

茵陈蒿群落垂直结构对坡面产流产沙过程的影响

李盼盼¹, 王兵^{1,2}, 刘国彬^{1,2}, 李文达¹

(1. 西北农林科技大学林学院, 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: 为探究茵陈蒿群落不同垂直结构对产流、产沙过程的影响, 利用人工模拟降雨试验的方法, 研究了不同垂直结构的茵陈蒿群落坡面侵蚀过程。结果表明: 在植被盖度相同条件下, 茵陈蒿多层群落结构(茵陈蒿+狗尾草+生物结皮)和双层群落结构(茵陈蒿+生物结皮)的减流、减沙效果显著优于单层群落结构, 二者的减流效益分别为 40.5% 和 22.6%, 减沙效益分别为 86.6% 和 73.5%。不同垂直结构的茵陈蒿群落累积产沙量均可表示为累积产流量的幂函数($R^2 > 0.98$), 表现为累积产沙量随累积产流量的增加而增加, 且随群落结构层数的增加, 3 种垂直结构群落的累积产沙量增幅减小。植物根系可以改善土壤结构, 增加降水入渗, 减少地表径流, 是影响产流、产沙过程的关键因素。因此, 群落垂直层次多、组分复杂、整体预防水土流失的能力也相应较强。对易于形成植被空层的草地群落, 应当重视其低层植被建设, 加强草地群落垂直结构及其水土保持功能的相关研究, 以为黄土高原草地植被恢复和结构配置优化提供理论依据。

关键词: 茵陈蒿; 群落垂直结构; 产流产沙; 草地生态系统; 水土保持

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2017)02-0040-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.02.008

Effects of *Artemisia capillaries* Vertical Structures on the Processes of Runoff and Sediment Production

LI Panpan¹, WANG Bing^{1,2}, LIU Guobin^{1,2}, LI Wenda¹

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: By simulated rainfall experiments, we identified the effects of different vertical structures on runoff and sediment production processes in the community of *Artemisia capillaries*. The results showed that the reduction effects of runoff and sediment yield of the multi-layer vertical structure (*Artemisia capillaries* + *Setaria viridis* (L.) Beauv + biological crusts) and double-layer vertical structure (*Artemisia capillaries* + biological crusts) were significantly greater than those of the single-layer vertical structure (*Artemisia capillaries*) under the same condition of vegetation coverage. Compared with the single-layer vertical structure, the other two structures could reduce soil erosion significantly. In addition, runoff was reduced by 22.6% and 40.5% over the double-layer vertical structure and multi-layer vertical structure, respectively, and sediment yield was reduced by 73.5% and 86.6%, respectively. The cumulative sediment yield could be expressed as a power function of the cumulative production flow ($R^2 > 0.98$), showing that the cumulative sediment yield increased with the augment of the runoff production, and the degree of the enhancement decreased when the community structure became more complex. The results also showed that plant roots could improve soil structure by increasing rainfall infiltration and reducing overland runoff, which was the key factor influencing the runoff and sediment yield processes. All results indicated that the ability of community to prevent soil erosion could be improved with complicated vertical structure and components. In conclusion, in order to provide the theory basis for grassland vegetation restoration and structural configuration

收稿日期: 2016-10-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“土壤有效 N 升高对白羊草群落特征及土壤侵蚀过程的影响机制”(41471438); 西北农林科技大学基本科研业务项目“植被恢复影响坡面流土分离过程机理研究”(Z109021539); 中国科学院“西部之光”人才培养计划西部博士资助项目“黄土高原植物根系抑制土壤侵蚀效应研究”(K318021403)

第一作者: 李盼盼(1992—), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: lipanpan2014050769@163.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 陕西杨凌人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

optimization for the Loess Plateau, we have to study further the vertical structure of grassland community and reveal the mechanisms of soil and water conservation.

