

DOI: 10.11686/cyxb2017060

<http://cyxb.lzu.edu.cn>

王润泽, 谌芸, 李铁, 周涛, 何丙辉, 刘泉宏, 刘志鹏, 单志杰. PAM和草类根系对荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体的影响. 草业学报, 2017, 26(12): 13-23.

WANG Run-Ze, CHEN Yun, LI Tie, ZHOU Tao, HE Bing-Hui, LIU Xiao-Hong, LIU Zhi-Peng, SHAN Zhi-Jie. Impacts of polyacrylamide and grass root systems on micro-aggregates of purple soil in barren hillside badlands. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 13-23.

PAM和草类根系对荒坡侵蚀劣地 紫色土微团聚体的影响

王润泽¹, 谌芸^{1*}, 李铁¹, 周涛¹, 何丙辉¹, 刘泉宏¹, 刘志鹏¹, 单志杰²

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘要:为探讨 PAM(聚丙烯酰胺)和草类根系对侵蚀劣地土壤的改良效果, 试验以该环境的紫色土为研究对象, 设置了空白对照(CK)以及单施 PAM、单植草类、“狗牙根+PAM”、“三叶草+PAM”4 个试验处理类别, 6 个月后测定了土壤微团聚体组成, 分析了土壤微团聚体分布、结构及分形特征。结果表明, 1)各试验处理的大粒径微团聚体含量增加, 小粒径的则减少; 2)各试验处理的 MWSSA(平均重量比表面积)、分散系数和分散率均显著减小(各指标最小值分别为 CK 的 0.30、0.15 和 0.60 倍), MWD(平均重量直径)、团聚状况和团聚度均显著增大(各指标最大值分别为 CK 的 1.17、1.49 和 1.28 倍); 3)各试验处理的微团聚体分形维数均减小; 4)GY-PAM_i(狗牙根+液施 PAM, 浓度: 30 g/m³)土壤的各项微团聚体结构指标均优于其他试验处理, 表现出较好的抗侵蚀性; 5)“草类+PAM”的根系指标均优于单植草类, 平均根长密度(RLD)和 d (直径)≤0.2 mm 径级分别是影响该紫色土结构稳定性和抗侵蚀性的主要因子和关键径级。

关键词:微团聚体; PAM; 根系特征; 根长密度; 根表面积密度

Impacts of polyacrylamide and grass root systems on micro-aggregates of purple soil in barren hillside badlands

WANG Run-Ze¹, CHEN Yun^{1*}, LI Tie¹, ZHOU Tao¹, HE Bing-Hui¹, LIU Xiao-Hong¹, LIU Zhi-Peng¹, SHAN Zhi-Jie²

1. College of Resources and Environment, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100048, China

Abstract: In order to explore the improvement effects of polyacrylamide (PAM) and grass roots on soil in badlands, the composition, distribution, structural and fractal characteristics of soil micro-aggregates in purple soil were measured after six months exposure to various treatments, including blank control (CK), polyacrylamide on the soil surface, grass planting alone, “*Cynodon dactylon*+PAM” and “*Trifolium repens*+PAM”. The results indicated that the proportion of large particle size micro-aggregates of each experimental treatment

收稿日期: 2017-02-20; 改回日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(41501288), 重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目(cstc2017jcyjAX0472), 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015C170, XDJK2017D206), 西南大学第九届本科生科技创新基金项目(20162402008), 西南大学资源环境学院“光炯”项目(201719)和水利部公益性行业科研专项经费项目(201501045)资助。

作者简介: 王润泽(1990-), 男, 山东淄博人, 在读硕士。E-mail: 704784686@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sy22478@126.com

increased while the proportion of small particle size micro-aggregates decreased, compared to CK. Hence, the mean weight soil specific area (MWSSA), dispersion coefficient and dispersion rate of experimental treatments significantly decreased (The minimum values were 0.30, 0.15 and 0.60 times those of CK, respectively). The mean weight diameter, aggregation states and degree of aggregation of each experimental treatment significantly increased (The maximum values were 1.17, 1.49 and 1.28 times those of CK, respectively). The fractal dimension of micro-aggregates in experimental treatments also decreased. All the structural parameters of micro-aggregates in soils of treatment GY-PAM₁ (*C. dactylon* planting and liquid application of 30 g/m³ polyacrylamide) were superior to the other treatments and this treatment showed greater reduction in erodibility. The root system parameters of “grass+PAM” were better than those of grass-planting alone. The total root length and the root length in the diameter (d) class $d \leq 0.2$ mm were the major factor and critical diameter class affecting structural stability and erodibility reduction of purple soil in barren hillside badlands.

Key words: soil micro-aggregates; PAM; root system characteristics; root length density; root surface area density

紫色土区水土流失经过多年的治理,取得了极大成效,但部分地区仍存在一些极为严重的水土流失区^[1],其特点是降水丰富,生境条件恶劣,母质岩裸露,无土或有极少量砾石土,土壤极度瘠薄,植被生长困难,治理难度极大,称为侵蚀劣地^[2]。侵蚀劣地是指因侵蚀造成贫瘠化而难以利用的土地^[3],包括岩石、荒山(裸山)或其他近乎不毛之地等^[4],是水土流失治理和生态恢复的难点。国外针对侵蚀劣地的研究较多,主要涉及侵蚀机理、“地形—水分—植被”之间的相互关系、“侵蚀速率—植被”之间的相互关系、“土壤性质—植被”之间的相互关系以及模型研究^[5-9]等。国内针对侵蚀劣地的研究很少,已有研究内容仅涉及侵蚀劣地的植被恢复技术和治理效果评价^[10-11]等方面,而针对侵蚀劣地土壤物理过程的研究则更为缺乏。土壤微团聚体是构成土壤结构的功能单元^[12],其组成对土壤物理过程和抗蚀性有重要的影响^[13],故研究侵蚀劣地紫色土微团聚体的分布、结构及分形特征是必要和迫切的。

