

# 卡拉贝利工程区植物的防风蚀效果

张鹏, 尹忠东, 尚河英

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 研究新疆卡拉贝利工程区植物防风固沙效果, 为该地区的风沙治理措施提供理论依据, [方法] 对该地区的植被进行了防风蚀效果的调查研究, 主要收集了植被的盖度、冠幅、高度等植被特征和植被积沙特征的数据, 采用 SPSS 等统计软件进行数据的统计分析, 并利用曲线估计的方法建立植物形态与积沙量的回归模型, 量化分析植物形态特征与植物积沙的关系。[结果] 该地区植被以盐爪爪为主, 并伴有少量骆驼刺、假木贼等植物; 不同砾石覆盖度对植被的密度和盖度影响较大, 对植物的高度、冠幅影响较小, 且砾石覆盖度越高植被密度和盖度越低; 植物积沙量、植物积沙丘的厚度与宽度均随着植物高度和冠幅的增加而呈指数增加; 植物形态对积沙量增加的影响程度表现为: 植物高度 > 纵向冠幅 > 横向冠幅。[结论] 该地区植被具有一定的防风蚀能力, 其防风蚀效果的大小与植被的形态以及地表砾石含量存在很大的关系。

**关键词:** 植物; 风蚀; 积沙量; 曲线估计; 植物形态; 砾石覆盖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0224-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 张鹏, 尹忠东, 尚河英. 卡拉贝利工程区植物的防风蚀效果[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 224-229. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.040

## Anti-wind Erosion Effect of Plants in Kara Bailey Project Area

ZHANG Peng, YIN Zhongdong, SHANG Heying

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to analyze the anti-erosion effect of vegetation and provide the theoretical basis for sand control measures in Kara Bailey project area of Xinjiang Wei Autonomous Region. [Methods] Plants in the study area were investigated, and the data of vegetation cover, crown width, height and characteristics of sand accumulated by plants were collected. The SPSS software was employed for statistical analysis, and regression curves were used to establish the model to quantitatively analyze the relationship between plant morphological characteristics and sand accumulation. [Results] The study area was dominated by *Kalidium foliatum*, and there were some other plants such as *Alhagi sparsifolia*, *Anabasis elatior*. (2) The effect of gravel cover on vegetation density and coverage was more significant than that on plant height and crown width, and vegetation density and coverage decreased with the increase of the gravel coverage. (3) With the increase of plant height and width, the sand accumulation increased exponentially. (4) The influence of sand accumulation on plant morphology showed as: plant height > longitudinal crown > lateral crown. [Conclusion] Vegetation in the study area has an anti-erosion effect, and this effect is influenced by vegetation morphology and surface gravel cover.

**Keywords:** plants; wind erosion; sand accumulation; curve estimation; plants morphology; gravel covered

风障与土壤风蚀的关系, 一直风沙动力学的研究热点和难点, 植物风障作为环保有效的沙障措施已经成为防蚀措施的研究重点。防沙治沙工作以植物措施为主, 工程固沙和生物固沙技术相结合, 可以达到

标本兼治的目的<sup>[1-3]</sup>。地表植被可以通过覆盖部分保护表面、分解风力以及阻挡输沙等多种途径对风蚀过程造成影响<sup>[4]</sup>。因此, 植被的种类、盖度、形态、和组合方式的不同, 会产生不同的防风固沙效果。近年来

