

冀北坝上地区3种人工灌木林地防风蚀效果的比较

杨越, 吴才武, 武智勇, 杨依天, 韩永娇, 张月丛

(河北民族师范学院资源与环境科学系, 河北承德 067000)

摘要: 选取冀北坝上地区防风固沙林为研究对象, 通过观测风速、地表粗糙度、临界起沙风速、输沙量、风沙流结构等指标, 对比分析3种人工灌木林地(沙棘林地、柠条林地、沙柳林地)防风蚀效果。结果表明: 人工植被能够增加地表粗糙度, 改变近地表风场和风沙流结构, 降低风速, 减少输沙量, 有效防治土壤风蚀。不同人工灌木林地防风蚀效果存在较大差异。从主要观测指标来看, 粗糙度和临界起沙风速为柠条林地>沙棘林地>沙柳林地; 输沙量为柠条林地<沙棘林地<沙柳林地; 防风效应为沙棘林地>沙柳林地>柠条林地; 固沙效应为柠条林地>沙棘林地>沙柳林地。冀北坝上地区应充分发挥林木防风固沙、保持水土的特性, 采用生物治沙技术与措施, 合理配置人工植被开展生态建设, 防治土壤风蚀, 改善生态环境。

关键词: 人工植被; 土壤风蚀; 防治; 粗糙度; 坝上地区

中图分类号: S157; S774

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0054-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.008

Comparative Study on Wind Erosion Prevention Effect of Three Artificial Shrublands in Bashang Area of Northern Hebei

YANG Yue, WU Caiwu, WU Zhiyong, YANG Yitian, HAN Yongjiao, ZHANG Yuecong

(Department of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University for Nationalities, Chengde, Hebei 067000)

Abstract: Taking the wind-break and sand-fixing forests in the Bashang area of northern Hebei as the research object, the effects of three artificial shrublands (*Hippophae rhamnoides* Linn., *Caragana korshinskii* and *Salix pasmmophia*) on wind erosion prevention were compared and analyzed by observing wind speed, surface roughness, critical sand-blown wind speed, sand transporting quantity and wind-sand flow structure. The results showed that artificial shrubland could increase the surface roughness, change the near-surface wind field and wind-sand flow structure, reduce the wind speed, reduce the sand transporting quantity, and consequently effectively control soil wind erosion. The effects of different artificial shrublands on wind erosion prevention were quite different. From the main observation indicators, roughness and critical sand-blown wind speed: *Caragana korshinskii* > *Hippophae rhamnoides* Linn. > *Salix pasmmophia*; sand transporting quantity: *Caragana korshinskii* < *Hippophae rhamnoides* Linn. < *Salix pasmmophia*; windbreak effect: *Hippophae rhamnoides* Linn. > *Salix pasmmophia* > *Caragana korshinskii*; sand fixation effect: *Caragana korshinskii* > *Hippophae rhamnoides* Linn. > *Salix pasmmophia*. The characteristics of wind-break, sand fixation and soil and water conservation of trees should be fully utilized. The biological desertification control technology and measures should be used for ecological construction in Bashang area of northern Hebei, and ultimately for controlling soil wind erosion and improving the ecological environment.

Keywords: artificial vegetation; soil wind erosion; control; roughness; Bashang area

冀北坝上地区地处北方农牧交错带, 水资源短缺、气候寒冷干燥、生态环境脆弱^[1]; 在环境变化和人为干扰的双重作用下饱受土壤风蚀和风沙灾害的影响, 严重制约着区域农业和社会经济的发展^[2-3]。土壤风蚀(soil wind erosion)是指土壤及其母质在风力作用下剥蚀、分

选、搬运的过程, 是气流或气固两相流对地表物质的吹蚀和磨蚀塑造地球景观的基本地貌过程^[4]。严重的土壤风蚀造成土壤结构破坏、养分流失、生产力低下, 是干旱半干旱地区土地沙化和荒漠化的主要原因之一^[5-6]。作为京津冀的生态屏障, 冀北坝上地区 2000