应用 PAM(polyacrylamide,聚丙烯酰胺)防治水土流失,已成为国际普遍采用的化学措施,因其具有减少土壤侵蚀和改善土壤质量的显著效果而受到重视。在人与自然和谐共处的理念下,除化学措施外,植物措施的防治水土流失和改善生态环境作用亦必不可少^[14]。国内外针对 PAM 对土壤团聚体影响的研究成果颇丰,主要集中在 PAM 影响团聚体的分布特征^[15-16]、结构特征^[17]和作用机理^[18]等方面;植物措施对土壤团聚体的影响亦有大量研究,主要集中在报道植被措施影响团聚体的数目^[19]、碳汇作用^[20-21]和水稳定性^[22]等。目前这些研究多集中于单一措施上,而针对 PAM 和植物措施的对比分析效果以及两者的组合配套使用对土壤团聚体影响的研究尚未见报道,且鲜有研究涉及植物根系特征对土壤团聚体的影响。因此,本研究选取紫色土区荒坡侵蚀劣地土壤为对象,探讨了 PAM、草类以及两者组合配套使用对微团聚体的影响,以期为该区域荒坡侵蚀劣地水土流失治理和生态恢复效益评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属亚热带季风性气候,年均温约为 18℃,年均降水量约为 1200 mm,年均日照时长约为 1277 h^[23]。供试土壤来自重庆市北碚区马鞍溪流域内龙滩子水库(29°49'1" N, 106°24'48" E)附近的荒坡。马鞍溪位于北碚区西北部,发源于缙云山南麓,属嘉陵江支流。该荒坡为紫色沙泥页岩裸露、有少量粗骨性砾石土的纯母质侵蚀劣地,坡度约为 35°,植被覆盖度不足 5%,土层厚度不足 5 cm,鲜有人为扰动。

1.2 试验设计

于 2015 年 12 月采集荒坡侵蚀劣地土壤,采集前去除表层杂质。土壤过 5 mm 筛后填入花盆内并略微压实,使其容重为 1.30 g/cm³ 左右,花盆规格为口径×底径×高:180 mm×125 mm×100 mm。试验处理如表 1 所

示,每个处理 3 个重复,共 27 个花盆试样。试样制成后,首先浸水 12 h,水层比花盆顶部稍低,然后静置,保证试验初土壤的含水率均为饱和含水率。静置数日后,液施 PAM(中性,相对分子量 300 万,碱性条件下水解,水解度为 20%)溶液和等密度撒播草籽(每个花盆均撒播狗牙根 *Cynodon dactylon* 或三叶草 *Trifolium repens* 种子 0.3 g),试验期间常规管护,及时灌溉、去除杂草与补种。

表 1 试验处理
Table 1 Test treatments

处理类别 Categories of treatments	处理名称 Treatments	处理方式 Methods	
		草类 Grass	PAM
空白对照(非试验处理)Blank control	CK	—	—
单施 PAM Application of polyacrylamide alone	PAM ₁	—	液施浓度 Liquid application concentration:30 g/m ³
	PAM ₂	—	液施浓度 Liquid application concentration:60 g/m ³
单植草类 Grass planting alone	GY	狗牙根 <i>C. dactylon</i>	—
	SY	三叶草 <i>T. repens</i>	—
“狗牙根+PAM” “ <i>C. dactylon</i> +PAM”	GY-PAM ₁	狗牙根 <i>C. dactylon</i>	液施浓度 Liquid application concentration:30 g/m ³
	GY-PAM ₂	狗牙根 <i>C. dactylon</i>	液施浓度 Liquid application concentration:60 g/m ³
“三叶草+PAM” “ <i>T. repens</i> +PAM”	SY-PAM ₁	三叶草 <i>T. repens</i>	液施浓度 Liquid application concentration:30 g/m ³
	SY-PAM ₂	三叶草 <i>T. repens</i>	液施浓度 Liquid application concentration:60 g/m ³

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集及指标测定 于 2016 年 5 月初采集花盆试样,采样时间为雨后 3 d 以上,且 3 d 以上无灌溉和拔草措施。环刀取样:采样前土壤表面的植株、枯落物或其他杂质等清理干净(CK、PAM₁ 和 PAM₂ 只需去除土壤表面的杂质),然后用环刀(底面积 30 cm²,高 2 cm)采取含有根系或无根系的土壤样品。土壤微团聚体试验取样:每次环刀取样过后,用铲子采取约 500 g 土带回实验室使其自然风干。土壤微团聚体组成测定:蒸馏水浸泡土壤 24 h 后再振荡 2 h,采用吸管法测定各粒级微团聚体含量^[24]。

1.3.2 土壤微团聚体结构特征指标计算 土壤微团聚体平均重量比表面积(mean weight soil specific area, MWSSA)、平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、团聚状况、团聚度、分散系数和分散率均采用中国科学院南京土壤研究所主编的《土壤物理性质测定法》中相关公式计算^[24]。

1.3.3 分形维数(D)的计算 分形维数在一定程度上可以作为评价土壤结构稳定性的指标^[25]。因土壤本身具有自相似结构的特点,故可用分形理论建立土壤团粒结构的分形模型,本研究采用以粒径的质量分布直接计算土壤粒径分布的分形维数(杨培岭法),小于某一特定测量尺度的累积土粒质量 m_i 与 d_i 之间的分形关系式为^[26]:

$$\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D}=\frac{m_i}{m_{\max}}\tag{1}$$

式中: d_i 为相邻两筛分粒级的粒径平均值(mm); d_{\max} 为最大土粒粒径值(mm); m_i 为粒径小于 d_i 的累积土粒质量(kg); m_{\max} 为各粒级质量之和(kg); D 为分形维数。

以 $\lg\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)$ 与 $\lg \frac{m_i}{m_{\max}}$ 为横、纵坐标作线性趋势线图,则 3- D 即为该线性趋势线的斜率,故可用回归分析法求得土壤分形维数(D)。

1.3.4 根系指标测定及计算 将含根系的土样浸于水中 2 h,置于 0.5 mm 筛内用较小流量自来水冲洗,洗出的根系晾干表面水分,装入自封袋内并编号;然后采用 200 dpi 分辨率的扫描仪对根系进行灰度扫描,采用 Win-RHIZO(Pro. 2004c)根系分析系统分 5 个径级($d\leq 0.2$ mm, 0.2 mm $<d\leq 0.5$ mm, 0.5 mm $<d\leq 0.7$ mm, 0.7 mm $<d\leq 0.9$ mm, $d>0.9$ mm, d 为直径,单位 mm)对根长(root length, RL)、根表面积(root surface area,

RSA)和根体积(root volume,RV)进行统计分析。扫描后的根系采用烘干法和精度为千分之一的电子天平获得根干重(root weight,RW)^[27]。

根长密度(root length density,RLD)=环刀内根系总长度/土体体积 (2)