Keywords: *Artemisia capillaries*; community vertical structure; runoff and sediment yield; grassland ecosystem; soil and water conversation

植被冠层能够截留降水、消减雨滴动能和保护地表,且根系可以改善土壤结构、增加降水入渗、拦蓄径流,减少地表径流,从而减缓水土流失^[1-2],因此植被是影响产流、产沙过程的关键因素。植物群落的垂直结构是指植物群落在垂直方向上的分布与配置状态,受植被垂直结构差异的影响,其水土保持功能也会有所不同^[3]。合理的植被群落垂直结构层次布局可有效减少土壤侵蚀。相对于单层结构的植被群落,乔灌木复合结构及复层结构(如乔木—草本,灌木—草本)的土壤抗蚀性明显提高,具有更强的水土保持功能^[4-5]。在以往的研究中,有关植被群落垂直结构对土壤侵蚀的影响多集中于林—灌—草的结构布局,而单一植被群落(如草地群落)垂直结构则主要考虑冠层盖度及水平分布格局,没有考虑其垂直结构对土壤侵蚀的影响^[6-8]。相关研究表明黄土高原不同类型植被群落结构对土壤侵蚀影响差异显著,认为贴地面垂直结构的分布是植被保持水土的关键,应高度重视草地群落垂直结构的水土保持功能^[9-11]。

黄土丘陵沟壑区地形主要为梁峁状,沟谷发育,土壤侵蚀现象明显。茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)为多年生半灌木状草本植物,植被长期定位监测表明,茵陈蒿群落是该区退耕地上最早出现的主要先锋群落。基于此,本文以退耕草地茵陈蒿为研究对象,采用人工模拟降雨的方法,通过设置茵陈蒿群落不同垂直结构配置类型,系统研究草地群落垂直结构差异对坡面产流、产沙过程的影响,以期为黄土高原草地植被恢复和结构配置优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 试验土槽 试验地点位于陕西省杨凌(108°04′27.95″E,34°16′56.24″N)中国科学院水土保持研究所。试验于 2009 年 4 月进行土槽的装填及茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)的播种。共布设 9 个土槽,每个土槽长度为 2.0 m,宽度为 1.0 m,高度为 0.5 m,坡度为 15°,供试土壤取自陕西安塞县的表层(0—20 cm)黄绵土。填土前将供试土壤除去草根、砾石,

然后过 1 cm 筛后风干。填土时先在土槽底部铺一层细沙以保证土壤水分均匀下渗,将土壤容重控制在 1.2 g/cm³ 左右,分层分次装土,并铺平压实。每次在填装下层之前将表土打毛,消除土壤之间的分层现象,填土总高度 40 cm。填土结束后种植茵陈蒿,将草籽与等量土壤均匀混合后,按照 10 cm×10 cm 间距、0.8 cm 沟深撒播覆土种植,种植后表面覆盖草席并定期洒水,茵陈蒿幼苗株高长至 4 cm 后停止浇水,使其自然生长。经过 4 年自然生长,盖度约为 50%。该群落优势种为茵陈蒿(*Artemisia capillaries*),次优势种为狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.),生物结皮种类主要为苔藓结皮和藻结皮。

1.1.2 试验处理 试验设置了 3 种处理:单层群落结构(茵陈蒿)、双层群落结构(茵陈蒿+生物结皮)、多层群落结构(茵陈蒿+狗尾草+生物结皮)(图 1),每种处理设置 3 个重复。多层群落结构处理是保持原有茵陈蒿群落,双层群落结构处理是保留茵陈蒿和地表结皮,单层群落结构处理只保留茵陈蒿。试验中整体植被盖度为约 50%,生物结皮盖度约为 30%(表 1)。



图 1 试验小区茵陈蒿群落垂直结构分布

1.1.3 试验过程 模拟降雨试验在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人工模拟降雨大厅进行。于茵陈蒿生长末季(2013 年 9 月),对 3 种处理的每个重复进行降雨,共计 9 次,降雨强度设置为 90 mm/h,降雨历时为 60 min。降雨前对每个土槽进行少量、多次喷水直至饱和,以消除土壤前期含水量对降雨试验的影响;静置一周后(含水量约为 10%),按照预设降雨强度和坡度进行人工模拟降雨试验。降雨过程中记录产流时间,每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙;降雨结束后,测定径流量,待泥沙沉淀后倒掉上层清水,收集泥沙、烘干(105 °C)、称重,得到泥沙量。