收稿日期: 2019-07-04

资助项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2015320); 河北省自然科学基金项目(C2015101020, E2019101012)

第一作者: 杨越(1983—), 男, 满族, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、干旱区生态恢复研究。E-mail: yangyue131421@163.com

通信作者: 杨依天(1970—), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事自然地理综合研究。E-mail: yangyt.106@ignrr.ac.cn

年以来相继实施的“退耕还林还草”“京津风沙源治理”和“首都水源地保护”等林业生态工程,起到防风固沙、保持水土、改善生态环境的作用。

人工植被可以通过覆盖部分地表、分解风力、阻挡输沙等途径对地表土壤风蚀产生影响^[7-8],其效果主要取决于植被的高度、盖度、形态、分布等群落特征^[9]。王翔宇等^[7]通过对毛乌素沙地不同下垫面风速、地表粗糙度、临界起沙风速、风沙流结构的观测,发现植被盖度为 40% 的固定沙地近地表 0.2 m 高度平均风速比流动沙地降低 45%,侵蚀风的持续时数降低 83%,临界起沙风速提高 70%,地表粗糙度提高 190 倍,平均输沙降低 95.6%。李昂等^[10]研究表明,西北风蚀区甘草耕地比裸地的抗风蚀能力显著提高,地表粗糙度提高 12~55 倍,土壤含水率提高 27%~148%,土壤风蚀量下降 10%~78%。陈娟^[11]通过分析荒漠草原区人工柠条林带间不同高度土壤风蚀量动态特征及其对风速风向的响应,定量评价其防治土壤风蚀效应,并提出加强人工柠条林带空间格局配置能够充分发挥其防风固沙效应。

冀北坝上地区已经开展不同土地利用方式对土壤风蚀影响的研究^[12-13],另有生态工程对土壤风蚀治理效果的研究^[14-15],但关于不同人工植被对土壤风蚀防治效果的研究相对较少。因此,本文选取冀北坝上地区防风固沙林为研究对象,以裸露沙地为对照,通过观测风速、地表粗糙度、临界起沙风速、输沙量、风沙流结构等指标,对比分析 3 种人工灌木林地防风蚀效果,为该地区植被恢复与生态建设提供科学依据。

表 1 样地概况

样地类型	植被情况	地表状况
裸露沙地	1 年生草本,零星散布,高度小于 5 cm,长势较差	基本无覆盖,风沙活动强烈
沙棘林地	株行距 1.5 m×2 m,平均高度 2.4 m,平均冠幅 1.6 m,长势良好	行间地表裸露,杂草分布,盖度接近 20%
柠条林地	株行距 1 m×2 m,平均高度 1.1 m,平均冠幅 0.8 m,长势良好	行间地表裸露,杂草分布,盖度接近 30%
沙柳林地	株行距 2 m×3 m,平均高度 3.6 m,平均冠幅 3.2 m,长势良好	行间地表裸露,杂草稀疏分布,盖度不足 10%

1.3 野外观测

2016 年 4—5 月在各个样地中央位置布设便携式风速梯度仪观测风速,观测高度为 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 350, 450 cm,以裸露沙地为对照点进行标准化处理,绘制各个样地的风速廓线,计算粗糙度;同时记录下垫面沙粒开始运动时梯度风速仪 200 cm 高度的风速,多次测量取其平均值。同步设置平口式集沙仪^[16](30 个集沙口,每个集沙口规格为 2 cm×2 cm)观测地面 60 cm 高度输沙量,集沙时间为 10 min;采样完成后带回室内称重,计算分析各个样地的输沙通量和风沙流结构。

1.4 计算方法

风速标准化公式为:

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处丰宁满族自治县境内,位于河北省北部、承德市西部、内蒙古高原—燕山山地—华北平原过渡带上,北纬 45°54′—42°01′,东经 115°55′—117°23′。地势由东南向西北呈现阶梯型增高,分为坝下山地、接坝山地和坝上高原 3 个地貌单元,平均海拔 1 475 m,坝上地区海拔为 1 200~1 400 m。属于大陆季风型半湿润、半干旱高原山地气候,寒冷干燥;年均气温 6.7 °C,无霜期为 80~140 d,年降水量 350~500 mm,主要集中在 6—9 月,年降水量变化大;风大沙多,全年盛行西风和西北风,年平均风速为 4.5 m/s,最大瞬时风速 34 m/s,春季(3—5 月)平均风速在 5 m/s 以上。土壤呈地带性分布,主要有栗钙土、风沙土、棕壤、褐土,坝上地区以栗钙土为主。境内植物种类丰富,属于暖温带半旱生落叶阔叶林和灌丛草原亚带,但是受人为干扰破坏天然植被稀少。近年来随着退耕还林还草、京津风沙源治理、水源地保护等生态工程的实施,营建大面积人工林,植被覆盖度显著提高。

1.2 试验样地

根据丰宁满族自治县防风固沙林主要模式、植被类型及其生长分布情况,选取地貌条件统一、地形相对平缓、种植年限相同(3 年)的沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)林、柠条(*Caragana korshinskii*.)林、沙柳(*Salix cheilophila*)林布设样地,规格 10 m×10 m,并以裸露沙地为对照。不同类型样地概况见表 1。

$$U'(z) = \frac{U_{\text{对照}}(t_0, z=200)}{U_{\text{对照}}(t, z=200)} \times U(t, z) \quad (1)$$

式中: $U'(z)$ 为任意测点 z 高度的标准化风速(m/s); $U(t, z)$ 为 t 时段 z 高度的风速(m/s); $U_{\text{对照}}(t_0, z=200)$ 为对照点裸露沙地 t_0 时刻 200 cm 高度的风速(m/s); $U_{\text{对照}}(t, z=200)$ 为对照点裸露沙地 t 时刻 200 cm 高度的风速(m/s)。

防风效应计算公式为:

$$E = \frac{U_{\text{对照}} - U}{U_{\text{对照}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E 为某一部位防风效应(%); $U_{\text{对照}}$ 为对照点裸露沙地不同部位平均风速(m/s); U 为人工植被对应部位的平均风速(m/s)。

输沙通量计算公式为:

$$Q_t = \frac{Q}{s \times t} \quad (3)$$

式中: Q_t 为输沙通量 ($g/(cm^2 \cdot min)$); Q 为输沙量 (g); s 为集沙面积 (cm^2); t 为收集持续时间 (min)。

固沙效应计算公式为:

$$E' = \frac{Q_{\text{对照}} - Q_{\text{植被}}}{Q_{\text{对照}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: E' 为人工植被固沙效应 ($\%$); $Q_{\text{对照}}$ 为对照点裸露沙地观测输沙量 (g); $Q_{\text{植被}}$ 为人工植被样地观测输沙量 (g)。