根表面积密度(root surface area density,RSAD)=环刀内根系总表面积/土体体积 (3)

根体积密度(root volume density,RVD)=环刀内根系总体积/土体体积 (4)

根重密度(root weight density,RWD)=环刀内根系总干重/土体体积 (5)

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行图表处理,用 SPSS 17.0 统计软件进行差异显著性分析(Duncan 法)和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 PAM 和草类对微团聚体分布特征的影响

由图 1 可知,同一粒级不同处理微团聚体含量存在差异。1~0.25 mm 粒级,PAM₁ 微团聚体含量最大,为 46.46%,是最小值(CK,39.93%)的 1.16 倍,且各试验处理的微团聚体含量均大于 CK,GY-PAM₁ 和 GY-PAM₂ 的微团聚体含量均大于 GY,SY-PAM₁ 和 SY-PAM₂ 的微团聚体含量均大于 SY。0.25~0.05 mm 粒级,SY-PAM₁ 的微团聚体含量最大,为 38.64%,是最小值(CK,30.63%)的 1.26 倍。0.05~0.01 mm 粒级微团聚体含量介于 10.04%~16.28%,平均值为 13.02%。0.01~0.005 mm 粒级微团聚体含量介于 2.88%~6.76%,平均值为 3.98%,0.005~0.002 mm 粒级微团聚体含量介于 0.56%~4.39%,平均值为 2.59%,且 CK 在这 2 个粒级范围内的微团聚体含量均显著大于各试验处理。0.002~0.001 mm 粒级微团聚体含量介于 0.08%~3.41%,<0.001 mm 粒级微团聚体含量介于 0.29%~1.92%,CK 在这 2 个粒级范围内微团聚体含量均显著大于各试验处理。

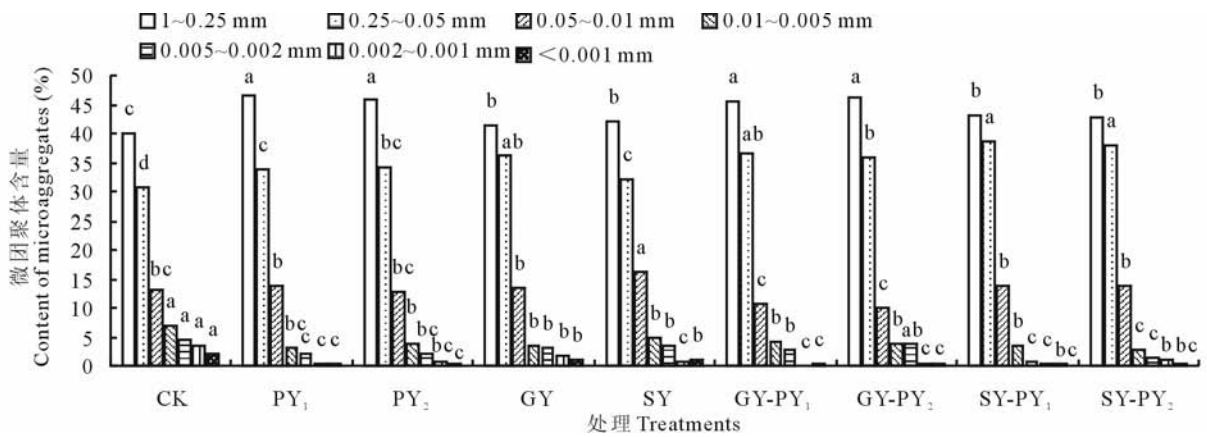


图 1 不同处理的土壤微团聚体组成

Fig. 1 Composition of soil micro-aggregates in different treatments

不同小写字母表示同一粒级不同处理土壤微团聚体含量在 $P<0.05$ 水平上差异显著。Different lowercase letters indicate that the content of soil micro-aggregates of the same particle-size with different treatments are significantly different at $P<0.05$ level.

1~0.05 mm 粒级范围内微团聚体含量则表现为“狗牙根+PAM”>“三叶草+PAM”>单施 PAM>单植草类>CK,其中 GY-PAM₁ 的此粒级微团聚体含量最大,为 82.23%。较之 CK,各试验处理该粒级范围的微团聚体含量均有所增加。在<0.01 mm 粒级范围内,各试验处理的此粒级微团聚体含量较之 CK 均有所减少。由此可见,与 CK 相比,各试验处理的大粒径微团聚体含量增加,小粒径的则减少。

同一处理不同粒级微团聚体含量亦存在差异。所有处理的 1~0.25 mm 粒级微团聚体含量均最大,<0.002 mm 粒级微团聚体含量均最小。所有处理的不同粒级土壤微团聚体含量均呈 $C_{1\sim0.25\text{ mm}} > C_{0.25\sim0.05\text{ mm}} >$

$C_{0.05\sim0.01\text{ mm}} > C_{0.01\sim0.005\text{ mm}} > C_{0.005\sim0.002\text{ mm}} > C_{<0.002\text{ mm}}$ 的顺序。所有处理的 1~0.25 mm 均为优势粒级, 0.25~0.05 mm 均为次优势粒级。

由图 1 亦可知,不同处理不同粒级土壤微团聚体整体分布特征有所不同。如所有处理间土壤微团聚体含量最小的粒级有所不同,CK、PAM₁、PAM₂、GY 和 SY-PAM₂ 的微团聚体含量最小的粒级均为 <0.001 mm,而 SY、GY-PAM₁、GY-PAM₂ 和 SY-PAM₁ 处理微团聚体含量最小的粒级均为 0.002~0.001 mm。

2.2 PAM 和草类对微团聚体结构特征的影响

评价土壤微团聚体结构特征常用的代表性指标有平均重量比表面积(MWSSA)、平均重量直径(MWD)、团聚状况、团聚度、分散系数和分散率等。

团聚体的 MWSSA 是反映土壤性质的综合指标之一,一般来讲,MWSSA 的值越大,土壤质地越细,分散性越强^[28]。由表 2 可知,土壤微团聚体 MWSSA 表现为 CK 最大,GY-PAM₁ 最小,CK 的微团聚体 MWSSA 均显著大于各试验处理,为最小值(GY-PAM₁, 60.90 cm²/g)的 3.33 倍。PAM₁、PAM₂、GY-PAM₁ 和 GY-PAM₂ 等 4 个试验处理的 MWSSA 彼此之间无显著性差异,且显著小于 GY 和 SY。SY-PAM₁ 和 SY-PAM₂ 的 MWSSA 无显著性差异。由此可见,CK 的土壤质地细,微团聚体结构稳定性差;与 CK 相比,各试验处理均有效降低了荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体 MWSSA,且其结构稳定性均优于 CK,其中 GY-PAM₁ 微团聚体结构稳定性最好。