表 1 茵陈蒿群落基本特征

群落结构 类型	盖度/%	地上生物量/ (g·m ⁻²)	株高/ cm	株数	结皮 厚度/mm	结皮生 物量/g	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)	根重密度/ (kg·m ⁻³)
单层	50	316.19	38.60	348	0.00	0.00	2.74	0.29	14.47
双层	50	400.14	37.64	328	1.51	58.75	3.33	0.26	18.50
多层	50	220.69	19.82	453	1.11	85.26	3.69	0.37	31.38

1.2 数据处理

各群落结构的植被特征、产流产沙差异采用多重比较方法,数据分析及图表处理采用 SPSS 19.0 和 Origin 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同茵陈蒿群落垂直结构下的产流产沙特征

茵陈蒿群落垂直结构差异可显著影响坡面产流特征。不同处理间累积产流量存在显著差异($p < 0.05$),总体表现为单层群落结构 > 双层群落结构 > 多层群落结构(表 2)。单层茵陈蒿群落结构累积产流量最大,随着群落垂直结构趋于复杂,累积产流量显著降低,相对于单层茵陈蒿群落而言,双层群落结构和多层群落结构累积产流量分别减少了 22.6% 和 40.5%。受群落垂直结构的影响,不同处理间产流速率也呈现显著差异($p < 0.05$),表现为单层群落结构 > 双层群落结构 > 多层群落结构。单层茵陈蒿群落平均产流速率最大,分别是双层群落结构和多层群落结构的 1.3 倍和 1.7 倍。群落结构差异同时也会对产流过程产生影响,随着降雨历时的增加,各处理产流速率均呈现增大趋势(图 2)。在降雨初期,受植物截留作用的影响,各处理产流速率在开始产流 16 min 内均较小,且差异不显著。随着降雨历时的增加,各处理产流速率迅速增加(图 2)。

表 2 茵陈蒿群落不同垂直结构平均产流速率与累积产流量

群落结构类型	平均产流速率/(L·min ⁻¹)	累积产流量/L
单层	2.19±1.13a	131.55±1.68a
双层	1.70±0.91b	101.76±1.27b
多层	1.30±0.41c	78.29±1.50c

注:同列数据不同字母表示差异达显著性水平($p < 0.05$)。

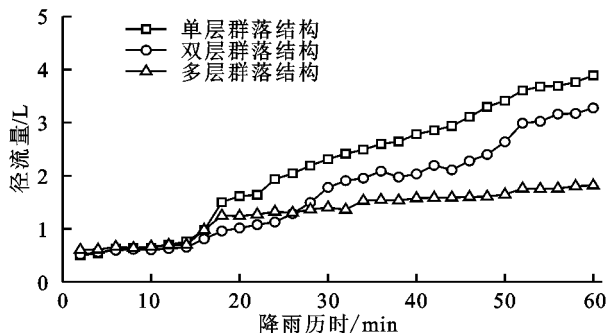


图 2 茵陈蒿群落不同垂直结构径流量随时间变化特征

受群落垂直结构的影响,不同处理间平均产沙速率和累积产沙量存在显著差异($p < 0.05$)(表 3),总体表现为单层群落结构 > 双层群落结构 > 多层群落结构。单层群落结构平均产沙速率和累积产沙量均最大,分别为 5.1 g/min 和 306.3 g,是双层群落结构的 1.7 倍和 2.0 倍,与多层群落结构相比,均为其 7.5 倍。群落垂直结构对产沙过程的影响也表现出不同

的趋势(图 3)。单层群落结构总体呈现波动增加趋势,双层群落结构和多层群落结构整体波动较小,但并无明显变化趋势,且产沙速率低于单层群落结构。一方面由于群落垂直结构差异对产流过程的影响不尽相同,导致不同处理产沙速率有所差异;另一方面,除生物结皮的覆盖外,根系也可显著影响土壤侵蚀过程,多层群落结构具有较大的根系生物量,在一定程度上导致其产沙速率较低。

表 3 茵陈蒿群落不同垂直结构平均产沙速率与累积产沙量

群落结构类型	平均产沙速率/(g·min ⁻¹)	累积产沙量/g
单层	5.10±3.38a	306.26±8.91a
双层	3.06±1.30b	154.66±11.90b
多层	0.68±0.56c	41.03±5.16c

