

基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析

孙玉柱^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}, 张姣^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 三维激光扫描技术(LIDAR)和地理信息系统(GIS)技术的综合应用是土壤侵蚀定量研究的重要手段, 结合 LIDAR 和 GIS 技术, 将 LIDAR 动态监测的连续 4 场次模拟降雨实验数据导入 GIS 数据处理软件并生成 DEM, 采用断面分析方法, 提取坡长方向上单位长度侵蚀沟断面的宽度和深度, 分析坡面侵蚀沟发育特征。结果表明, 坡面 3.5 ~ 5.5 m 坡长处是沟蚀发育最为活跃的区段, 且随着降雨过程的进行, 沟蚀发育活跃区向坡面上部移动。侵蚀沟发育早期以溯源侵蚀为主, 后期以沟壁侧蚀和崩塌为主。断面分析方法能够比较准确地分析坡面沟蚀发育的时空分布特征, 为土壤侵蚀的定量研究提供了一种新的研究方法。

关键词: LIDAR; GIS; 沟蚀; 断面分析

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)03-0020-05

Analysis of Gully Erosion Development Based on LIDAR and GIS

SUN Yu-zhu^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}, ZHANG Jiao^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The combination of LIDAR and GIS is an important method in the quantitative research of slope-gully erosion of hill. In this study, the gully can be regarded as a composition of numerous sections, the variation characteristics of a plurality of continuous sections reflect the gully erosion development characteristics. Based on the soil loss data collected from 4 events of individual rainfall experiments measured by LIDAR, we used the GIS desktop software to turn the data to DEM, and then extract the width and length by cross-section analysis. The results showed that the position of 3.5 m to 5.5 m was the most active gully erosion site and the key position moved up as the rainfalls went on; the headwater erosion occurred in the early and medium term of the erosion, the collapse and erosion of the gully cliff were the main process. Cross-section analysis is an effective method to study the temporal and spatial patterns of gully erosion development, and provides a new way on the quantitative research of soil erosion.

Key words: LIDAR; GIS; gully erosion; cross-section analysis

黄土高原丘陵沟壑区侵蚀沟的分布面积可占沟间地面积的 70% 左右^[1], 由于其对坡耕地的切割, 对土地资源造成了极大的破坏。因此, 定量研究沟蚀的发生发展规律, 对土壤侵蚀防治具有重要意义。LIDAR 技术是近年来新兴的测量技术, 由于其具有精度高、无接触、采集空间点密度大、速度快等优点^[2-7], 目前该技术已在土壤侵蚀研究中有新的尝试和成果。余叔同等^[3]用三维激光扫描仪和 GIS 结合的方式研

究了坡面浅沟的发育模型, 张姣等^[4]采用三维激光扫描仪动态监测了沟蚀的发育过程。LIDAR 与 GIS 结合应用中, 数字高程模型 (DEM) 起到了桥梁的作用。土壤侵蚀领域中 DEM 的作用主要是从中提取各种地形要素和建立各种地形剖面^[8]。以往的研究中, LIDAR 技术和 GIS 结合应用的研究内容主要有: (1) 基础量算。利用 GIS 软件的体积量算、表面积量算、距离量算和面积量算等功能对转化后的

收稿日期: 2013-05-29

修回日期: 2013-10-31

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41271299, 40871137)

作者简介: 孙玉柱 (1982—) 男, 河北深州人, 硕士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: sun_yu_zhu@163.com

通信作者: 郑粉莉 (1960—), 女, 陕西蓝田人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理及模拟研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

DEM 进行量算。如通过体积运算进而计算侵蚀量^[2-4,7]; (2) 三维分析。将 DEM 或提取的等高线生成三维模型, 进行三维分析^[4-5]; (3) 特征提取。根据 DEM 的栅格值进行沟形态提取^[7]。本研究采用 GIS 数据处理软件的剖面图功能, 提取坡面单位长度侵蚀沟横断面, 并分析每一个断面的侵蚀沟宽度和深度等, 分析侵蚀沟发育特征, 为研究侵蚀沟防治提供科学依据。