关于植物措施防沙效益的研究中,多以植被根系与风蚀的关系的研究为主,如草本植物根系网固土原理的力学试验探究<sup>[5]</sup>,乔木侧根对土体的斜向牵引效应的研究<sup>[6]</sup>,以及根系固坡效果和机理的研究等<sup>[7-8]</sup>。但是根系埋在土壤当中,研究存在取样难度高,工作量大等特点,而且根系特征受土壤的影响比较复杂<sup>[9-13]</sup>,结论不明确。也有研究表明,植被盖度 < 20% 时,风蚀灾害较为严重<sup>[14]</sup>。而关于植被覆盖与风蚀的研究,也主要集中在植被覆盖较大的区域,而对植被覆盖度小的地区研究相对较少<sup>[15]</sup>,因此稀少植被地区植物固沙效果有待进一步探讨。卡拉贝利工程区属于干旱戈壁区,由于降雨量少、风力大的特点,使得该地区的风蚀尤为严重,而该地区常见的植物的植被盖度小于 20%,因此植被的形态对植物的防蚀固土效果影响最大<sup>[16-17]</sup>,应把该地区植被形态与植被固土的关系作为研究的重点。同时,由于该地区砾石含量比较高且分布不均匀,形成了不同砾石覆盖度的表面,而不同砾石覆盖度对植物的防风固沙效果产生很大的影响<sup>[18-19]</sup>,对该地区不同砾石覆盖的地表进行植被形态与固土关系的研究,可以为该地区植物的防蚀效益和工程措施防沙的布设提供理论依据。

## 1 研究区概况

本研究选取卡拉贝利水利枢纽工程区作为研究地点,该工程区位于新疆维吾尔自治区克孜河流域,上距乌恰县城 70 km,下距喀什市 165 km、阿图什市 204 km,地理坐标为东经 75°10'50",北纬 39°32'33",平均海拔 1 847.0 m。卡拉贝利地处天山与西昆仑山交汇地带的中山地区,属于温带干旱气候区,年平均气温 7.3 °C,极端最高气温 34.7 °C,极端最低气温 -29.9 °C。年平均降水量 120 mm,最大日降水 34 mm (1988 年 8 月 9 日),年平均蒸发量 3 306.91 mm,降雨和蒸发量主要集中在 4—9 月。该地区土壤为棕漠土,有机质含量在 10 g/kg 以下,工程区河谷两岸基岩裸露,地表为洪积碎石、沙土等,下部含砂砾石,表土质地为粉土,有大量砾石裸露或覆盖,未破坏部分已结皮不易发生风蚀。工程区内植被稀少,主要生长盐爪爪、骆驼刺、无叶假木贼等旱生植物,植被盖度 < 20%。多年平均风速 1.9 m/s,12 月最小,多年平均为 0.9 m/s,6 月最大,多年平均为 2.9 m/s。大风一般从 3 月开始,其中大风天气主要发生在 5—7 月,多为西北风。卡拉贝利水利枢纽工程是以防洪、灌溉为主兼顾发电的山区控制性水利工程,2010 年 8 月 10 日开始兴建,工程建设区建设过程会出现大量

的土石开挖与堆砌等破坏原地貌情况,易造成强烈的风蚀危害,应做好土壤防蚀措施。

## 2 研究方法

### 2.1 研究对象选择

根据卡拉贝利工程区地貌情况可知,该地区地表土质表面和砾石表面植物的固土效果存在差异,因此分别把地表砾石覆盖度 < 20% (土质表面)、砾石覆盖度 20%~60% (土石混合表面) 砾石覆盖度 > 60% (石质表面) 的 3 种地表类型进行研究,并选择工程区常见的旱生植物盐爪爪作为研究对象,利用皮尺和罗盘,在每种地表类型中分别设置 1 个 50 m × 50 m 样地,并在每个样地中沿对角线等间距设置 3 个 5 m × 5 m 样方,记录样方中植被的种类、株数和植被生长状况,并用钢卷尺测量每株植物的高度、主风向和垂直主风向的植物冠幅,同时测量每株植物积沙丘的平均厚度、主风向和垂直风向的宽度,由于植物的积沙主要沿植物的东南方向分布,符合该地区的年主风向,因此对植物的冠幅和植被积沙丘进行西北—东南方向和西南—东北方向的测量,并分别作为主风向 (以下简称:纵向) 和垂直风向 (以下简称:横向) 的测量数据。