注:同列数据不同字母表示差异达显著性水平($p < 0.05$)。

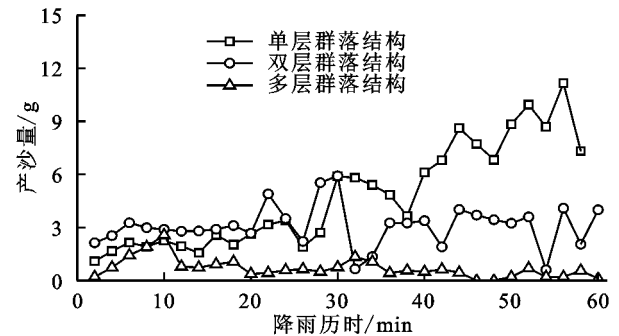


图 3 不同植被类型下产沙量随时间变化特征

2.2 茵陈蒿群落坡面累积产流量与累积产沙量的关系

茵陈蒿群落不同垂直结构累积产沙量均可表示为累积径流量的幂函数($y = Ax^B$)。式中: y 为累积产沙量, x 为累积产流量; $R^2 > 0.98$ (图 4),且随着径流量的增加,累积产沙量呈不同程度的增加。此外,随着径流量的增加,多层群落结构、双层群落结构和单层群落结构累积产沙量增幅依次减小。于国强等^[12]的研究结果认为系数 A 为产沙基准系数,取决于植被类型等立地条件,系数 B 为产沙速率系数,取决于入渗率。本研究中,双层群落结构和多层群落结构在垂直方向上较为复杂、根系网络庞大,截留及入渗能力不同程度上优于茵陈蒿单层群落结构,对土壤的固持作用更明显,可有效减缓径流对表层土壤的冲刷,从而使累积产沙量显著降低。

2.3 茵陈蒿群落结构特征与产流、产沙的关系

植被结构特征如株数、结皮厚度、结皮生物量、根表面积密度、根长密度、根重密度可显著影响产流、产沙过程(表 4)。逐步回归分析表明(表 5),产流率可表示为根长密度和根系表面积密度的幂函数($p < 0.01$),随着根长密度和根系表面积密度的增加而降低;产沙率受产流过程和植被特征的共同影响,可表

示为产流率和根重密度的幂函数 ($p < 0.01$), 随产流率的增加和根重密度的减小而降低。

累积产流量可表示根长密度幂函数 ($p < 0.01$), 随着根长密度的增加而降低; 累积产流量和根重密度是影响累积产沙量的主要因素, 随着累积产流量的增加和根重密度的减小而呈幂函数降低 ($p < 0.01$)。上述结果也在一定程度表明植物根系在控制坡面产流及侵蚀产沙中发挥着重要作用, 植物根系可以改善土壤结构, 增加降水入渗, 减少地表径流, 从而影响产流产沙过程^[13]。

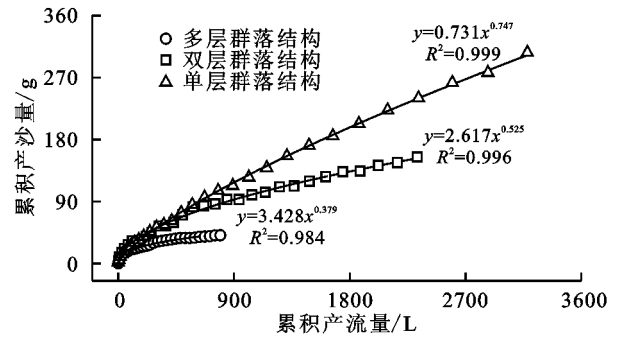


图 4 茵陈蒿群落垂直结构累积产沙量与累积产流量之间的关系

表 4 植被特征指标与产流产沙指标相关分析

指标	RR	SR	CR	CS	PN	CT	CB	RLD	RSAD
SR	0.999**								
CR	1.000**	0.999**							
CS	0.999**	1.000**	0.999**						
PN	-0.736*	-0.721*	-0.736*	-0.722*					
CT	-0.754*	-0.768*	-0.754*	-0.767*	0.114				
CB	-0.976**	-0.981**	-0.976**	-0.980**	0.623	0.829**			
RLD	-0.996**	-0.996**	-0.996**	-0.996**	0.688*	0.798**	0.984**		
RSAD	-0.628	-0.610	-0.628	-0.612	0.989**	-0.035	0.502	0.572	
RBD	-0.773*	-0.786*	-0.773*	-0.785*	0.143	-0.998**	-0.847**	0.817**	0.006