表 2 不同处理的土壤微团聚体结构特征
Table 2 Structural characteristics of soil micro-aggregates in different treatments

处理名称 Treatments	平均重量比 表面积 MWSSA (cm ² /g)	平均重量直径 MWD (mm)	团聚状况 Aggregation states (%)	团聚度 Degree of aggregation (%)	分散系数 Dispersion coefficient (%)	分散率 Dispersion rate (%)
CK	203.07a	0.30a	23.88c	33.84c	13.99a	55.21a
PAM ₁	61.72e	0.34a	33.72a	41.94a	2.62c	36.76c
PAM ₂	67.56e	0.34a	33.60a	41.85a	2.33c	36.98c
GY	117.22b	0.32a	30.74b	39.71ab	7.00b	42.35b
SY	104.03c	0.32a	27.56b	37.12b	6.71b	48.31b
GY-PAM ₁	60.90e	0.35a	35.55a	43.23a	2.11c	33.33c
GY-PAM ₂	66.37e	0.34a	35.31a	43.07a	2.41c	33.78c
SY-PAM ₁	70.15d	0.33a	34.91a	42.79a	3.21c	34.53c
SY-PAM ₂	72.39d	0.33a	33.80a	42.00a	3.50c	36.61c

表中数据为平均值(n=3)。不同小写字母表示不同处理同一指标在 P<0.05 水平上差异显著。Data are means (n=3). Different lowercase letters indicate significant difference among treatments of the same parameter at the level of 0.05. MWSSA: Mean weight soil specific area; MWD: Mean weight diameter.

团聚体的平均重量直径(MWD)是反映土壤结构抗机械稳定性的综合指标之一^[29],一般来讲,MWD 的值越大,土壤团聚体结构稳定性越好,抗侵蚀性越强。由表 2 可知,所有处理的土壤微团聚体 MWD 介于 0.30~0.35 mm,最大为 GY-PAM₁ (0.35 mm),最小为 CK (0.30 mm),且处理之间土壤微团聚体 MWD 均无显著性差异。由此可见,CK 土壤抗侵蚀性最弱;较之 CK,各试验处理均有利于增加荒坡侵蚀劣地紫色土的微团聚体 MWD,土壤微团聚体结构稳定性和抗侵蚀性均有所增强。

团聚状况、团聚度、分散系数和分散率亦均为评价土壤团聚体结构稳定性的指标。一般来讲,团聚体的团聚状况和团聚度越高,其分散系数和分散率相应地则越低,结构稳定性和抗侵蚀性越强^[30]。由表 2 亦可知,土壤微团聚体团聚状况与团聚度均呈现“狗牙根+PAM”>“三叶草+PAM”>单施 PAM>单植草类>CK 的顺序,团聚状况与团聚度最大值分别为 35.55%和 43.23%(GY-PAM₁),最小值分别为 23.88%和 33.84%(CK)。CK 的微团聚体分散系数与分散率均显著大于各试验处理,分散系数与分散率最大值分别为 13.99%和 55.21%(CK),

最小值分别为 2.11%和 33.33%(GY-PAM₁)。GY-PAM₁、GY-PAM₂、SY-PAM₁ 和 SY-PAM₂ 等 4 个试验处理的土壤微团聚体团聚状况、团聚度、分散系数和分散率彼此之间均无显著性差异,且这 4 个试验处理的团聚状况与团聚度均显著大于单植草类;除“三叶草+PAM”分散系数大于单施 PAM 外,其他 3 个相互组合处理的分散系数和分散率均小于单施 PAM 和单植草类。由此可知,较之 CK,各试验处理均有效提高了荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体结构稳定性和抗侵蚀性,其中 GY-PAM₁ 的结构稳定性和抗侵蚀性最强。

2.3 PAM 和草类对微团聚体分形特征的影响

土壤微团聚体分形维数可以表征土壤的结构稳定性和抗侵蚀性,一般来讲,大粒径微团聚体含量越高,其分形维数越小,土壤结构稳定性和抗侵蚀性越强,反之,其分形维数则越大,土壤结构稳定性和抗侵蚀性相应地则越弱^[30]。由表 3 可知,所有处理的土壤微团聚体分形维数介于 2.148~2.467,最大值为 2.467(CK),最小值为 2.148(GY-PAM₁)。各试验处理的土壤微团聚体分形维数均小于 CK,GY-PAM₁、GY-PAM₂、SY-PAM₁ 和 SY-PAM₂ 等 4 个试验处理的土壤微团聚体分形维数均小于单植草类。

为了探讨不同处理的土壤微团聚体分形维数对不同粒径微团聚体分布的反映程度,在用回归分析法计算分形维数时得到了不同线性回归方程的决定系数,由表 3 可知,决定系数介于 0.958~0.982,这说明分形维数能够很好地反映各个处理不同粒径微团聚体分布特征,且参考价值很高。较之 CK,各试验处理均有效减小了荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体分形维数,进而增强了其结构稳定性和抗侵蚀性。较之单施 PAM 和单植草类,草类与 PAM 相互组合使用更有利于增强荒坡侵蚀劣地紫色土结构稳定性和抗侵蚀性。

表 3 不同处理的土壤微团聚体分形维数
Table 3 Fractal dimension of soil micro-aggregates in different treatments

项目 Item	CK	PAM ₁	PAM ₂	GY	SY	GY-PAM ₁	GY-PAM ₂	SY-PAM ₁	SY-PAM ₂
分形维数 Fractal dimension (D)	2.467	2.181	2.196	2.355	2.309	2.148	2.159	2.167	2.236
决定系数 Coefficient of determination	0.967	0.973	0.966	0.982	0.958	0.942	0.932	0.970	0.979

2.4 草类根系与微团聚体指标间的相关分析

试验期间,为避免枯落物的干扰,已人为及时清除。地下部分根系在稳定土壤结构、提高土壤抗侵蚀性方面的作用远大于地上部分^[31],故草类对微团聚体的影响主要为根系作用。因此本研究着重介绍草类根系与微团聚体指标间的相关分析。