### 2.2 数据分析模型的建立

有研究表明,根茎及其一级不定根在固定沙的体积上发挥重要作用<sup>[16]</sup>,该地区植物着生在地上茎基部节上的根茎以基部节为球心辐射状分布成半球形,很多研究采用半球球体计算植物积沙量<sup>[20-22]</sup>,由于研究过程中样地的设置避免了局地性,因此研究区域内植物积累的土沙性质可视为一致,故可以把植物积累的沙丘体积 (积沙量) 作为植物积沙效果指标进行对比分析,本文将植物的积沙丘看作半球球体进行计算,计算公式如下:

$$V = \frac{4\pi ab^2}{3} \quad (1)$$

式中:  $V$ ——植物积沙丘的体积 ( $\text{cm}^3$ );  $a, b, c$ ——植物积沙丘纵向宽度、横向的宽度和厚度 ( $\text{cm}$ )。

根据植被状况测量数据,利用如下公式 (2),分析 3 种地表类型植被生长的差异度:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^3 |X_{ij} - X_i|}{X_i} \quad (2)$$

式中:  $D_i$ ——第  $i$  项植物形态指标的差异度,其中  $i$  取值 1~5;  $D_1$ — $D_5$ ——植被密度 (株/ $\text{m}^2$ )、高度 ( $\text{cm}$ )、纵向冠幅 ( $\text{cm}$ )、横向冠幅 ( $\text{cm}$ )、植被盖度 (%) 的差异度;  $X_{ij}$ ——第  $i$  项形态指标的第  $j$  种地表类

型,  $j$  取值 1~3, 依次表示砾石表面、土质表面、土石混合表面;  $X_i$ ——3 种地表类型第  $i$  类形态指标的平均值, 取值 1~5,  $X_1$ — $X_5$ ——植被密度(株/m<sup>2</sup>)、高度(cm)、纵向冠幅(cm)、横向冠幅(cm)、植被盖度(%)的平均值。

为更好分析植物形态的变化对积沙量的影响, 将对数模型公式求反函数, 并利用如下公式(3), 分析植物形态对积沙量影响的大小:

$$W_{tr} = \frac{W_{tr}}{\sum_{r=1}^3 W_{tr}} \quad (3)$$

式中:  $W_{tr}$ ——第  $t$  种地表类型, 第  $r$  项植物形态的对积沙量的影响权重系数, 其中  $t$  取值 1~3, 依次表示砾石、土质、土石混合的地表类型, 取值 1~3, 依次表示植物高度、纵向冠幅、横向冠幅。

植物具有阻沙和固沙的作用, 植物的积沙量与植物高度和冠幅具有紧密的联系, 由于植物的积累的沙尘分布主要位于植物的东南方向, 因此分别对东南—西北(纵向)、东北—西南(横向)方向的冠幅和沙丘长宽高进行测量。利用 Office2013 和 SPSS18.0 等软件对测量的野外数据进行筛选和统计, 并把积沙量作为因变量, 植物高度、纵向冠幅、横向冠幅作为自变量, 采用曲线估计的方法对植物形态(冠幅和高度)与植物积沙量进行回归分析, 对比线性、对数、指数、多项式等回归模型的拟合系数和显著度来判定拟合效果, 选择合适的模型进行模拟, 得出相应的拟合方程, 从而分析植物形态特征与积沙效果的参数关系。

## 3 结果与讨论

### 3.1 样地植被形态特征分析

根据野外调查的结果可知, 卡拉贝利工程区主要植物为盐爪爪, 也存在少量骆驼刺、假木贼等植物, 由于水分较少导致植被长势较差, 生长多处于干枯、半干枯状态, 冠幅形态与透风情况类似, 因此对该地区植被进行统一的植被形态与积沙量关系的分析。该地区植物平均高度 14.5 cm, 主风向平均冠幅 27.3 cm, 垂直主风向平均冠幅相对较大, 为 28.7 cm, 平均密度 0.7 株/m<sup>2</sup>, 地区平均植被盖度为 4.1%。从表 1 可看出, 植株密度和盖度大小都表现为土质表面>土石混合表面>石质表面, 密度分别为 0.9, 0.8, 0.4 株/m<sup>2</sup>, 盖度分别为 5.2%, 4.8%, 2.3%。不同地表类型植物平均高度差异较小, 高度差异 0.6cm, 平均冠幅以土石混合表面较大(纵向 29.0 cm, 横向 30.8 cm), 砾石表面和土质表面平均冠幅相对较小且接近(纵向 26.5 cm 左右, 横向 27.6 cm 左右)。根据式 2 计算的差异度( $D_i$ )可知, 3