1 数据获取与处理

1.1 数据获取

本研究数据来源于课题组 2010 年基于三维激光扫描技术(LIDAR)动态监测的沟蚀发育数据。试验在水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行。试验实体模型尺寸为试验土槽长 8 m, 宽 3 m, 深 0.6 m, 坡度 20°; 实验用土为安塞县的黄绵土, 耕层(上层)土壤容重为 1.1 g/cm³, 犁底层(下层)土壤容重为 1.25 g/cm³; 采用 100 mm/h 的降雨强度进行连续四场次的降雨试验, 降雨历时依据沟蚀发育阶段而定, 约为 30~70 min。为了保持细沟的连续发育, 模拟降雨实验为每周进行一次, 连续进行四周, 直至沟蚀发育充分, 判断沟蚀发育充分的标准是以试验土槽沿坡长方向 70% 以上的侵蚀沟沟槽下切至底部沙层时为准。数据采集方法为每场降雨前和降雨后, 采用 Leica Scanstation 2 三维激光扫描仪进行数据采集, 仪器距离试验土槽 2~3 m, 采样密度 1 mm。内业处理方式为采用三维激光扫描仪自带软件 Cyclone 软件进行去噪、拼接、坐标转换等处理, 形成点云, 最后以 dxf 格式导入 SuperMap Deskpro 中进行分析。

1.2 数据处理

SuperMap Deskpro 是一款专业的 GIS 数据处理软件, 能够完成多源数据导入, 数据管理、数据编辑、空间分析、制图输出等功能。本次数据处理过程如图 1 所示。

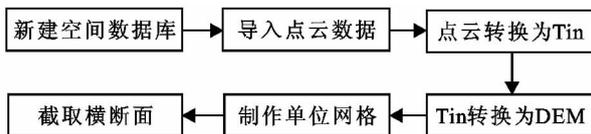


图 1 数据处理过程

新建基于 SQL Server 2005 的空间数据库, 并将 4 期 dxf 格式的点云数据导入数据库。导入后, 首先将点云以深度值作为高程转换成 TIN, 然后由 TIN 转化成分辨率是 1 mm 的高精度 DEM。

为了准确地获取沿坡长方向单位长度的侵蚀沟横断面, 需要借助于辅助网格。辅助网格的外部轮廓

须与 DEM 的外接矩形吻合, 并以单位长度分割。截取横断面时, 沿辅助网格的分割线截取即可。基于本次试验的测量数据, 单位长度取 0.5 m 能够比较准确地体现侵蚀沟的变化特征。SuperMap Deskpro 提供了网格制作工具, 可以制作网格, 设置界面如图 2 所示。在网格工具中设定最小 X, 最大 X, 最小 Y, 最大 Y, 单元格的高度和宽度 6 个参数, 以及输出位置。X, Y 坐标设置控制网格的边界与 DEM 外接矩形一致, 单元格的高度和宽度控制格子的大小, 由于坡面的长度为 8 m, 宽度为 3 m, 单元间隔为 0.5 m, 故将单元格的宽度设置为 3.0 m, 高度设置为 0.5 m。



图 2 网格制作界面

坡面的坐标系设置方式是: 面向坡面, 左上角为坐标原点; 沿汇水方向为纵坐标 y , 坡顶为起始坐标, 即 0 m 位置, 坡底为终止坐标, 即 8 m 位置, 从坡顶到坡脚坐标值依次增加; 垂直于汇水方向为横坐标 x , 左边线为起始坐标, 即 0 m 位置, 右边线为终止位置, 即 3 m 位置, 从左到右坐标值依次增加; 垂直于坡面方向为立坐标 z , 坡面为 0 m, 由坡面向下依次递减。

数据采集时, 由于顶部 0~0.5 m 处尚未有侵蚀沟发生, 故将试验土槽顶部 0 m 和 0.5 m 的横断面舍弃, 同时为了消除下部试验土槽下部集水槽的影响, 也试验土槽底部 8 m 处的横断面舍弃。最终, 由坡上至坡下依次选取 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 m 处的侵蚀沟横断面进行沟蚀发育特征研究。

2 侵蚀沟空间分布

2.1 断面分析

断面分析是指地形断面研究中, 以线代面研究区域的地貌形态、轮廓形状、地势变化、地质构造、斜坡特征、地表切割强度等^[9]。本研究通过提取坡长方向上单位长度的系列侵蚀沟横断面研究沟蚀的发育特征。SuperMap Deskpro 的剖面图功能能够依照设置的断面位置提取坡面的横断面。图 3 是提取的断面图, 断面图上显示了该断面的最大和最小高程, 并可以查询该断面上每个坡面点的坐标和高程信息。在

