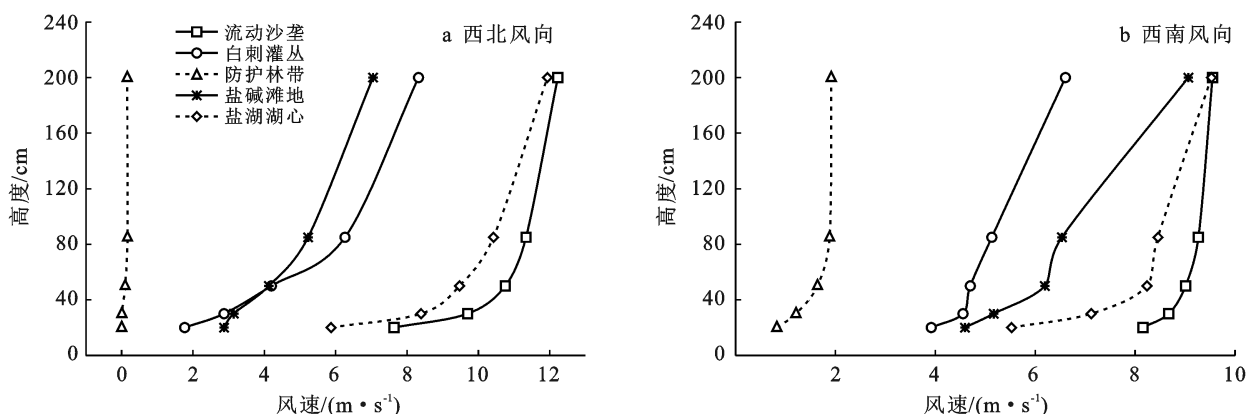


图 1 吉兰泰盐湖防护体系不同部位不同风向下风速廓线变化

在西北风向下,白刺灌丛风速在 50 cm 高度处急剧上升,且最大风速为 8.322 m/s;防护林带由于为乔灌草构成的紧密结构的复层林带,且林带走向垂直于

西北风向,因此其防风效果最佳,从而使风速变化幅度小,进而使其风速廓线趋于垂直;盐碱滩地地表覆盖有盐爪爪等小灌木,可有效降低地表 0—30 cm

高度内的风速,在 50 cm 高度处风速急剧上升,为 4.13 m/s,但由于受上风向防护林带的影响,该部位风速远低于对照,最大风速为 7.05 m/s。在西南风向下,上风向由流动沙垄转变为盐湖湖心,因此盐碱滩地由于盐爪爪覆盖降低了 0—30 cm 高度内风速,但整体风速均大于西北风向,其最大风速为 9.07 m/s;防护林带由于观测地点靠近迎风一侧,但由于为乔灌木构成的紧密结构的复层林带,因此其风速显著低于对照,且最大为 1.92 m/s;白刺灌丛由于风向的变化使其上风向由流动沙垄变为防护林带,因此在受防护林带的影响下,近地表风速急剧上升的拐点由 50 cm 上移至 85 cm,且最大风速为 6.61 m/s。

2.1.2 不同部位粗糙度及摩阻风速变化特征 图 2 为不同风向下防护体系各样地地表粗糙度及摩阻风速变化规律,各样地不同风向下粗糙度 R^2 范围在 0.79~0.99 之间。从图 2 中可以看出不论在何种风向下,防护林带地表粗糙度最高为 4.61 cm;盐湖湖心及流动沙垄在不同风向条件下其地表粗糙度较其他样地小,两者值相近且盐湖湖心地表粗糙度稍高于流动沙垄。不同风向条件下各样地摩阻风速大致呈现为随粗糙度的增加而增加的趋势。以上结果表明风向不同,空气动力学粗糙度及摩阻风速在防护体系不同部位的变化规律有所差异,但总体上随着植被盖度的增加大致呈现出增加的趋势。