种地表类型植被的植被密度和植被盖度差异较大, 差异度分别为 86.2%和 78.8%, 植物的高度和冠幅差异度较小( $D_i < 15\%$ )。这种结果主要是由于砾石覆盖影响了区域水分的分布, 从而影响着植物的生长发育, 同时砾石覆盖度高的地表土壤较少, 有机质和养分较少, 也会制约着植物的生长。综合调查结果来看, 砾石覆盖对植物的长势影响较小, 主要影响植被的密度, 从而对植被的盖度也存在较大的影响, 而且砾石覆盖度越大植被盖度和密度越低。

表 1 不同地表类型植被情况

地表类型	植物密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	平均 高度/cm	纵向平均 冠幅/cm	横向平均 冠幅/cm	植物 盖度/%
砾石表面	0.4	14.6	26.4	27.5	2.3
土质表面	0.9	14.7	26.5	27.7	5.2
土石混合表面	0.8	14.1	29.0	30.8	4.8
$D_i/\%$	85.7	5.1	9.2	14.9	87.8

注:  $D_i$  为 3 种地表不同植物指标的差异程度(%);  $i$  取值植被密度(株/m<sup>2</sup>)、高度(cm)、纵向冠幅(cm)、横向冠幅(cm)、植被盖度(%)。

### 3.2 植被形态与积沙丘的空间特征

结合调查数据可知, 随着植物高度和冠幅的增加, 植物积沙厚度与宽度也随之增加。该地区植物总体积沙的平均厚度为 1.4 cm, 不同地表的植物积沙厚度表现为土石混合表面(1.7 cm)>土质表面(1.6 cm)>砾石表面(1.0 cm), 植物的纵向平均积沙宽度为 17.6 cm, 横向平均积沙宽度为 15.1 cm, 平均积沙量为 1 023.4 cm<sup>3</sup>(表 2)。

表 2 不同地表的植被积沙情况

地表类型	平均 厚度/cm	纵向平均 宽度/cm	横向平均 宽度/cm	平均积沙 量/cm <sup>3</sup>
砾石表面	1.0	15.7	12.3	382.4
土质表面	1.6	21.4	14.2	1 116.8
土石混合表面	1.7	15.7	18.7	1 570.2
$D_i/\%$	62.8	43.0	14.9	125.2

注:  $D_i$  为 3 种地表不同积沙丘指标的差异程度(%);  $i$  取值沙丘平均厚度(cm)、纵向平均宽度(cm)、横向平均宽度(cm)、植物平均积沙量(cm<sup>3</sup>)

由表 1 中植物形态特征可知, 同一类型地表植物冠幅的大小表现为, 横向平均冠幅>纵向平均冠幅, 而植物积沙宽度却是纵向大于横向, 因此可知植物的纵向积沙作用相对较大。3 种不同类型地表的植物平均高度较为接近, 差异度只有 5.1%, 而不同地表植物的积沙厚度差异较大, 差异度达 62.8%, 差异度之差为 57.1%, 由此可见, 砾石覆盖对地表植物积沙

厚度的影响较大,砾石覆盖度大的地表植物积沙厚度相对较小。从植物的积沙量来看,单株植物平均积沙量表现为,土石混合地表(1 570.2 cm<sup>3</sup>)>土质地表(1 116.8 cm<sup>3</sup>)>砾石表面(382.4 cm<sup>3</sup>),其差异度达 125.2%,可以看出不同地表的植物积沙差异比较显著。这种差异除了是因为植物自身形态区别外,也可以是因为不同下垫面抗蚀能力的不同所引起的,因为 3 种类型地表砾石覆盖度不一样,而砾石覆盖度的不同使得地表抗风蚀效果存在差异<sup>[23-24]</sup>,因此植物积沙效果存在的差异不排除是由砾石覆盖度不同引起的。