断面图上, $\min z$ 是该断面的最大沟深, 沟两侧边界坐标值的差即沟宽。针对每次场降雨后的 DEM, 依次得到各个指定位置的横断面, 并对应记录沟深和沟宽。

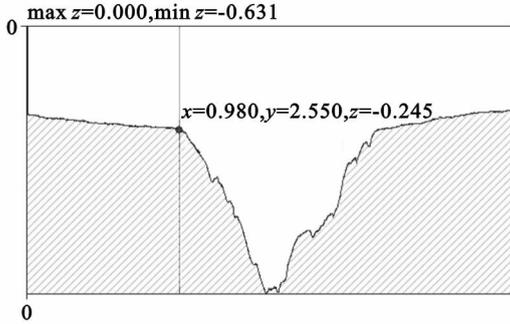


图 3 横断面示意图

2.2 侵蚀沟长度变化分析

经过断面分析, 获得 4 场次降雨后坡面侵蚀的沟宽数据(表 1)。表 1 中宽度值为 0 的位置表明此处尚未形成侵蚀沟, 宽度大于 0 的位置表明侵蚀沟已经出现。从沟宽的值可以得到侵蚀沟的起点位置区间, 由于沟宽的终点均位于坡面 7.5~8 m, 所以可以获得沟长的区间, 如第一场次降雨后, 自坡长 5.0 m 处以上沟宽大于 0, 则沟头的位置为坡面 4.5~5 m 处左右, 沟长的最大值为 3.5 m(8.0~4.5 m), 沟长的最小值为 2.5 m(7.5~5.0 m), 沟长 L 的值域为 $L \in (2.5, 3.5)$ 。

表 1 侵蚀沟断面宽度

断面位置/m	第一场次降雨/cm	第二场次降雨/cm	第三场次降雨/cm	第四场次降雨/cm
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0	0.0	0.0	0.0	41.7
2.5	0.0	0.0	6.4	39.4
3.0	0.0	0.0	62.6	63.2
3.5	0.0	0.0	193.6	278.8
4.0	0.0	42.3	230.1	264.3
4.5	0.0	88.1	219.7	252.7
5.0	4.6	146.6	195.4	228.9
5.5	34.2	118.9	130.4	215.0
6.0	60.3	73.0	151.3	214.5
6.5	46.3	89.3	154.8	215.7
7.0	34.8	44.7	134.5	216.8
7.5	18.5	49.8	64.9	70.2

依次类推, 第二场次降雨后, 自坡长 4.0 m 处沟宽大于 0, 则沟头的位置为 3.5~4.0 m, 沟长的值域为 $L \in (3.5, 4.5)$; 第三场次降雨后, 自 2.5 m 处沟宽大于 0, 则沟头的位置为 2.0~2.5 m, 沟长的值域为 $L \in (5.0, 6.0)$; 第四场次降雨后, 自 2.0 m 处沟宽大

于 0, 则沟头的位置为 1.5~2.0 m, 沟长的值域为 $L \in (6.0, 7.0)$ 。

由沟头的位置和沟长的值可以看出, 四场次连续降雨中, 侵蚀沟沟头均向坡上延伸, 其中以第一场次降雨和第三场次降雨的沟头前进速度最快, 沟长增加最大。沟头前进主要是由侵蚀沟的溯源侵蚀引起的, 可见四场次连续降雨中, 均存在溯源侵蚀, 而以第一场次降雨和第三场次降雨中溯源侵蚀最为明显。

2.3 侵蚀沟宽度变化分析

侵蚀沟宽的增量能够直接体现沟宽的变化幅度。在此对所有断面, 用后一场次降雨的沟宽减去前一场次降雨的沟宽, 分别得到四场次降雨的沟宽增量, 并进行统计分析(图 4)。