2 结果与分析

2.1 风速廓线与粗糙度

风速廓线能够反映近地面流场的垂直变化特征^[4]。风速标准化订正到同一时间得到不同样地的风速廓线(图 1), 拟合后为指数递增曲线, 表明风速随着高度的增

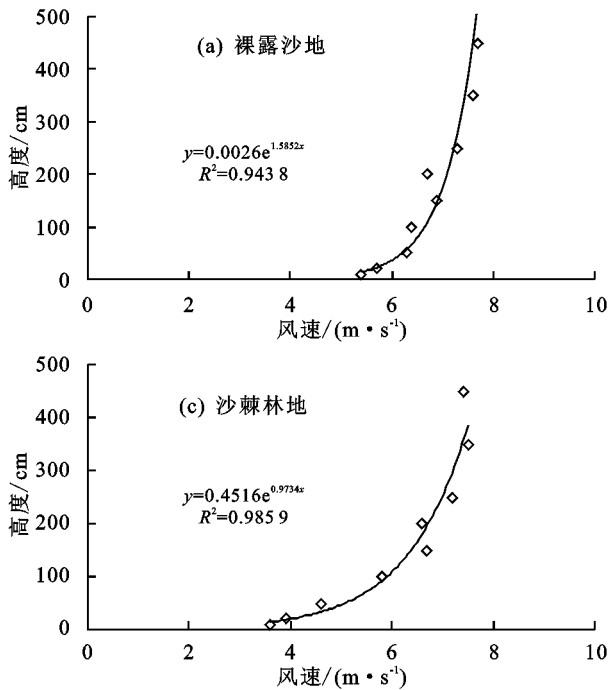


图 1 不同类型样地风速廓线

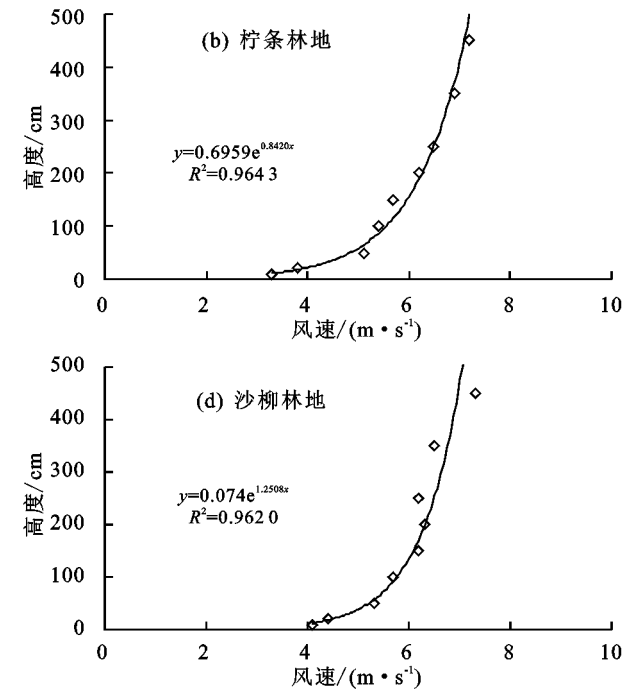
2.2 临界起沙风速与防风效应

临界起沙风速能够比较直观地反映特定风力条件下地表抵抗土壤风蚀的能力, 当风速高于临界起沙风速时土壤发生风蚀^[18]。观测结果显示 3 种人工植被样地 200 cm 的临界起沙风速均高于裸露沙地; 总体来看: 柠条林地 (6.18 m/s) > 沙棘林地 (6.07 m/s) > 沙柳林地 (5.76 m/s) > 裸露沙地 (4.52 m/s), 临界起沙风速分别比裸露沙地提高了 36.7%, 34.3%, 27.4%, 表明 3 种人工植被样地与裸露沙地相比不易发生土壤风蚀。

人工植被对地表风速的削减作用能够有效防治土壤风蚀。由表 2 可知, 0~50 cm 高度防风效应柠条林地 (30.5%) > 沙棘林地 (29.9%) > 沙柳林地 (20.7%), 50~

加而增大。沙棘林地、柠条林地、沙柳林地 3 种人工植被样地各个观测点的风速均低于裸露沙地的风速, 尤其是近地表 50 cm 高度范围内的风速降低明显。人工植被覆盖沙地表面, 气流受到阻挡和削弱, 近地表垂直高度的风速减小, 风速廓线进而发生改变。

粗糙度能够反映下垫面性质, 体现地表对气流的摩擦阻力和风沙活动影响, 粗糙度越大, 对地表风速的削减作用越明显^[17]。根据观测所得风速廓线, 计算近地表风速为 0 时的高度, 得到不同样地的粗糙度。裸露沙地为 0.003 cm, 沙棘林地为 0.452 cm, 柠条林地为 0.696 cm, 沙柳林地为 0.074 cm; 3 种人工植被样地的粗糙度明显高于裸露沙地, 分别是裸露沙地的 150, 232, 25 倍。人工植被的存在相当于地表向上位移一定距离, 使得近地面层的风力梯度增大, 进而增加地表粗糙度。