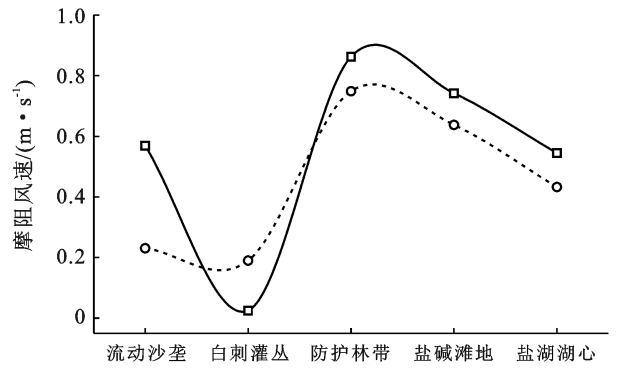
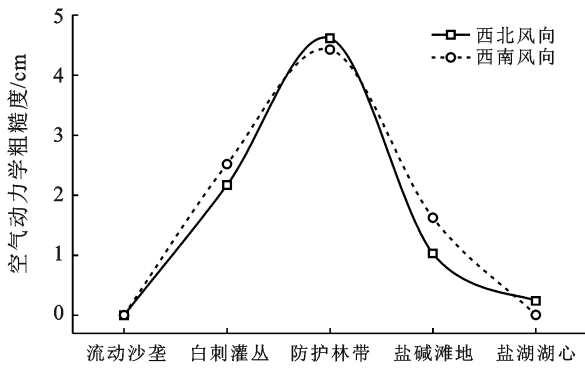


图 2 吉兰泰盐湖防护体系不同样地粗糙度及摩阻速度

2.1.3 盐湖防护体系不同部位不同风向下风速衰减速率 图 3 为吉兰泰盐湖防护体系各部位西北、西南风向下不同高度处风速衰减速率,风速衰减速率越大表明风速越小。防护林带防风效果不受风向影响,白刺灌丛及盐碱滩地地表粗糙度较大,对 0—50 cm 高度内防风效果最佳,其风速较流动沙垄可降低 70%~90%左右。西北风向下,从 200 cm 高度处风速来看,由于白刺为匍匐型植被,在灌丛顶部会形成风速加速区,因此其风速较流动沙垄仅降低 31.94%;由于防护林带为乔灌木混交的紧密结构的复层林带,防风效果显著,其风速较流动沙垄降低 98.71%;当气流至盐

碱滩地时,风速有所恢复,较流动沙垄降低 42.36%;盐湖湖心由于无植被覆盖,因此气流运移至湖心时恢复至旷野风速,从而防止盐湖湖面积沙。

吉兰泰盐湖防护体系西南风向下防风效果较西北风向下差;由于风向变化,上风向由流动沙垄变为盐湖湖心,从白刺灌丛至盐湖湖心 200 cm 高度处风速衰减速率为 0.25%~82.62%;其中白刺灌丛由于受到上风向防护林带的影响,在 85 cm 高度处风速有所增加,但整体较小;因此,除白刺灌丛外,其余样地风速均较西北风向下高,且风速衰减速率减少 2.15%~35.15%。

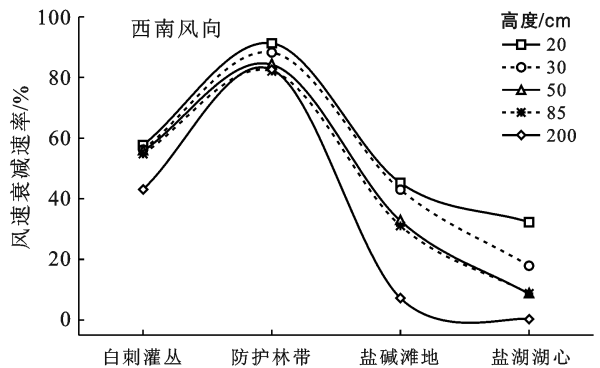
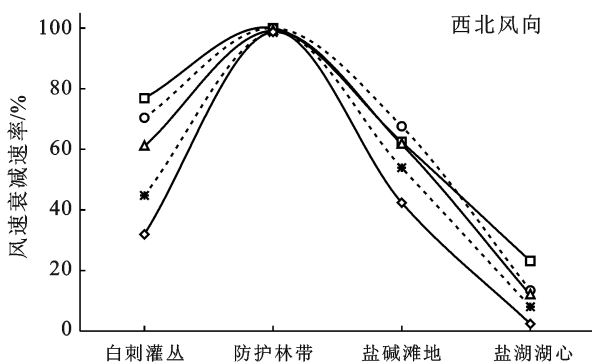