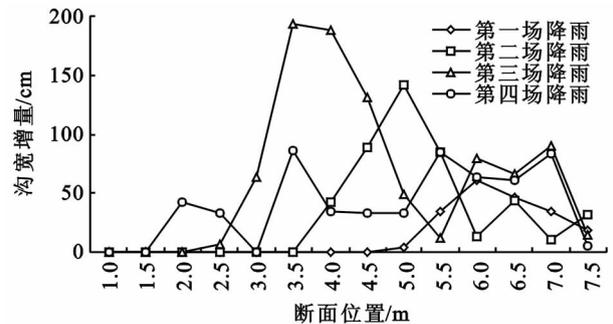


图 4 各降雨场次侵蚀沟宽的增量变化趋势

由图 4 可看出, 第一场次降雨的最大增幅出现在坡长 6.0 m 处, 第二场次降雨的最大增幅出现在坡长 5.0 m 处, 第三场次和第四场次降雨的最大增幅均出现在坡长 3.5 m。最大增幅位置的变化趋势与溯源侵蚀的方向一致。侵蚀沟的宽度增加有两种方式, 第一种是伴随着溯源侵蚀在坡面上部位置发生的沟头扩张, 属于水力侵蚀; 第二种是沟壁的崩塌使得侵蚀沟的宽度迅速增加, 水力侵蚀和重力侵蚀伴生。最大增幅位置的变化趋势说明前三场次降雨中溯源侵蚀对沟宽增加起到重要作用, 第四场次降雨沟宽增加主要是由沟壁的崩塌造成的。第二、三、四场次降雨中, 沟宽增幅最大的位置出现在 3.5~5.5 m, 证明此位置区间沟蚀发育活跃。第三场次降雨增加幅度最大, 是由于此时沟蚀发育处于活跃发育阶段, 溯源侵蚀和沟壁崩塌对侵蚀沟的双重作用造成的。

2.4 侵蚀沟深度变化分析

通过各断面分析可以获得连续四场次降雨后各个断面位置沟深的值, 在此通过计算沟深的增量值(同一断面后一场次降雨沟深减去前一场次降雨沟深), 分析沟深增量的变趋势(图 5), 以剖析侵蚀沟的深度变化特征。

由图 5 可以看出, 连续四场次降雨后侵蚀深度增

量曲线均在坡面中段(3.0~5.5 m)出现了深度剧烈增加和剧烈减少的情况,并且增量的最大峰值向坡面上部移动,这表明坡面中段沟蚀发育最为活跃,坡面顶端和底部沟蚀发育相对缓慢,并且溯源侵蚀引起沟蚀活跃区由坡面中部向坡面上部移动。第二场次降雨后,坡面 1.0~3.5 m 处沟深的增量为负值,而在第四场次降雨后,坡面 4.0~6.5 m 沟深的增量也出现负值,反映侵蚀沟发育中后期,由于沟壁崩塌活跃,出现了暂时的沉积现象。

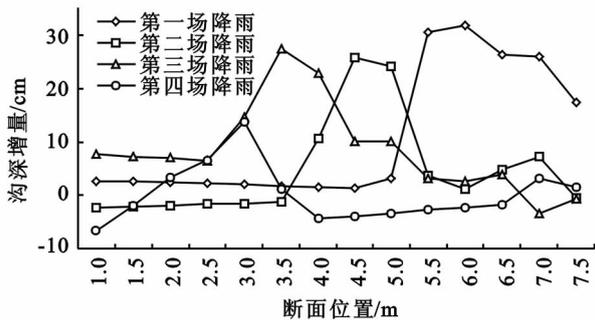


图 5 各降雨场次沟深增量变化

2.5 综合分析

这里综合分析连续四场次降雨过程中侵蚀沟宽和沟深的动态变化过程(表 2)。由表 2 可以发现,坡面 1,1.5,2.0,2.5,3.0 m 坡长处,侵蚀沟深度在第三场降雨增量和变幅最大。在坡长 3.5 m 处,侵蚀沟的宽度在第四场降雨后增量和增幅最大;而侵蚀沟