200 cm 高度防风效应沙棘林地 (13.5%) > 沙柳林地 (9.0%) > 柠条林地 (4.5%), 200~450 cm 高度防风效应沙柳林地 (11.5%) > 沙棘林地 (8.8%) > 柠条林地 (2.2%)。不同植被在不同高度的防风效应存在较大差异, 柠条林地在低层 0~50 cm 的防风效应明显优于中层 50~200 cm 和高层 200~450 cm, 而沙棘林地、沙柳林地的防风效应随着高度增加递减, 防护效果延伸到中层、高层。这与植被本身的高度、冠幅、形态以及地表覆盖等因素有关, 整体上来看防风效应为: 沙棘林地 > 沙柳林地 > 柠条林地。

2.3 输沙量与固沙效应

人工植被对风沙活动的影响取决于其防风作用, 输沙量与风沙流结构能够反映植被的固沙效果。由

表 3 可知,不同类型样地 10 min 的输沙量裸露沙地(28.63 g) > 沙柳林地(4.16 g) > 沙棘林地(2.27 g) > 柠条林地(1.72 g)。人工植被样地的输沙量明显小于裸露沙地,沙棘林地和柠条林地不足裸露沙地的 10%。不同类型样地的输沙通量与输沙量结果分析一致。从风沙流结构来看,裸露沙地的输沙量 90% 以上集中分布在 0~20 cm,并且随着垂直高度的增

加迅速降低,40~60 cm 的输沙量仅为 0.57%;相比之下,3 种人工植被样地的输沙量 90% 以上集中分布在 0~20,20~40 cm,其随着垂直高度的增加而降低的趋势比裸露沙地相对较小。从固沙效应来看,柠条林地(93.99%) > 沙棘林地(92.07%) > 沙柳林地(85.47%)。植被覆盖能够减少输沙量,改变风沙流结构,起到较好的固沙作用。

表 2 不同类型样地风速梯度与防风效应

高度/cm	裸露沙地	沙棘林地		柠条林地		沙柳林地	
	$U/(m \cdot s^{-1})$	$U/(m \cdot s^{-1})$	$E/\%$	$U/(m \cdot s^{-1})$	$E/\%$	$U/(m \cdot s^{-1})$	$E/\%$
0~50	6.96	4.88	29.9	4.84	30.5	5.52	20.7
50~200	8.00	6.92	13.5	7.64	4.5	7.28	9.0
200~450	9.04	8.24	8.8	8.84	2.2	8.00	11.5

表 3 不同类型样地输沙量、风沙流结构及固沙效应

样地类型	200 cm 风速/ $(m \cdot s^{-1})$	输沙量/g	输沙通量/ $(g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1})$	各层输沙量占比/%			固沙 效应/%
				0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	
裸露沙地		28.63	0.0239	93.81	5.62	0.57	0
沙棘林地	8.6~9.4	2.27	0.0019	75.64	17.95	6.41	92.07
柠条林地		1.72	0.0014	88.17	8.94	2.89	93.99
沙柳林地		4.16	0.0035	83.56	10.73	5.71	85.47

3 讨论

3.1 不同人工植被对风速廓线与粗糙度的影响

人工植被使得近地表气流被迫抬升,进而导致风速廓线发生位移,这与植被高度有一定关系。试验样地均为裸露沙地造林,结合表 1 样地概况,沙棘林(平均高度 2.4 m)与沙柳林(平均高度 3.6 m)相对较高,柠条林(平均高度 1.1 m)相对较低,而风速观测范围是 0~450 cm,从图 1 能够较为直观地看出,不同人工植被对风速廓线影响的差异。人工植被可以覆盖地表,增加地表粗糙度,而粗糙度与地表植被盖度呈正相关^[19]。沙棘林、柠条林种植相对紧密,枝叶聚集,行间地表杂草分布且具有一定盖度(沙棘林地接近 20%、柠条林地接近 30%);而沙柳林种植相对稀疏,枝叶松散,行间地表杂草较少(盖度不足 10%);所以沙棘林、柠条林的地表粗糙度高于沙柳林。