2.4.1 根系指标 表 4 中,“狗牙根+PAM”含根土体的各项根系总体指标和径级指标均最优,其次是单植狗牙根,而单植三叶草含根土体的根系指标最差。值得指出的是,“狗牙根+PAM”含根土体的根系指标略优于单植狗牙根的,三叶草情况亦与狗牙根类似。所有含根土体处理的径级指标中, $d\leq 0.2\text{ mm}$ 径级的根系指标最优,径级根系指标均随着径级的增大而递减, $d\leq 0.2\text{ mm}$ 径级是优势径级, $0.2\text{ mm}<d\leq 0.5\text{ mm}$ 径级是次优势径级。

2.4.2 相关分析 根系总体指标与微团聚体结构特征指标间的相关分析见表 5。MWSSA、分散系数、分散率与总体指标的 RLD 均呈极显著或显著负相关,其中分散系数与 RLD 的相关系数(−0.754)最大。MWD、团聚状况、团聚度与总体指标的 RLD、RSAD 均呈极显著或显著正相关,其中团聚状况与 RLD 的相关系数(0.596)最大。除 MWD 外,其他微团聚体结构特征指标均与总体指标的 RSAD 呈极显著或显著相关。所有微团聚体结构特征指标与总体指标的 RVD、RWD 的相关性均不显著。由此可见,根系总体指标中,RLD 是影响荒坡侵蚀劣地紫色土结构稳定性和抗侵蚀性的主要因子,其次是 RSAD。

不同径级根系指标与微团聚体结构特征指标间的相关分析如表 5 所示。MWSSA、分散系数、分散率与 $d\leq 0.2\text{ mm}$ 径级、 $0.2\text{ mm}<d\leq 0.5\text{ mm}$ 径级的 RLD、RSAD 呈极显著或显著负相关,与 $d\leq 0.2\text{ mm}$ 径级的 RVD 呈显著负相关,这 3 个微团聚体结构特征指标与 $d\leq 0.2\text{ mm}$ 径级的相关系数均大于 $0.2\text{ mm}<d\leq 0.5\text{ mm}$ 径级的。MWD、团聚状况、团聚度与 $d\leq 0.2\text{ mm}$ 径级的 RLD、RSAD 呈极显著或显著正相关,与其他径级指标的相

关性均不显著。由此可见, $d \leq 0.2\text{ mm}$ 径级是影响荒坡侵蚀劣地紫色土结构稳定性和抗侵蚀性的关键径级, 其次是 $0.2\text{ mm} < d \leq 0.5\text{ mm}$ 径级。

表 4 含根土体的根系总体指标和径级指标
Table 4 The overall parameters and diameter parameters of root-soil complex

根系指标 Root parameters	处理名称 Treatments	总体指标 Overall parameters	径级指标 Diameter parameters				
			$d \leq 0.2\text{ mm}$	$0.2\text{ mm} < d \leq 0.5\text{ mm}$	$0.5\text{ mm} < d \leq 0.7\text{ mm}$	$0.7\text{ mm} < d \leq 0.9\text{ mm}$	$d > 0.9\text{ mm}$
根长密度 Root length density (RLD, $\times 10^{-2}\text{ cm/cm}^3$)	GY	12.543 \pm 0.386ab	10.396 \pm 1.925a	1.472 \pm 0.167abc	0.367 \pm 0.071ab	0.150 \pm 0.025b	0.158 \pm 0.012bc
	SY	6.021 \pm 0.609d	4.449 \pm 1.168b	0.979 \pm 0.404c	0.348 \pm 0.083b	0.111 \pm 0.009b	0.134 \pm 0.054c
	GY-PAM ₁	15.679 \pm 0.601a	12.697 \pm 0.395a	1.784 \pm 0.392a	0.597 \pm 0.206a	0.265 \pm 0.100a	0.336 \pm 0.112a
	GY-PAM ₂	13.313 \pm 0.955ab	11.367 \pm 3.124a	1.549 \pm 0.200ab	0.476 \pm 0.136ab	0.198 \pm 0.051ab	0.199 \pm 0.064ab
	SY-PAM ₁	7.668 \pm 0.519c	5.826 \pm 1.398b	0.998 \pm 0.267c	0.396 \pm 0.131ab	0.165 \pm 0.065ab	0.283 \pm 0.112ab
	SY-PAM ₂	7.146 \pm 0.976cd	5.306 \pm 1.428b	1.163 \pm 0.149bc	0.372 \pm 0.023ab	0.141 \pm 0.008b	0.164 \pm 0.034bc
根表面积密度 Root surface area density (RSAD, $\times 10^{-2}\text{ cm}^2/\text{cm}^3$)	GY	0.607 \pm 0.005ab	0.296 \pm 0.048a	0.148 \pm 0.017abc	0.067 \pm 0.013ab	0.039 \pm 0.006b	0.057 \pm 0.004b
	SY	0.377 \pm 0.005c	0.132 \pm 0.035b	0.100 \pm 0.041c	0.063 \pm 0.015b	0.029 \pm 0.002b	0.053 \pm 0.023b
	GY-PAM ₁	0.849 \pm 0.004a	0.355 \pm 0.011a	0.183 \pm 0.041a	0.110 \pm 0.038a	0.069 \pm 0.026a	0.132 \pm 0.039a
	GY-PAM ₂	0.696 \pm 0.009ab	0.325 \pm 0.087a	0.158 \pm 0.021ab	0.088 \pm 0.026ab	0.051 \pm 0.013a	0.074 \pm 0.023ab
	SY-PAM ₁	0.527 \pm 0.912bc	0.178 \pm 0.043b	0.104 \pm 0.028bc	0.073 \pm 0.024ab	0.043 \pm 0.017ab	0.129 \pm 0.056a
	SY-PAM ₂	0.448 \pm 0.008bc	0.158 \pm 0.049b	0.119 \pm 0.015bc	0.068 \pm 0.004ab	0.036 \pm 0.002b	0.067 \pm 0.016b
根体积密度 Root volume density (RVD, $\times 10^{-2}\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)	GY	0.095 \pm 0.007ab	0.049 \pm 0.001a	0.012 \pm 0.001ab	0.009 \pm 0.002ab	0.008 \pm 0.001b	0.017 \pm 0.002c
	SY	0.080 \pm 0.005c	0.035 \pm 0.001b	0.007 \pm 0.001b	0.005 \pm 0.001ab	0.008 \pm 0.002b	0.025 \pm 0.007bc
	GY-PAM ₁	0.180 \pm 0.003a	0.090 \pm 0.002a	0.016 \pm 0.004a	0.016 \pm 0.006a	0.014 \pm 0.005a	0.044 \pm 0.001ab
	GY-PAM ₂	0.111 \pm 0.003b	0.051 \pm 0.004a	0.013 \pm 0.002ab	0.013 \pm 0.004ab	0.011 \pm 0.003ab	0.023 \pm 0.007bc
	SY-PAM ₁	0.145 \pm 0.002ab	0.064 \pm 0.001b	0.009 \pm 0.002b	0.011 \pm 0.004ab	0.009 \pm 0.004ab	0.052 \pm 0.025a
	SY-PAM ₂	0.124 \pm 0.002b	0.075 \pm 0.002b	0.009 \pm 0.003b	0.016 \pm 0.002b	0.006 \pm 0.001b	0.018 \pm 0.008c
根重密度 Root weight density (RWD, mg/cm^3)	GY	0.019 \pm 0.002ab	—	—	—	—	—
	SY	0.010 \pm 0.001b	—	—	—	—	—
	GY-PAM ₁	0.028 \pm 0.004a	—	—	—	—	—
	GY-PAM ₂	0.022 \pm 0.001ab	—	—	—	—	—
	SY-PAM ₁	0.019 \pm 0.002ab	—	—	—	—	—
	SY-PAM ₂	0.017 \pm 0.001ab	—	—	—	—	—