注: 样本量为 9; RR 为产流速率; SR 为产沙速率; CR 为累积产流量; CS 为累积产沙量; PN 为株数; CT 为结皮厚度; CB 为结皮生物量; RLD 为根长密度; RSAD 为根表面积密度; RBD 为根重密度。* 和 ** 分别表示在 0.05 水平和 0.01 水平上显著相关。

表 5 植被特征指标与产流产沙指标的逐步回归

产流产沙指标	回归方程
产流率	$y = 10^{1.125} x_1^{-1.506} x_3^{-0.290}$
产沙率	$y = 10^{1.044} x_2^{-0.540} x_4^{4.297}$
累积产流量	$y = 10^{2.866} x_1^{-1.688}$
累积产沙量	$y = 10^{-5.813} x_2^{-0.546} x_5^{4.302}$

注: x_1 为根长密度; x_2 为根重密度; x_3 为根表面积密度; x_4 为产流速率; x_5 为累积产流量。

3 讨论

对于草地生态系统而言, 目前关于其防治水土流失的研究大多集中于植被盖度, 但相关研究表明, 高的植被盖度并不意味着良好的保持水土功能^[14]。垂直层次不同的植物群落对水土流失的防治功能有显著差异, 植被垂直结构越复杂, 其防治土壤侵蚀能力越强, 结构缺失往往导致植被的水土保持效益降低^[15-16]。

单层茵陈蒿群落结构由于植被单一、植株密度较低及地表裸露, 其截留作用相对较弱, 累积产流量和平均产流速率最高, 分别为 131.55 L 和 2.19 L/min; 相反, 双层群落结构和多层群落结构具有相对复杂的垂直层次和较大的植株密度, 地表生物结皮的存在也在一定程度上增加了地表糙度, 因而累积产流量和产流速率均相对较低, 分别比单层群落结构减少 22.6% 和 40.5%。总体而言, 茵陈蒿多层群落垂直结构可显著降低产流速率和产流量, 这也在一定程度上表明群落垂直结构越复杂、植株密度越大, 其拦截降水的能力越强, 从而显著影响产流特征。由于植被特征, 单层群落结构的产流速率和产流量较大, 水流侵蚀动力较强, 导致平均产沙速

率和累积产沙量相对较高, 分别为 5.1 g/min 和 306.3 g。而双层群落结构和多层群落结构产流速率和产流量均显著小于单层结构, 水流侵蚀动力相对较弱, 平均产沙速率和累积产沙量较低, 分别比单层群落结构减少 49.5% 和 86.6%。此外, 双层群落结构和多层群落结构的根系庞大, 具有较强的固结土壤作用。因此地表生物结皮的覆盖和根系的固结作用, 可有效保护表层土壤免受雨滴打击和水流冲刷, 从而降低土壤侵蚀量。坡面产沙最直接的动力因素来源于坡面径流, 累积径流量与累积产沙量的相关关系可在一定程度上反映侵蚀过程中产流与产沙的动态变化。本研究认为, 坡面累积产流量与累积产沙量呈幂函数关系 ($y = Ax^B, R^2 > 0.98$), 随累积径流量的增加, 累积产沙量逐渐增大。这与于国强等^[17]野外模拟降雨对不同立地条件下侵蚀产沙的研究结果一致。群落垂直结构越复杂, 产流速率和产沙速率越容易达到稳定状态, 因此累积产沙量随累积产流量增加而变得缓慢。影响坡面产流产沙的因素包括降雨条件, 坡面特征, 植被冠层, 地表结皮, 根系特征, 土壤理化性状等。其中, 植被通过冠层对降雨的截留来减弱雨滴动能, 从而削弱其对地表的打击。相关研究表明, 地表结皮可显著减少地表径流和侵蚀产沙^[18], 尤其在有植被存在时, 减沙效果更佳^[19-20]。因此, 当雨滴到达地面时, 结皮可延缓径流流速, 从而减弱其侵蚀动力, 减少产沙。同时, 植被在地下形成庞大的根系网络, 可显著改善土壤结构, 起到固结土壤的作用, 以减少土壤