图 3 吉兰泰盐湖防护体系不同部位风速衰减速率

2.2 防护体系不同部位输沙量变化规律

从垂直高度上看,不论何种风向,防护体系不同部位输沙量随高度的增加而降低,且 50% 以上的输沙量主要集中在 0—10 cm 高度内(图 4)。从防护体系不同部位来看输沙量变化有明显差异(图 5)。在西北风向下,白刺灌丛对近地表 0—50 cm 高度内风沙流阻滞作用明显,其输沙量较流动沙垄降低 83.89%;风沙流运移至防护林带时,被持续阻滞,其输沙量较流动沙垄降低 91.79%;盐碱滩地风速逐渐恢复,但由于地表覆盖有盐结皮,就地起沙较少,因而此时输沙量较防护林带增加 23.81%,但仍比流动沙垄降低 89.84%;盐湖湖心风速恢复至旷野风速,且由于气流经过防护体系后有 90% 左右的沙粒被拦截堆积在地表,因此盐湖湖心输沙量较小,较盐碱滩地降低 14.10%。除白刺灌丛外,西南风向下从流动沙垄

至盐湖湖心,输沙量较西北风向下分别增加 31.28%~60.64%,但输沙量从白刺灌丛至盐湖湖心较流动沙垄均降低 84.46% 以上。表明防护体不论在西北风还是西南风对风沙的阻滞作用明显,且阻沙效果西北风向下优于西南风向下。

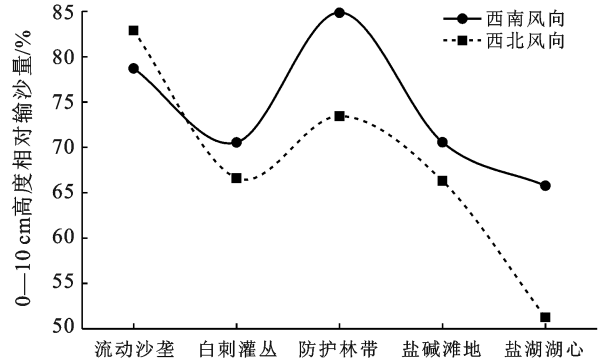


图 4 吉兰泰盐湖防护体系 0—10 cm 高度处相对输沙量

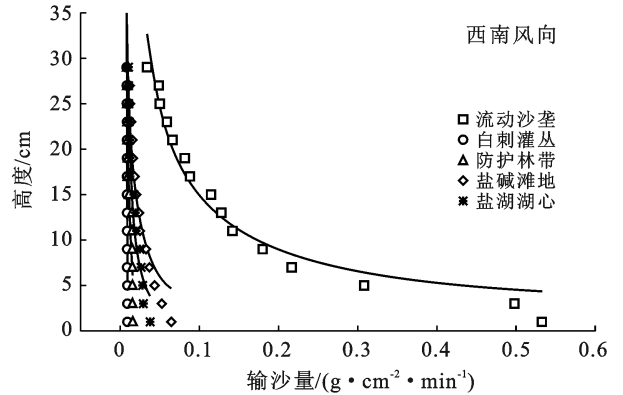
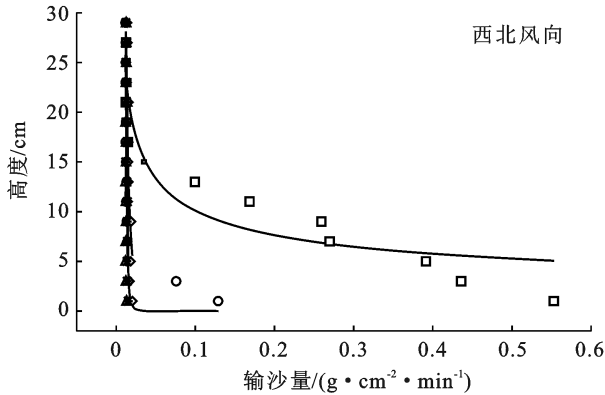