### 3.3 植物的形态特征与积沙量的关系

3.3.1 不同参数拟合模型对比分析 利用 SPSS 18.0 软件,将植物的积沙量作为自变量,植物的高度、纵向和横向冠幅作为因变量进行回归分析,得出线性、对数、指数、多项式等回归模型,其模型的拟合优度(或称判定系数  $R^2$ )如表 3 所示。由表可知,对数回归模型的拟合系数  $R^2$  都大于 0.54,并且  $R^2$  多数大于 0.64,其显著度 sig 值为 0,拟合程度较高,线性回归模型和指数模型判定系数  $R^2$  多小于 0.5,拟合程度较小,多项式回归模型虽然拟合程度相对较高,但是其拟合曲线先增后减,而实际情况则是随着植被高度和冠幅的增加植被的积沙量增加,为增函数的关系,因此多项式回归模型与实际不符合,故将其排除,所以研究选择对数模型进行分析。若把植被形态作为自变量,植物积沙量作为因变量,即对对数函数求反函数,则植被形态与积沙量的关系表现为:随着植被冠幅和高度的增加植物的积沙量呈指数增加。

表 3 植物形态与积沙量的拟合模型判定系数  $R^2$

地表类型		指数 回归 $R^2$	线性 回归 $R^2$	对数 回归 $R^2$	多项式 回归 $R^2$
土质表面	植物高度	0.18	0.29	0.54	0.54
	纵向冠幅	0.30	0.50	0.71	0.58
	横向冠幅	0.28	0.50	0.79	0.69
土石混合 表面	植物高度	0.39	0.47	0.64	0.62
	纵向冠幅	0.52	0.66	0.76	0.78
	横向冠幅	0.52	0.62	0.81	0.74
砾石表面	植物高度	0.45	0.60	0.65	0.71
	纵向冠幅	0.58	0.71	0.81	0.83
	横向冠幅	0.53	0.62	0.81	0.80

注: $R^2$  为拟合模型的拟合优度,或称判定系数,取值 0~1,拟合优度越大,自变量对因变量的解释程度越高,模型越准确。

3.3.2 植物形态特征与积沙量的对数模型关系 根据植物形态与积沙量的散点图(图 1—3)可知,随着积沙量的增加,不同地表类型植物的高度和冠幅的增量都表现为,横向冠幅>纵向冠幅>植物高度,即植物形态对积沙量增加的影响程度表现为植物高度>

纵向冠幅>横向冠幅。结合图中趋势线的拐点可以看出,砾石和土石混合表面的植物冠幅在 30 cm 以下,植物高度在 10 cm 以下时对积沙量的影响较小,其变化小于 100 cm<sup>3</sup>,土质表面的植物在 35 cm 以下,植物高度在 15 cm 以下时,对积沙量影响较小,其变化小于 100 cm<sup>3</sup>。因此该地区植物的高度和冠幅分别在 15 和 35 cm 以上时,积沙作用显著。