的深度在第三场降雨增量和变幅最大。在坡长 4.0 m 处,侵蚀沟的宽度在第三场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大,而侵蚀沟的深度在第三场降雨增量和变幅最大,在坡长 4.5 m 处,侵蚀沟的宽度在第三场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;侵蚀沟的深度在第二场降雨增量和变幅最大。在坡长 5.0 m 处,侵蚀沟的宽度在第二场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;而侵蚀沟的深度在第二场降雨增量和变幅最大。在坡长 5.5 m 处,侵蚀沟的宽度在第二场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;而侵蚀沟的深度在第二场降雨变幅最大,第一场降雨后增量最大。在坡长 6.0 m 处,侵蚀沟的宽度在第三场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;而侵蚀沟的深度在第三场降雨变幅最大,第一场降雨后增量最大。在坡长 6.5 m 处,侵蚀沟的宽度在第二场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;侵蚀沟的深度在第三场降雨变幅最大,第一场降雨后增量最大。在坡长 7.0 m 处断面,侵蚀沟的宽度在第三场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;而侵蚀沟的深度在第三场降雨变幅最大,第一场降雨后增量最大。在坡长 7.5 m 处,侵蚀沟的宽度在第二场降雨后增幅最大,第四场降雨后增量最大;侵蚀沟的深度在第四场降雨变幅最大,第一场降雨后增量最大。

表 2 降雨前后侵蚀沟各断面的宽度、深度变化对比

断面位置/m	第一场降雨		第二场降雨				第三场降雨				第四场降雨			
	宽度增量/cm	深度增量/cm	宽度增量/cm	宽度变幅/%	深度增量/cm	深度变幅/%	宽度增量/cm	宽度变幅/%	深度增量/cm	深度变幅/%	宽度增量/cm	宽度变幅/%	深度增量/cm	深度变幅/%
1.0	0.0	2.6	0.0	—	-2.3	-9.0	0.0	—	7.8	33.5	0.0	—	-6.8	-21.9
1.5	0.0	2.5	0.0	—	-2.2	-8.7	0.0	—	7.2	31.0	0.0	—	-2.1	-6.9
2.0	0.0	2.4	0.0	—	-2.0	-7.8	0.0	—	7.0	29.7	41.7	—	3.3	10.8
2.5	0.0	2.1	0.0	—	-1.6	-6.3	6.4	—	6.4	26.9	39.4	515.6	6.6	21.9
3.0	0.0	2.0	0.0	—	-1.6	-6.2	62.6	—	14.6	60.6	63.2	1.0	13.8	35.7
3.5	0.0	1.7	0.0	—	-1.2	-4.6	193.6	—	27.4	109.2	278.8	44.0	1.1	2.1
4.0	0.0	1.5	42.3	—	10.7	37.5	230.1	444.0	22.8	58.2	264.3	14.9	-4.3	-6.9
4.5	0.0	1.3	88.1	—	25.8	87.8	219.7	149.4	10.2	18.5	252.7	15.0	-4.0	-6.1
5.0	4.6	3.0	146.6	3087.0	24.2	75.6	195.4	33.3	10.1	18.0	228.9	17.1	-3.4	-5.1
5.5	34.2	30.4	118.9	247.7	3.6	6.1	130.4	9.7	3.0	4.8	215.0	64.9	-2.8	-4.2
6.0	60.3	31.8	73.0	21.1	1.0	1.6	151.3	107.3	2.6	4.1	214.5	41.8	-2.3	-3.5
6.5	46.3	26.3	89.3	92.9	4.7	8.4	154.8	73.3	3.7	6.1	215.7	39.3	-1.8	-2.8
7.0	34.8	26.0	44.7	28.4	7.3	13.1	134.5	200.9	-3.5	-5.5	216.8	61.2	3.0	5.0
7.5	18.5	17.4	49.8	169.2	-0.5	-1.1	64.9	30.3	-0.7	-1.5	70.2	8.2	1.5	3.3

“—”表示无值。

对比各场降雨过程后的沟宽和沟深,可以得出坡面 3.5~5.5 m 坡长处是坡面侵蚀沟发育最为活跃的地方,且随着降雨过程的进行,侵蚀活跃区向坡面上部移动。沟蚀发育的初始阶段,溯源侵蚀和下切侵蚀是其主要的侵蚀方式;沟蚀发育中期阶段,下切侵蚀

和溯源侵蚀是其主要的侵蚀方式;沟蚀发育后期阶段,沟壁侧蚀引起的崩塌和滑塌明显。

3 结论

(1) 通过研究坡面沟蚀的时空发展规律,可以得

出侵蚀沟的沟头溯源侵蚀加长和沟头下切加深是在沟蚀的最初阶段实现的;沟蚀发育的中期阶段,下切侵蚀和溯源侵蚀活跃;侵蚀沟沟壁扩张在沟蚀的后期阶段较为显著,同时也标志着沟蚀发育处于稳定阶段。