图 5 吉兰泰盐湖不同风向下防护体系各部位输沙量

2.3 防护体系不同部位地表蚀积强度变化特征

2.3.1 一次风沙活动后各样地类型地表蚀积变化
表 2 为吉兰泰盐湖防护体系不同下垫面风速衰减情况。由流动沙垄到盐湖湖心,风速降低比由白刺灌丛增高,到达防护林从林前至林后呈现先减小后增加的趋势,于防护林后达到最大,为 64.20%,随后到盐碱滩地逐渐减小,于盐湖湖心达到最小,为 -3.7%。图 6 为 4 月不同下垫面地表蚀积情况,除流动沙垄地表现为风蚀状态,为 $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^2$,其余样地地表均呈现出风积状态;白刺灌丛到盐碱滩地,地表净蚀积强

度逐渐增大,其中白刺灌丛地表净蚀积强度最小,为 $-0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2$;由防护林前到防护林后,地表风积量逐渐减小,到达盐碱滩地时地表呈现出轻微蚀积变化,盐湖湖心地表呈现出轻微风积状态。由此表明,风速由流动沙垄到盐湖湖心,经历两次衰减过程,白刺灌丛为第一次风速衰减,防护林带为第二次风速衰减,由于两次风速衰减,使得风沙流中携带大量颗粒沉积于地表,风沙流由饱和状态转变为不饱和状态,到达盐湖湖心时风速恢复为旷野风速,气流携沙能力增强,有效减少湖面积沙。

表 2 吉兰泰盐湖防护体系不同下垫面风速衰减速率

指标	白刺灌丛	防护林前	防护林中	防护林后	盐碱滩地	盐湖湖心
2 m 处风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.68	6.47	6	3.75	5.67	7.37
2 m 处旷野风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.49	8.22	9.38	10.47	6.78	7.11
风速降低比例/%	44.89	21.26	35.99	64.19	16.29	-3.7

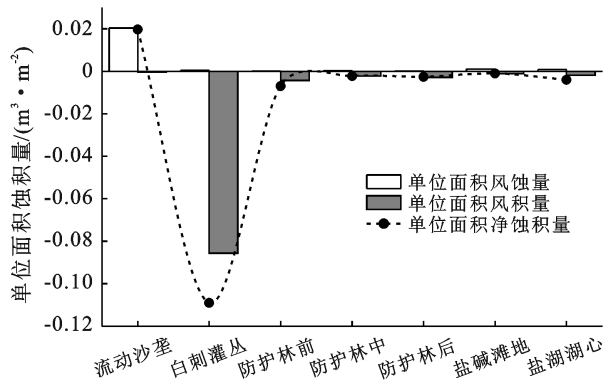


图 6 吉兰泰盐湖防护体系不同下垫面一场大风后地表单位面积蚀积变化

2.3.2 防护体系各部位月际地表蚀积强度变化特征

由图 7 可知,由于受植被生长季的影响,防护体系不同部位地表蚀积强度在 5—6 月和 10—11 月以轻微风蚀为主,其中流动沙垄地表净蚀积强度最大为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^2$,白刺灌丛至盐碱滩地地表净蚀积强度逐渐减小,且白刺灌丛地表净蚀积强度最小为 $-0.01 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。7—9 月各样地地表以风积为主,其中流动沙垄地表净蚀积强度最大为 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^2$;从白刺灌丛至盐碱滩地,地表以风积为主,且净蚀积强度逐渐增大,其中白刺灌丛净蚀积强度最小为 $-0.02 \text{ m}^3/\text{m}^2$;盐湖湖心地表表现出轻微的蚀积变化。