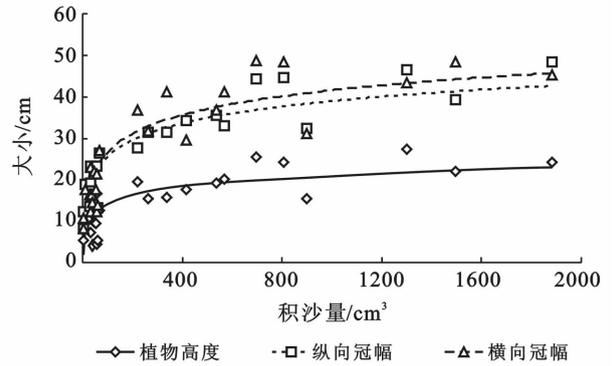


图 1 砾石地表植物形态特征与积沙量的关系

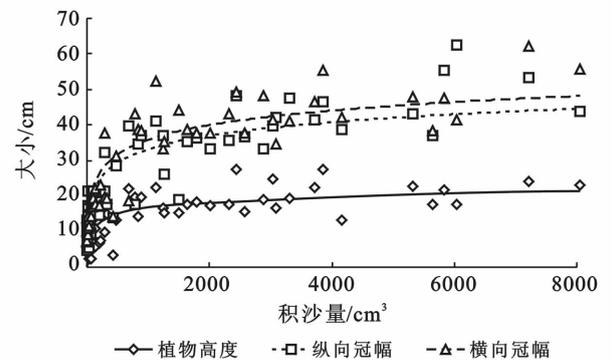


图 2 土石混合地表植物形态特征与积沙量的关系

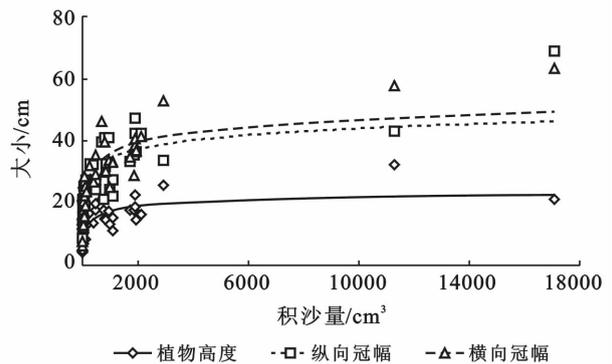


图 3 土质地表植物形态特征与积沙量的关系

为进一步分析植物形态对积沙量影响的大小,将对数模型公式求反函数(表 4),把中  $y$  的系数作为影响指标,结合式 3 计算权重系数,进而量化分析植物形态与积沙量的关系。结果表明:随着砾石覆盖度的增加,植物形态与积沙量模型中  $y$  的系数随之减小,高度—积沙量模型中土质表面、土石混合表面、砾石

表面  $y$  的系数分别为 0.58, 0.42, 0.33; 纵向冠幅—积沙量模型中土质表面、土石混合表面、砾石表面  $y$  的系数分别为 0.24, 0.18, 0.17; 横向冠幅—积沙量模型中土质表面、土石混合表面、砾石表面  $y$  的系数分别为 0.21, 0.17, 0.15。不同地表类型植物形态各项指标与积沙量模型中  $y$  的系数和表现为, 土质表面 (1.04) > 土石混合表面 (0.77) > 石质表面 (0.66)。由于不同地表的植被形态不尽相同, 因此虽然不同砾石覆盖地表植物的平均积沙量表现为土石混合表面 > 土质表面 > 砾石表面, 但是在同样植被形态条件下, 生长在土质表面的植物积沙效果最好, 土石混合

地表次之, 石质表面植物积沙能力最弱, 而砾石覆盖不同的地表会产生不同的抗风蚀效果, 因此随着砾石覆盖度的增加植物的积沙能力是否呈递减趋势应进一步探讨。

同一种地表类型植物形态对积沙量的影响表现为: 植物高度 > 纵向冠幅 > 横向冠幅, 植物高度对积沙量的影响权重系数为 0.51~0.57, 植物的纵向冠幅对积沙量的影响权重系数为 0.23~0.26, 植物横向冠幅对积沙量的影响权重系数为 0.20~0.23, 可知, 植物冠幅对积沙量的影响较为接近, 而植物高度对积沙量的影响是植物冠幅的 2 倍左右。