流失。因此,不同群落植被垂直结构对坡面的减流、减沙作用不同。

4 结论

植被垂直结构差异可显著影响产流产沙过程,本文通过人工模拟降雨试验,系统研究了茵陈蒿群落垂直结构差异对坡面产流、产沙过程的影响,主要结论为:

(1)多层茵陈蒿群落结构拦截降雨和促进水分入渗能力相对较强,可有效减缓径流对表层土壤的冲刷。相同盖度下,茵陈蒿多层群落结构保持水土的效果明显优于单冠层结构;有结皮存在的小区,其减流、减沙效果优于无结皮小区。

(2)茵陈蒿群落不同垂直结构累积产沙量均可表示为累积产流量的幂函数($R^2 > 0.98$),表现为累积产沙量随累积产流量的增加而增加,且随着茵陈蒿群落结构层数增加,累积产沙量增幅减小。

(3)植被特征如株数、结皮厚度、结皮生物量、根表面积密度、根长密度可显著影响产流、产沙过程;植物根系可以改善土壤结构,增加降水入渗,减少地表径流,是影响产流、产沙过程的主要因素。

相同植被盖度下,多层结构保持水土的效果明显优于单冠层结构;有结皮存在的小区,其减流减沙效果优于无结皮小区。这表明群落垂直层次多,组分复杂,整体预防水土流失的能力也相应较强。因此对于易形成植被空层的草地群落,应当重视低层植被建设。

参考文献:

[1] 赵健,魏天兴,陈致富,等. 陕西吴起县退耕还林地不同植被水土保持效益分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):31-34.

[2] 张晓艳,周正朝. 黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J]. 草业科学, 2015, 32(1):64-70.

[3] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(9):3137-3143.

[4] Xu J, Niu J Z, Xu C H, et al. A study on the technology of vegetation horizontal and vertical structure configuration in secondary degeneration area based on the natural succession rule[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3):15-22.

[5] Xiao L, Xiao L. Research on changes of plant community vertical structure after human-induced vegetation rehabilitation in degraded red soil[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2013, 32(3):41-46.

[6] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-associated nitrogen and phosphorus losses and particle size composition on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 66(3):192-200.

[7] 王玉霞,刘国彬,王国梁,等. 茵陈蒿群落分布格局对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1):62-66.

[8] Lech-Hab K B H, Issa L K, Raissouni A, et al. Effects of vegetation cover and land use changes on soil erosion in Kalaya Watershed (North Western Morocco)[J]. International Journal of Geosciences, 2015, 6(12):1353-1366.

[9] Wang B, Zhang G H, Zhang X C, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(59):589-597.

[10] Huang P P, Xue S, Li P, et al. Effect of vegetation cover types on soil infiltration under simulating rainfall[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2013, 12(2):193-198.

[11] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J]. Catena, 2010, 81(2):97-103.

[12] 于国强,李占斌,李鹏,等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5):593-599.

[13] 袁久芹,梁音,曹龙熹. 红壤坡地香根草植物篱产流产沙过程模拟[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(4):14-20.

[14] 雷婉宁. 陕北黄土区结构化植被因子指数研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2009.

[15] 张海东,于东升,董林林,等. 侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对土壤恢复特征的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6):1142-1148.

[16] 李相玺,左长清,姚毅臣,等. 花岗岩侵蚀区植被层次结构优化模式研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(1):202-207.

[17] 于国强,李占斌,张霞,等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):10-14.

[18] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):105-112.

[19] Whitton B. Biological soil crusts: Structure, function and management [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2001:281-300.

[20] Lichner L, Holko L, Zhukova N, et al. Plants and biological soil crust influence the hydrophysical parameters and water flow in an aeolian sandy soil[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2012, 60(4):309-318.