3 讨论

土壤风蚀导致土壤质地粗化、肥力降低,严重影响土地生产力,同时也是导致沙尘天气的主要因素之一^[2,9]。在干旱、半干旱荒漠区,植被通过对风沙流的阻滞作用及对土壤的改良作用防治土壤风蚀^[22]。而植被生长季节、植被盖度、风向^[13]、防护林林带结构^[3]及其林种构成等^[12]均会影响植被对土壤风蚀的防护效果。本研究中,不论何种风向下,防护体系防风阻沙效果均可达 80% 以上,其中西北风向优于西南风向;与西北风向相比,西南风向风速衰减速率从白刺灌丛至盐碱滩地减少了 2.15%~35.15%,输沙量增加了 31.28%~60.64%;张帅等^[23]通过观测不同风向下乌兰布和沙漠农田防护林的防风效能发现防护林对不同风向风均有较好的防护效果,且风向与主林带夹角越小,其防风效能随之减小,与本研究结果相似。但由于本研究中林带为乔灌草相结合的复层林带,因此在夹角为 90° 时,防风效能较张帅^[23]的研究结果增加了 29.21%,此处也可看出由多树种多层次构成的林带其防护效果优于纯林。防护体系 2 m 处风速衰减速率表现为:防护林带(98.71%)>盐碱滩地(42.36%)>白刺灌丛(31.94%)>盐湖湖心

(2.40%)。杨越等^[10]对冀北坝上地区农田防护林的防风效能进行研究发现 2 m 处灌木林、乔灌混交林防风效能分别为 20.8%,20.2%,乔灌混交林林后防风效能可在 40%~50% 之内,与本研究结果相似。但本研究中乔灌混交林为补植性造林,植被盖度较高,且密度较大,对风速的衰减作用较强,进而使乔灌混交林防风效能较杨越等增加了 40%。

一场风沙活动后,由于流动沙垄顶部无植被覆盖,因此地表表现为强风蚀状态,净蚀积强度为 $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^2$;从白刺灌丛至盐湖湖心地表呈现为风积状态,且净蚀积强度逐渐增加。与解云虎^[15]研究发现荒漠绿洲过渡带从流动沙地至防护林地表由风蚀转为堆积结果相似。但与其发现灌草带地表以侵蚀为主不同,本研究白刺灌丛地表以风积为主,与丁延龙等^[24]对吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛地表蚀积研究结果保持一致。当气流经过白刺灌丛时,由于受到植被阻挡,在近地表形成减速区,从而使风速急剧降低,进而使沙粒堆积在地表^[25],因此其地表净蚀积强度最小,为 $-0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。盐碱滩地及盐湖湖心地表表现为轻微堆积状态,与丁延龙等^[9]通过风沙流特征值计算结果对吉兰泰防风固沙林地表蚀积变化研究结果相似,但与丁延龙等发现盐湖湖心地表为风蚀状态不同。野外实地观测盐湖湖心风速大,且地表未存在覆沙,然而通过测钎法观测显示盐湖湖心为风积状态,可能是盐湖湖心土壤含盐量较高,高温导致土壤盐分逐渐向土壤表层积累,从而使铁质测钎与湿润盐土接触会发生电化学腐蚀^[26],进而在测量测钎高度时表现出轻微风积状态。由于植被生长季的影响,防护体系地表蚀积强度在年内各月表现为 5—6 月和 10—11 月地表以轻微风蚀为主,7—9 月以风积为主,与解云虎^[15]研究结果保持一致。由于防护体系中防护林带为补植性造林,无明确规格,虽然整体发挥了较好的防风阻沙效果,但在指导实际生产过程中有一定的局限性,建议明确在此体系下的最优造林规格。

4 结论

(1) 防护体系由流动沙垄到盐湖湖心表现为衰减—急剧衰减—恢复阶段,到盐湖湖心时风速恢复至旷野风速;且防护体系对两种主害风的防风效果明显,其中西北风向优于西南风向。防护体系可显著降低 50 cm 高度以下风速,较对照降低 70%~90%。与西北风向相比,白刺灌丛西南风向风速均有所增加,风速衰减速率减小了 2.15%~35.15%。