表 4 植物形态与积沙量的对数拟合模型

地表类型		拟合方程	显著程度 sig	反函数	权重系数
土质表面	植物高度	$y=1.70 \ln(x)+6.00$	0.00	$x=e^{0.58y-3.53}$	0.57
	纵向冠幅	$y=4.17 \ln(x)+5.64$	0.00	$x=e^{0.24y-1.35}$	0.23
	横向冠幅	$y=4.71 \ln(x)+3.50$	0.00	$x=e^{0.21y-0.74}$	0.20
土石混合表面	植物高度	$y=2.39 \ln(x)+0.02$	0.00	$x=e^{0.42y-0.01}$	0.54
	纵向冠幅	$y=5.46 \ln(x)-4.52$	0.00	$x=e^{0.18y+0.74}$	0.24
	横向冠幅	$y=5.90 \ln(x)-4.87$	0.00	$x=e^{0.17y+0.83}$	0.22
砾石表面	植物高度	$y=2.99 \ln(x)+0.36$	0.00	$x=e^{0.33y-0.12}$	0.51
	纵向冠幅	$y=5.81 \ln(x)-1.17$	0.00	$x=e^{0.17y+0.20}$	0.26
	横向冠幅	$y=6.52 \ln(x)-3.48$	0.00	$x=e^{0.15y+0.53}$	0.23

注:  $y$  为植物形态, 分别为植物高度、纵向冠幅、横向冠幅的大小 (cm);  $x$  为植物积沙量 ( $\text{cm}^3$ ); sig 为模型模拟的显著性, 如果  $\text{sig} < 0.05$ , 代表方程有意义。

## 4 结论

(1) 卡拉贝利工程区植物以盐爪爪为主, 存在少量骆驼刺、假木贼等植物, 生长状况较差。调查区域植物的盖度、高度、密度的平均值分别为 4.1%, 14.5 cm, 0.7 株/ $\text{m}^2$ , 主风向平均冠幅 27.3 cm, 垂直主风向平均冠幅为 28.7 cm。

(2) 不同砾石覆盖度主要影响植被的密度和盖度, 砾石覆盖度越高植被密度越低。土质、土石混合、砾石表面地表植被密度和盖度差异较大, 其差异度 > 85%, 而 3 种地表植物的平均高度、冠幅差异较小, 其差异度 < 15%。

(3) 随着植物的冠幅和高度的增加, 植物的积沙量呈指数增加, 该地区植物积沙丘的厚度、主风向宽度、垂直主风向宽度和体积的平均值分别为 1.4, 17.6, 15.1 cm, 1 023.4  $\text{cm}^3$ , 且该地区植物的高度和冠幅分别在 15 和 35 cm 以上时, 积沙效果显著。

(4) 植物形态对积沙量增加的影响程度表现为: 植物高度 > 纵向冠幅 > 横向冠幅, 同样植被形态条件下, 生长在砾石表面的植物积沙效果最好, 土石混合地表次之, 土质表面植物积沙能力最弱。

(5) 该地区的植被具有一定的防风蚀效果, 而其防风蚀效果的大小与植被的形态以及地表砾石含量存在很大的关系。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Han Zhiwen, Wang Tao, Dong Zhibao, et al. Mainengineering measurements and mechanism of blown sand hazard control[J]. Progress in Geography, 2004, 23(1): 13-21.
- [2] Chepil W S, Woodruff N P, Siddoway F H, et al. Vegetative and no vegetative materials to control wind and water erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(1): 86-89.
- [3] Siddoway F H, Chepil W S, Armbrust D V. Effect of kind amount and placement of residue on wind erosion control[J]. Transactions of the Asae. 1965, 8(3): 327-331.
- [4] 马士龙. 植被覆盖对土壤风蚀影响机理的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [5] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [6] 周跃, 徐强, 骆华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应(II): 野外直测[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 10-15.