3.2 不同人工植被对临界起沙风速与防风效应的影响

临界起沙风速与沙粒粒径、地表性质、地表湿度、植被条件以及起动方式等因素有着密切的关系,临界起沙风速越大表明地表抗土壤风蚀能力越强。人工植被样地的临界起沙风速明显提高,3 种植物对临界起沙风速的影响与其对地表粗糙度的影响具有一致性;这可能是由于沙粒运动贴近地表,而粗糙度能够反映下垫面性质,体现地表对风沙活动影响。柠条林地植株相对较低,整体防风效应不及沙棘林地、沙柳林地,但其盖度较高,在近地表 0~50 cm 的防风效果最佳,能够更好地限制沙粒启动;沙棘林地、沙柳林地植株相对较高,其防护范围也相应增高。另外,观测

季节植被尚处于生长初期,枝叶不够繁茂,其防风效应并未达到最佳。

3.3 不同人工植被对输沙量与固沙效应的影响

风蚀输沙是近地表的沙粒迁移运动,植被覆盖对土壤风蚀输沙量及其垂直分布产生较大影响^[20]。基于 3.1 和 3.2 章节的分析,沙棘林地、柠条林地的盖度较高,尤其柠条林地整体覆盖效果更好,其对沙地下垫面性质的改良也更加明显。柠条林地、沙棘林地的地表粗糙度、临界起沙风速、低层防风效应均比沙柳林地更大,所以柠条林地、沙棘林地比沙柳林地输沙量减少的更多,固沙效应更好。当然风蚀输沙量还受地表风速大小、土壤质地、土壤水分等诸多因素影响,还有待今后进一步研究。

4 结论

冀北坝上地区人工植被能够增加地表粗糙度,改变近地表风场和风沙流结构,降低风速,减少输沙量,起到防风固沙作用,有效防治土壤风蚀。不同人工灌木林地防风蚀效果存在较大差异。从主要观测指标来看,粗糙度和临界起沙风速为柠条林地 > 沙棘林地 > 沙柳林地;防风效应为沙棘林地 > 沙柳林地 > 柠条林地;输沙量和固沙效应为柠条林地 > 沙棘林地 > 沙柳林地。

冀北坝上地区生态环境脆弱、风沙灾害频发,应充分发挥沙棘、柠条、沙柳等林木防风固沙、保持水土的特性,采用生物治沙技术与措施,合理配置人工植被开展生态建设,有效防治土壤风蚀,巩固防沙治沙效果,不断改善生态环境。