(2) 防护体系从白刺灌丛至盐湖湖心输沙量表现为急剧降低—降低—缓慢增加,且均较流动沙垄降

低了 83.89%~94.90%。从不同风向上看,防护体系对两种主害风的阻沙效果明显,西北风向下的阻沙效

果优于西南风向,西南风向下输沙量较西北风向增加了 31.28%~60.64%。

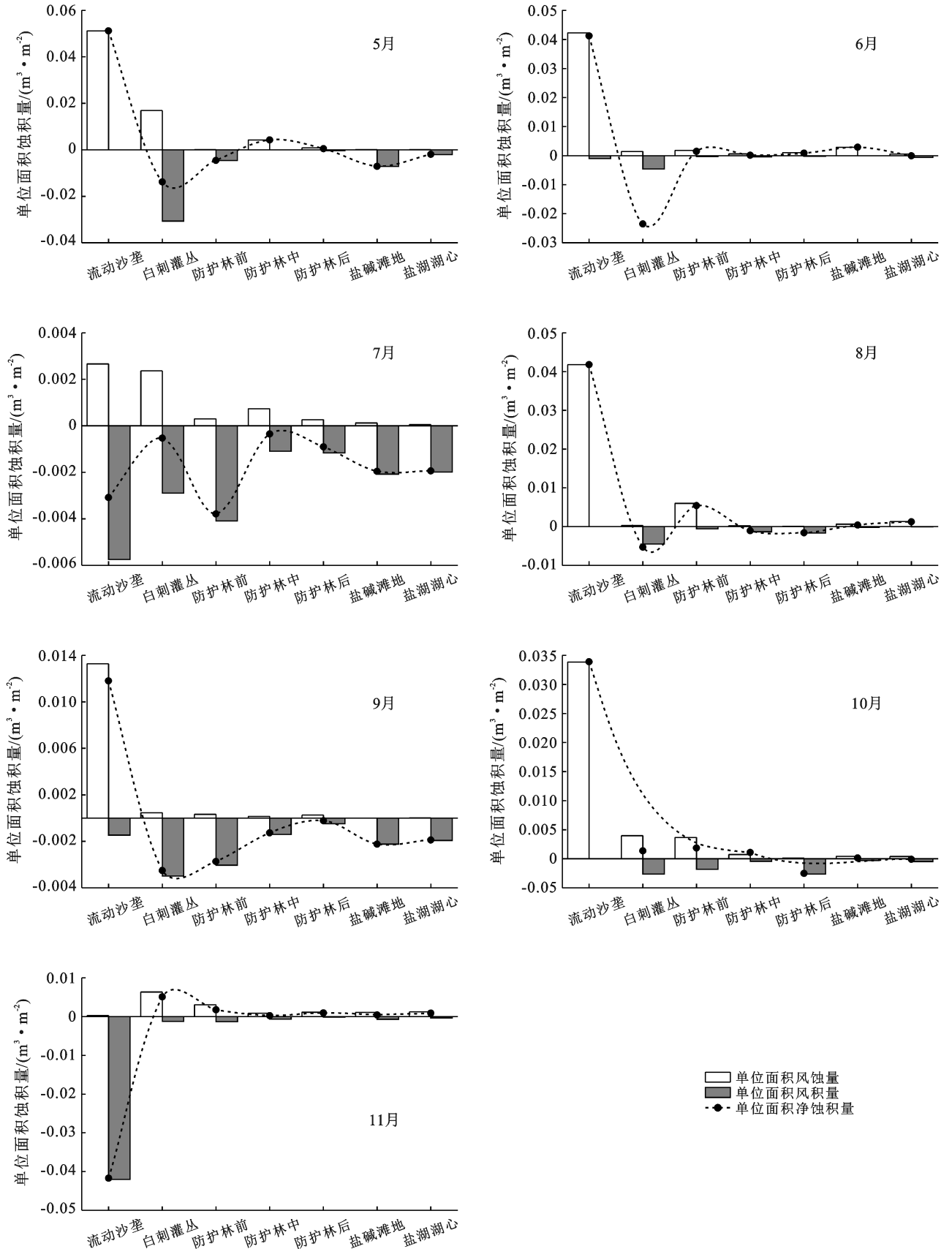


图 7 5—11月吉兰泰盐湖防护体系不同下垫面蚀积量的变化

(3) 防护体系地表蚀积受季节影响较大, 其中流动沙垄各月地表蚀积变化整体呈现出强风蚀状态, 风蚀强度最大为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^2$; 白刺灌丛至盐湖湖心在6—9月地表呈现为风积状态, 且净蚀积强度逐渐增加, 5月和10月整体表现为风蚀状态, 11月呈现轻微的蚀积变化。

[参 考 文 献]

- [1] 杨彩红, 冯福学, 柴强, 等. 小麦玉米田耕作模式的防风蚀效果[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 9-15.
- [2] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 110-118, 220.
- [3] 边凯, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘绿洲防护林体系防风阻沙能力研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 48-53.
- [4] Zhang Chen, McBean E A. Estimation of desertification risk from soil erosion: A case study for Gansu Province, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30(8): 2215-2229.
- [5] 管雪薇, 汪季, 丁延龙, 等. 吉兰泰盐湖防风固沙林体系土壤理化性状特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 114-120.
- [6] 李银科, 李菁菁, 周兰萍, 等. 民勤绿洲灌区保护性耕作对土壤风蚀与土壤物理性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1306-1311.
- [7] 高永. 吉兰泰盐湖环境演化及沙害成因[J]. 干旱区研究, 1996, 13(4): 54-56, 66.
- [8] 岳涛, 高世场, 夏树屏. 吉兰泰盐湖沙漠化及其治理的遥感监测研究[J]. 盐湖研究, 2000, 8(2): 1-5.
- [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] 杨越, 杨依天, 武智勇, 等. 冀北坝上地区农田防护林防风固沙效应研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 167-172.
- [11] 孙浩, 刘丽娟, 李小玉, 等. 干旱区绿洲防护林网格局对农田蒸散量的影响: 以新疆三工河流域绿洲为例[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2436-2444.