注:表中数据为平均值 \pm 标准差($n=3$);不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。
Note: Data are means \pm standard deviation ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences at the level of 0.05.

3 讨论

荒坡侵蚀劣地紫色土由于长期严重的水土流失,其土壤表层流失殆尽,仅存的少量粗骨性砾石土抗侵蚀性极弱,因此设法提高荒坡侵蚀劣地紫色土的抗侵蚀性、有效控制其进一步的水土流失极为重要。研究发现,荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体组成分布极为不均,表现在 $>0.01\text{ mm}$ 粒级微团聚体含量偏高,而 $<0.01\text{ mm}$ 粒级微团聚体含量却偏低,这与黄炎和等^[32]的研究结果类似。较之 CK,各试验处理虽不能改善荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体组成不均的状况,但可以有效提高其土壤结构稳定性和抗侵蚀性。

各处理的土壤微团聚体分布特征具有显著性差异。较之 CK,各试验处理均有助于增加荒坡侵蚀劣地紫色土大粒径微团聚体含量,减少小粒径微团聚体含量,这与已有的 PAM 或草类对土壤团聚体影响的研究结果类

似^[17,33]。与 CK 相比,各试验处理均有助于降低 MWSSA、分散系数和分散率,增加 MWD、团聚状况和团聚度,提高侵蚀劣地土壤团聚体结构抗机械稳定性和抗侵蚀性,其中以 GY-PAM₁ 的改善效果最好。究其原因,PAM 是高分子链网状聚合物,含有大量的酰胺基,本身带有电荷,能够以吸附、缠绕和贯穿等方式捕捉分散土粒^[34],并通过搭桥效应(本质是范德华吸引力)来促使土壤团聚体凝聚^[18],形成复杂、稳定的 PAM-土壤团聚体网络复合结构,从而使得大粒径土壤微团聚体含量增加,并形成一定数量的胶体物质^[35],增强了土壤的抗侵蚀性能;草类具有发达的根系系统,根系网络串联作用、根土粘结作用和根系分泌物的胶结作用能够凝聚分散土粒形成较大的团聚体;根据李建兴等^[36]的研究,草类根系与土壤的接触面构成了较好的导水通道,能够增加土壤的有效生物孔隙数目,可能更有利于 PAM 大分子链网状聚合物沿着有效生物孔隙由地表渗透到深层土壤,使得 PAM 与土粒的复合作用(吸附、缠绕和贯穿等)更加充分。而草类与 PAM 相互组合使用,则兼具了单施 PAM 和单植草类各自的效果,其对侵蚀劣地土壤的改善效果更优。

表 5 根系指标与微团聚体指标间的相关分析

Table 5 Correlation analysis between root parameters and soil micro-aggregates parameters

根系指标		平均重量比	平均重量	团聚状况	团聚度	分散系数	分散率
Root parameters		表面积	直径	Aggregation	Degree of	Dispersion	Dispersion
		MWSSA	MWD	states	aggregation	coefficient	rate
总体指标	RLD	-0.737 **	0.454 *	0.596 **	0.585 **	-0.754 **	-0.722 **
Overall parameters	RSAD	-0.577 **	0.418	0.475 *	0.512 *	-0.519 *	-0.570 **
	RVD	-0.439	0.280	0.362	0.403	-0.392	-0.411
	RWD	-0.112	0.193	0.167	0.189	-0.231	-0.245
径级指标	RLD _{0.2}	-0.824 **	0.590 **	0.625 **	0.612 **	-0.875 **	-0.867 **
Diameter parameters	RLD _{0.5}	-0.574 **	0.384	0.426	0.507	-0.543 **	-0.560 **
	RLD _{0.7}	-0.332	0.207	0.342	0.440	-0.438	-0.406
	RSAD _{0.2}	-0.670 **	0.467 *	0.573 **	0.565 **	-0.725 **	-0.702 **
	RSAD _{0.5}	-0.526 *	0.298	0.354	0.419	-0.581 **	-0.511 *
	RSAD _{0.7}	-0.297	0.229	0.247	0.300	-0.437	-0.421
	RVD _{0.2}	-0.455 *	0.414	0.446	0.466	-0.479 *	-0.453 *
	RVD _{0.5}	-0.319	0.262	0.334	0.347	-0.351	-0.316
	RVD _{0.7}	-0.235	0.202	0.237	0.259	-0.283	-0.236

注:“*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;“**”表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关;RLD_x,RSAD_x,RVD_x(x=0.2,0.5,0.7)分别表示 d≤0.2 mm、0.2 mm<d≤0.5 mm、0.5 mm<d≤0.7 mm 径级的根长密度,根表面积密度,根体积密度。

Note: “*” and “**” indicate significant correlations at the level of 0.05 and 0.01 respectively, under bilateral inspection. RLD_x, RSAD_x, RVD_x(x=0.2, 0.5, 0.7) indicate root length density, root surface area density, root volume density in different root diameters, which are d≤0.2 mm, 0.2 mm<d≤0.5 mm, 0.5 mm<d≤0.7 mm.