- [7] 野久田稔,李晓华.由根系抗拉强度推算其固坡效果[J].水土保持科技情报,1997(1):25-28.
- [8] 李铁军,李晓华.植被固坡机制的研究[J].水土保持科技情报,2004(2):1-3.
- [9] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008:106-134.
- [10] 杨璞.根土复合体极限载荷的数值计算方法和试验研究[D].北京:清华大学,2008:62-100.
- [11] 周云艳.植物根系固土机理与护坡技术研究[D].武汉:中国地质大学,2010:40-59.
- [12] 张超波.林木根系固土护坡力学基础研究[D].北京:北京林业大学,2011:69-88.
- [13] 及金楠.林分根系空间分布与水平阶整地对土质坡面稳定性的影响[D].北京:北京林业大学,2011:51-68.
- [14] 赵彩霞,郑大玮,何文清.植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应[J].植物生态学报,2005,29(1):68-73.
- [15] 黄富祥,牛海山,王明星,等.毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J].地理学报,2001,56(6):700-710.
- [16] Van de Ven T A M, Fryrear D W, Spaan W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989,44(4):347-349.
- [17] 王树力,刘玉山.赤峰市流动沙地植物沙障治理模式的研究[J].水土保持学报,2005,19(4):144-147.
- [18] 杨朝东,张霞,万勇,等.荻草根系统扩展能力和固土作用的研究[J].长江大学学报,2009,6(3):19-23.
- [19] 董治宝,高尚玉, Fryrear D W.直立植物:砾石覆盖组合措施的防风蚀作用[J].水土保持学报,2000,14(1):7-11.
- [20] 武胜利.新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [21] 李金伟,李志忠,武胜利,等.新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J].中国沙漠,2009,29(4):628-635.
- [22] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的试验研究(I)[J].中国沙漠,2007,27(1):9-14.
- [23] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.砾石覆盖对抑制旱作农田土壤风蚀效果的风洞模拟[J].农业工程学报,2010,26(11):151-155.
- [24] 王训明,郎丽丽,花婷,等.戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系试验研究[J].中国沙漠,2013,33(2):313-319.

(上接第 223 页)

- [7] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等.太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机:原因与对策[J].地球科学进展,2007,22(9):896-906.
- [8] 孔繁翔,马荣华,高俊峰,等.太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J].湖泊科学,2009,21(3):314-328.
- [9] 刘小峰,盛昭瀚,金帅.基于适应性管理的水污染控制体系构建:以太湖流域为例[J].中国人口·资源与环境,2011,21(2):73-78.
- [10] 张晓晴,陈求稳.太湖水质时空特性及其与蓝藻水华的关系[J].湖泊科学,2011,23(3):339-347.
- [11] 尹荣尧,周燕,朱晓东.江苏省太湖水污染防治对策措施[J].环境保护科学,2010,36(3):93-95.
- [12] 王艳艳,孙勇,赵言文.江苏省太湖流域农业面源污染现状分析及防治措施[J].江西农业学报,2008,20(8):118-121.
- [13] 冯丽娟,封莉,孙德智,等.防护林植被体系对面源污染物氮磷的去除作用[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2011,26(5):548-550.
- [14] 吴殿鸣,薛建辉,吴永波.生态防护林减轻农田氮素面源污染的研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(6):134-138.
- [15] 牛勇,余辉,张敏,等.太湖流域典型土地利用方式下入湖河流水质污染特征研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):205-211.
- [16] 中华人民共和国林业部科技司.林业标准汇编(3)[M].北京:中国林业出版社,1991.
- [17] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].土壤学报,2011,47(4):611-620.
- [18] 文璐,刘晶岚,习妍,等.北京地区重要古树土壤物理性状分析[J].水土保持研究,2011,18(5):175-178.
- [19] Jenkinson D S, Andrew S P S, Lynch J M, et al. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1990,329(1255):361-368.
- [20] 罗利芳,张科利,符素华.径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J].水土保持通报,2002,22(3):58-61.
- [21] 薛建辉,阮宏华,刘金根,等.太湖流域水岸生态防护林体系建设技术与对策[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(5):13-18.
- [22] 李泽波,张建锋,陈光才,等.安吉赋石水库板栗林地地表径流污染物特征研究[J].水土保持学报,2013,27(3):90-94.
- [23] 柏方敏,田大伦,方晰,等.洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征[J].生态学报,2010,30(21):5832-5842.