- [12] 韦立伟. 几种典型沙生灌木防护林防风效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [13] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 29-36.
- [14] Jia Honglei, Wang Gang, Guo Li, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in Northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 112-119.
- [15] 解云虎. 荒漠—绿洲过渡带防护体系构建及其防风阻沙效益研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [16] 王翠, 雷加强, 李生宇, 等. 和田地区绿洲外围农田防护林带的防护效益[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 98-103, 122.
- [17] 詹科杰. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆表面风沙输运特征与沙堆形成发育的关系研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2016.
- [18] 凌智永, 陈亮, 芦宝良, 等. 柴达木盆地盐湖周边灌丛沙丘微量元素特征与环境意义[J]. 盐湖研究, 2018, 26(3): 35-43.
- [19] 杨宁宁. 察尔汗盐湖周边风沙沉积物粒度和重矿物特征[D]. 陕西 西安: 陕西师范大学, 2012.
- [20] 鲍锋. 柴达木盆地察尔汗盐湖地区风沙地貌发育环境与过程[D]. 陕西 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [21] 春喜, 王宗礼, 夏敦胜, 等. 吉兰泰盐湖的形成及指示的环境意义[J]. 盐湖研究, 2008, 16(3): 11-18.
- [22] Guo Zhonglin, Chang Chunping, Wang Rende, et al. Comparison of different methods to determine wind-erodible fraction of soil with rock fragments under different tillage/management [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 42-49.
- [23] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 基于数学期望的风向和风速对农田防护林网防风效能的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(4): 510-516.
- [24] 丁延龙. 白刺灌丛沙堆演化对地表蚀积的影响及其作用机制[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [25] 乌拉, 张国庆, 辛智鸣. 单个天然灌丛防风阻沙机理与效应[J]. 内蒙古林业科技, 2008, 34(2): 36-39.
- [26] 易丹青, 陈丽勇, 刘会群, 等. 硬质合金电化学腐蚀行为的研究进展[J]. 硬质合金, 2012, 29(4): 238-253.