本研究发现,在狗牙根整体长势相同的条件下,GY-PAM₁ 对侵蚀劣地土壤性质的改善效果略优于 GY-PAM₂,其原因可能与 PAM 浓度有关。龙明杰等^[34]对聚丙烯酰胺施用量增加>0.25 mm 水稳性团粒含量效果的研究表明,超过最佳施用量时,单位聚丙烯酰胺用量在提高土壤>0.25 mm 水稳性团粒数量的效果上随着聚丙烯酰胺用量的增加而下降。在一定的浓度梯度范围内,本研究中 PAM 提高微团聚体结构稳定性的效果可能随浓度的增加呈先升高后下降的态势,即存在一个峰值浓度。由于本研究只设置了两个浓度(30 和 60 g/m³),不足以反映 PAM 浓度梯度变化对土壤微团聚体组成分布和结构状况的影响,需要进一步完善试验并加以研究。

“草类+PAM”的根系总体指标和径级指标均优于单植草类,这可能是 PAM 增加土壤通透性和保水性,从而促进根系生长。根系总体指标 RLD 和 d≤0.2 mm 径级(须根径级)分别是影响土壤微团聚体指标的主要因子

和关键径级, Csilla 等^[37]对量化高山植被根系影响土壤团聚体稳定性的研究亦证实了这一点, 分析原因: 一方面极细根的密集分布可以增加根系与土粒的接触面积, 大量根系分泌物可充分地胶结、笼络根系周围的微小土壤颗粒, 增大了根系与微小土壤颗粒之间的范德华吸引力, 这可能对于形成大粒径土壤团聚结构有利; 另一方面, 根据 Amezketa^[38]的观点, 极细根萎缩腐解转化为腐殖质, 腐殖质可作为“胶结剂”与微小土壤颗粒以多价阳离子为“键桥”而“粘”在一起, 使得微团聚体的结构稳定性和抗侵蚀性有所增强^[18]。陶俊^[33]就不同护坡草本根系分布对土壤理化性质影响的研究表明, $0.5\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$ 对微团聚体影响最大, 而非须根径级, 这与本研究结果有所不同, 具体原因有待于试验查明。目前根系指标对土壤微团聚体影响机理的研究仍较薄弱, 今后还应继续加强此方面的研究。

4 结论

(1) 通过对比各处理的土壤微团聚体分布特征可知, 同一粒级不同处理和同一处理不同粒级微团聚体含量均存在明显的差异。较之 CK, 单施 PAM、单植草类、“草类+PAM”的大粒径微团聚体含量增加, 小粒径的则减少。所有处理中, 微团聚体的 $1 \sim 0.25\text{ mm}$ 粒级为优势粒级, $0.25 \sim 0.05\text{ mm}$ 粒级为次优势粒级。

(2) 与 CK 相比, 单施 PAM、单植草类、“草类+PAM”的 MWSSA、分散系数和分散率均显著减小, MWD、团聚状况和团聚度均显著增大。GY-PAM_I 土壤的各项微团聚体结构特征指标均优于其他试验处理, 其土壤结构稳定性和抗侵蚀性最好。

(3) 单施 PAM、单植草类、“草类+PAM”均减小了侵蚀劣地土壤微团聚体分形维数, 增强了土壤的抗侵蚀性。GY-PAM_I 的土壤微团聚体分形维数 ($D=2.148$) 最小。

(4) “草类+PAM”的根系总体指标和径级指标均优于单植草类。所有含根土体处理的径级指标中, $d \leq 0.2\text{ mm}$ 是优势径级, $0.2\text{ mm} < d \leq 0.5\text{ mm}$ 是次优势径级。平均根长密度 (RLD) 和根系径级 $d \leq 0.2\text{ mm}$ 分别是影响荒坡侵蚀劣地紫色土结构稳定性和抗侵蚀性的主要因子和关键径级, 其次是平均根表面积密度 (RSAD) 和 $0.2\text{ mm} < d \leq 0.5\text{ mm}$ 径级。

参考文献 References:

- [1] Fan R. Research on the Development Trend of Upper Reaches of Yangtze River and Preliminary Study on the Influencing Factors. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
樊融. 长江上游水土流失及影响因素初探. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [2] Zhang B J, Xiong D H, Guo M, *et al.* The correlation between soil moisture and grass growth in different slope positions of gully badlands in Dry-hot valley. *Pratacultural Science*, 2015, 32(5): 686-693.
张宝军, 熊东红, 郭敏, 等. 干热河谷冲沟侵蚀劣地不同坡位草被生长和土壤水分关系研究. *草业科学*, 2015, 32(5): 686-693.
- [3] Soil Science Noun Authorized Committee. China National Committee for Terms in Natural Sciences (pedology noun 1988). Beijing: Science Press Ltd., 1988.
土壤学名词审定委员会. 全国自然科学名词审定委员会公布(土壤学名词 1988). 北京: 科学出版社, 1988.
- [4] Guo Z, Wu Y X. Scalable Researches on Landscapes Planning for Badlands. Beijing: Chinese Society of Landscape Architecture, 2009.
郭峥, 吴宜夏. 扩展性劣地型景观规划方法探索. 北京: 中国风景园林学会 2009 年会, 2009.
- [5] Gallart F, Marignani M, Pérez-Gallego N, *et al.* Thirty years of studies on badlands, from physical to vegetational approaches. A succinct review. *Catena*, 2013, 106: 4-11.
- [6] Guerrero-Campo J, Palacio S, Montserrat-Martí G. Plant traits enabling survival in Mediterranean badlands in northeastern Spain suffering from soil erosion. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(4): 457-464.
- [7] Alatorre L C, Beguería S, Vicente-Serrano S. Evolution of vegetation activity on vegetated, eroded, and erosion risk areas in the central Spanish Pyrenees, using multitemporal Landsat imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(3): 309-319.
- [8] Bochet E, García-Fayos P, Poesen J. Topographic thresholds for plant colonization on semi-arid eroded slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(13): 1758-1771.
- [9] Higuchi K, Chigira M, Lee D H. High rates of erosion and rapid weathering in a Plio-Pleistocene mudstone badland, Taiwan,

China. Catena, 2013, 106: 68-82.