- [3] Chirico G B, Preti F, Borga M, et al. Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 19 (19): 932-941.
- [4] 李小曼,王刚,李锐.基于 DEM 的沟缘线和坡脚线提取方法研究[J].水土保持通报,2008,28(1):69-72.
- [5] 徐向舟,张红武,许士国,等.建坝顺序对坝系拦沙效率影响的试验研究[J].北京林业大学学报,2009,31(1):139-144.
- [6] Xu X Z, Zhang H W, Wang W L, et al. Quantitative monitoring of gravity erosion using a novel 3D surface measuring technique: Validation and case study [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(2):1927-1939.
- [7] 赵超,徐向舟,徐飞龙,等.实验地貌的动态观测装置[J].中国水土保持科学,2012,10(1):65-69.
- [8] Caviezel C, Hunziker M, Schaffner M, et al. Soil-vegetation interaction on slopes with bush encroachment in the central Alps - adapting slope stability measurements to shifting process domains [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(4):509-521.
- [9] 陈璟,杨宁.衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复过程中土壤水文效应[J].中国生态农业学报,2013,21(5):590-597.
- [10] 肖培青,姚文艺,李莉,等.植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J].泥沙研究,2013(3):1-5.
- [11] 赵玉娇,李华坦,刘昌义,等.植物根-土复合体剪切试验及其力学模型研究现状与展望[J].中国水土保持,2015(10):51-55.
- [12] 宋庆丰,黄小芸.植被护坡功能分析[J].路基工程,2010(1):104-106.
- [13] Ocakoglu F, Gokceoglu C, Ercanoglu M. Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey [J]. *Geomorphology*, 2002, 42(3):329-341.
- [14] Rengers F K, McGuire L A, Coe J A et al. The influence of vegetation on debris-flow initiation during extreme rainfall in the northern Colorado Front Range [J]. 2016, 44(10):823-826.
- [15] 王晓娅,焦姗.正城滑坡滑带土抗剪强度参数试验研究[J].矿业研究与开发,2018,38(10):47-51.
- [16] 姚成成.土质浅层边坡的草本植物防护加固效应分析[D].成都:成都理工大学,2017.
- [17] 魏丽,单九生,朱星球.植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析[J].气象与减灾研究,2006,29(1):29-33.
- [18] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等.子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系:以富县“7·21”特大暴雨为例[J].生态学报,2016,36(15):4635-4643.
- [19] 杨吉山,姚文艺,马三保,等.黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析[J].水土保持研究,2010,17(6):5-8.

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] 刘正恩.河北坝上生态退化现状、原因及对策措施[J].生态经济,2010(1):166-169.
- [2] 海春兴,付金生,王学萌.气候和人类活动对河北坝上丰宁县土壤风蚀沙化的影响[J].干旱区资源与环境,2003,17(1):69-76.
- [3] 王玫.河北坝上生态脆弱性及治理思路建议[J].经济论坛,2018(10):11-15.
- [4] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,2003.
- [5] 刘红,王卫,郝彦莉,等.基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价[J].水土保持通报,2016,36(2):12-17,349.
- [6] Chen Z, Mcbean E A. Estimation of desertification risk from soil erosion: A case study for Gansu Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2015, 30(8):1-15.
- [7] 王翔宇,原鹏飞,丁国栋,等.不同植被覆盖防治土壤风蚀对比研究[J].水土保持研究,2008,15(5):38-41.
- [8] Jia H, Gang W, Li G, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 153:112-119.
- [9] 尚润阳,祁有祥,赵廷宁,等.植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J].水土保持研究,2006,13(4):37-39.
- [10] 李昂,高天鹏,张鸣,等.西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):120-123.
- [11] 陈娟.荒漠草原人工柠条林防治土壤风蚀效应研究[D].银川:宁夏大学,2014.
- [12] 李玄姝,常春平,王仁德.河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J].中国沙漠,2014,34(1):23-28.
- [13] 杨钦,郭中领,王仁德,等.河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.
- [14] 夏梦婷,马礼.生态建设对坝上土壤风蚀治理的后效及其年际变化:以河北省张家口市康保牧场为例[J].河北师范大学学报(自然科学版),2015,39(3):268-272.
- [15] 梁利红,马礼.生态建设工程对坝上农用地土壤风蚀治理的后效:以河北省张家口市康保牧场为例[J].首都师范大学学报(自然科学版),2014,35(1):80-83.
- [16] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.北京市农田风蚀的野外观测研究[J].中国沙漠,2011,31(2):400-406.
- [17] 康玉梅,王仁德,常春平,等.河北坝上农田时空变化特征对土壤风蚀的影响[J].湖北农业科学,2012,51(23):5301-5306.
- [18] 王翔宇,赵名彦,丁国栋,等.天然灌草植被防治土壤风蚀机理[J].水土保持通报,2008,28(5):55-59.
- [19] 刘文剑,张会兰,王玉杰,等.模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):1-7.
- [20] 邢恩德,马少薇,郭建英,等.植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J].水土保持研究,2015,22(6):331-334.