(2) 坡面 3.5~5.5 m 坡长处是沟蚀发育最为活跃的地方,且随着降雨过程的进行,侵蚀活跃区向坡面上部移动。

利用 GIS 的断面分析方法能够比较准确地提取侵蚀沟的发育形态参数,展现沟蚀的发育特征。通过对多个连续断面的时空分析,能够展现坡面整体的变化特征,为定量研究土壤侵蚀的变化过程提供了新的思路。由于受到断面数量和位置的限制,以及人为观测的误差,会对结果造成一定影响,在后续的研究中可以通过增加断面数量来达到精确定量研究的目的。

参考文献:

[1] 唐克丽. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径

[M]. 北京:中国科学技术出版社,1991:41-42.

[2] 张鹏,郑粉莉,王彬,等. 高精度 GPS, 三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J]. 水土保持通报,2008,28(5):11-20.

[3] 余叔同,郑粉莉,张鹏. 基于插件技术和 GIS 的坡面土壤侵蚀模拟系统[J]. 地理科学,2010,30(3):441-445.

[4] 张姣,郑粉莉,温磊磊,等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J]. 水土保持通报,2011,31(6):1-6.

[5] 马玉凤,严平,时云莹,等. 三维激光扫描仪在土壤侵蚀监测中的应用[J]. 水土保持通报,2010,30(2):177-179.

[6] 唐强,鲍玉海,贺秀斌,等. 土壤侵蚀监测新方法和新技术[J]. 中国水土保持科学,2011,9(2):11-18.

[7] 霍云云,吴淑芳,冯浩,等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. 中国水土保持科学,2011,9(2):32-37.

[8] 傅炜. GIS 数字地形模型的建立及应用研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2001,29(2):92-97.

[9] 汤国安. 地理信息系统教程[M]. 北京:高等教育出版社,2007:131-132.

(上接第 19 页)

参考文献:

[1] 王涛,朱震达. 我国沙漠化研究的若干问题[J]. 中国沙漠,2003,23(3):209-214.

[2] 李大勇. 浅析我国土地沙漠化及治理中存在的问题[J]. 陕西广播电视大学学报,2008,10(2):35-37.

[3] 王淘,赵哈林,肖洪浪. 中国沙漠化研究的进展[J]. 中国沙漠,1999,19(4):299-311.

[4] 高永,邱国玉,丁国栋,等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠,2004,24(3):365-370.

[5] 凌裕泉. 草方格沙障的防护效益:腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究[M]. 银川:宁夏人民出版社,1980.

[6] 王振亭,郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型[J]. 中国沙漠,2002,22(3):229-232.

[7] 常兆丰,仲生年,韩福贵,等. 粘土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J]. 中国沙漠,2000,20(4):455-457.

[8] 高国雄,李广毅,高宝山,等. 煤矸石障蔽对沙地土壤的改良作用研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1):102-104.

[9] 王文彪,党晓宏,张吉树,等. 库布齐沙漠北缘不同作物秸秆平铺式沙障防风效益研究[J]. 中国沙漠,2013,33(1):65-71.

[10] 高宝山,高国雄,朱首军. 煤矸石沙障小气候效应的观测研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,1999,27

(增刊):159-163.

[11] 王健,桑长青,何清. 塔克拉玛干沙漠公路中段两侧不同下垫面的小气候分析[J]. 中国沙漠,2003,23(5):577-580.

[12] 李生字,雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用:以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例[J]. 干旱区研究,2003,21(1):7-10.

[13] 韩致文,刘贤万,姚正义,等. 复膜沙袋阻沙体与芦苇高立式方格沙障防沙机理风洞模拟实验[J]. 中国沙漠,2000,20(1):40-44.

[14] 庞学勇,刘世全,刘庆,等. 川西亚高山针叶林植物群落演替对土壤性质的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(4):42-50.

[15] 魏义长,康玲玲,王云璋,等. 水土保持措施对土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(5):114-116.

[16] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报,2002,39(4):490-497.

[17] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: V. The translocation and abrasive action of the wind[J]. Soil Science, 1946,61(2):167-177.

[18] 虞毅,高永,汪季,等. 一种分层采取土壤样品取土器[P]. ZL201020633704. X.

[19] 刘雪梅,黄元仿. 应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究[J]. 土壤通报,2005,36(4):579-582.