- [10] Ding G M, Lin F X, Shi Y Z, *et al.* Study on eroded land self-rehabilitation of ecologic system by the initial help of vetiver grass hedgerow. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(2): 116-118.
丁光敏, 林福兴, 施悦忠, 等. 香根草篱带促进侵蚀劣地生态自我修复初探. 水土保持研究, 2003, 10(2): 116-118.
- [11] Yue H, Chen Z B, Huang Y H. Adaptability of *Pennisetum purpureum* to eroded badlands of granite and its effects of soil and water conservation. Journal of Fujian Agricultural University: (Natural Science Edition), 2007, 36(2): 186-189.
岳辉, 陈志彪, 黄炎和. 象草在花岗岩侵蚀劣地的适应性及其水土保持效应. 福建农林大学学报(自然科学版), 2007, 36(2): 186-189.
- [12] Yi Y L. Soil Physical Method. Beijing: Peking University Press, 2009.
依艳丽. 土壤物理研究法. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [13] Wang Z, Zhang Y L, Yu N, *et al.* Effects of freezing-thawing on characteristics and fractal dimension of soil microaggregates. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 83-88.
王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响. 土壤学报, 2013, 50(1): 83-88.
- [14] Chen L H. Basic Mechanical Properties of Tree Roots. Beijing: Science Press Ltd., 2012.
陈丽华. 林木根系基本力学性质. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] Braynr B. The influence of some soil conditioners on soil properties; laboratory tests on Kenyan soil samples. Soil Technology, 1992, 5: 225-247.
- [16] Janczuk B, Bialopiotrozinz T, Kliszcz A, *et al.* Influence of polyacrylamide on the surface free energy and wettability of a chernozem soil. Geoderma, 1991, 50: 173-184.
- [17] Li H K, Lin J S, Huang Y H, *et al.* Vertical migration characteristics of PAM and its effect on soil micro-aggregates in red soil of tea garden after PAM application. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 167-171.
李洪康, 林金石, 黄炎和, 等. 茶园红壤施用 PAM 后的垂直迁移特征及其对土壤微团聚体的影响. 水土保持学报, 2015, 29(5): 167-171.
- [18] Huang X R, Li H, Li S, *et al.* Effect of coupling of electric field and organic macromolecular on soil aggregate stability. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 734-742.
黄学茹, 李航, 李嵩, 等. 土壤电场与有机大分子的耦合对土壤团聚体稳定性的影响. 土壤学报, 2013, 50(4): 734-742.
- [19] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines. Soil Research, 2000, 38(2): 313-328.
- [20] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2176-2183.
彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [21] Su J. Discussion of Influence of Vegetation Restoration on Stability of Soil Aggregate and the Pool of Carbon in Ning-Nan Area. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2005.
苏静. 宁南地区植被恢复对土壤团聚体稳定性及碳库的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- [22] Han J Q, Gao X F, Lu B J, *et al.* Research on the influence of measures of soil and water conservation on the water-stable microaggregates in cinnamon soil. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6): 50-53.
韩加强, 高晓飞, 路炳军, 等. 水土保持措施对褐土水稳性大团聚体的影响研究. 水土保持研究, 2012, 19(6): 50-53.
- [23] Chen Y J, Peng S L, Chen Y, *et al.* Soil erosion control effectiveness of *Vetiveria zizanioides* root system in the purple soil cropland. Pratacultural Science, 2015, 32(4): 485-491.
陈义君, 彭石磊, 湛芸, 等. 紫色土坡耕地香根草根系的固土抗蚀效应. 草业科学, 2015, 32(4): 485-491.
- [24] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis. Beijing: Science Press, 1978.
中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978.
- [25] Yan J M, He L J, He B H, *et al.* Effects of different governance patterns of small watershed on fractal features of soil micro-aggregates in the hilly areas of central Sichuan Basin. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(11): 1294-1300.
闫建梅, 何联君, 何丙辉, 等. 川中丘陵区不同治理模式对土壤微团聚体分形特征的影响. 中国生态农业学报, 2014, 22(11): 1294-1300.
- [26] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal characteristics measured by mass of particle-size distribution. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [27] Chen Y, He B H, Lian C X, *et al.* Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5173-5181.

- 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能. 生态学报, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [28] Qin Y D. Soil Physics. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- 秦耀东. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [29] Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 241-247.
- 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响. 土壤学报, 2009, 46(2): 241-247.
- [30] Dai W C, Gao M, Wang Z F, *et al.* Composition and fractal features of soil micro-aggregates under different land-use types in Purple Hilly Area. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 259-264.
- 代文才, 高明, 王子芳, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式土壤剖面微团聚体组成及分形特征. 水土保持学报, 2016, 30(6): 259-264.
- [31] Liu D H, Li Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 34-37.
- 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37.
- [32] Huang Y H, Lu C L, Huang M L, *et al.* The soil fertility characteristics and the fostering of the eroded inferior land in South Fujian. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993, (2): 1-4.
- 黄炎和, 卢程隆, 黄民彝, 等. 闽南侵蚀劣地土壤肥力特征及其培肥研究. 水土保持通报, 1993, (2): 1-4.
- [33] Tao J. Time-scale Effect of Different Herb Plant Roots Distribution on Soil Physical and Chemical Properties in the Three Gores Reservoir Area. Chongqing: Southwest University, 2013.
- 陶俊. 三峡库区不同护坡草本根系分布对土壤理化性质的时间尺度效应. 重庆: 西南大学, 2013.
- [34] Long M J, Zhang H W, Chen Z Q, *et al.* Studies on polymeric soil structure amendments Ⅲ. Amelioration to lateritic red soil by polyacrylamide. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(1): 9-13.
- 龙明杰, 张宏伟, 陈志泉, 等. 高聚物对土壤结构改良的研究 Ⅲ. 聚丙烯酰胺对赤红壤的改良研究. 土壤通报, 2002, 33(1): 9-13.
- [35] Yuan X F, Wang Y K, Wu P T, *et al.* Effects and mechanism of PAM on soil physical characteristics. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 37-40.
- 员学锋, 汪有科, 吴普特, 等. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析. 水土保持学报, 2005, 19(2): 37-40.
- [36] Li J X, He B H, Chen Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1535-1544.
- 李建兴, 何丙辉, 湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [37] Csilla H, Silvia S, Michele D, *et al.* Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine. International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5: 36-42.
- [38] Amezketa E. Soil aggregate stability: a review. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14: 83-151.