

引用格式: 杨柳生, 高若允, 孙凡, 吉益, 林勇明. 泥石流频发流域失稳性坡面植物群落特征及生态系统碳储量[J]. 山地学报, 2022, 40(3): 355-368.

YANG Liusheng, GAO Ruoyun, SUN Fan, JI Pen, LIN Yongming. Plant community and ecosystem carbon stocks in the unstable slopes subjected to high-frequency debris flow [J]. Mountain Research, 2022, 40(3):355-368.

泥石流频发流域失稳性坡面植物群落特征 及生态系统碳储量

杨柳生^{1,2,3}, 高若允^{1,2,3}, 孙凡^{1,2,3}, 吉益¹, 林勇明^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所
山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002)

摘要: 植物群落的更替发展改变其生境特征、群落内部的生活状况, 影响着陆地生态系统的碳循环和碳平衡。针对植物群落变化过程与碳储量分布间耦合关系, 以及灾害频发区生态系统的固碳能力、碳源汇识别等方面的科学认知并不充分, 当前无法完全理解灾害干扰形成的失稳性坡面上植物群落特征变化对生态系统碳储量的影响机制。本文以蒋家沟流域不同垂直气候带失稳性坡面各区段(稳定区、失稳区和堆积区)植物群落为研究对象, 通过野外植被调查和室内试验, 对群落差异及生态系统碳储量间的关系进行综合分析。结果表明: (1) 植物物种数和 Margalef 多样性指数随坡面区段向下呈逐渐增加的趋势, 而植被盖度则逐渐减少, 这与堆积区缺乏明显的优势物种有关。(2) 各坡面不同区段均以多年生植物占优势, 禾本科和菊科植物分布广但仅在干热河谷区占较高优势; 从稳定区到堆积区, 全流域不同生活型的植物重要值表现为: 一年生植物和菊科植物逐渐增大, 多年生植物和禾本科植物先增后减, 其他科植物则先减后增。(3) 各坡面植被碳储量均表现为稳定区显著高于失稳区和堆积区 ($P < 0.05$), 除多照沟阳坡外, 土壤碳储量与生态系统碳储量均表现为稳定区显著高于堆积区 ($P < 0.05$)。 (4) 植被盖度、凋落物生物量均与生态系统碳储量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而一年生草本植物重要值与生态系统碳储量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 表明植被盖度高且受灾害干扰较少的稳定区植物群落固碳能力高于堆积区。本研究分析山地灾害频发区坡面植被群落结构和多样性与生态系统碳储量关系, 可为植物措施的合理配置、生态修复及固碳管理等提供科学依据。

关键词: 群落特征; 碳储量; 失稳性坡面; 区段; 植物多样性; 蒋家沟

中图分类号: S718.55

文献标志码: A

植被和土壤作为陆地生态系统的两大碳库, 在碳循环中起到重要的纽带作用^[1]。植物是陆地生态系统碳输入的重要来源, 其残体及分解过程影响土壤碳的输入。植物群落类型、多样性以及密度的

不同可引起植被碳储量的差异性^[1-5]。植物群落的发展和变化不仅可以改变其生境特征、群落内部的生活状况^[6], 还可直接或间接影响陆地生态系统的碳循环和碳平衡^[7], 在减少大气碳排放、增加碳汇

收稿日期 (Received date): 2021-09-30; **改回日期** (Accepted date): 2022-04-13

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(42071132); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金(20190402); 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)。[National Natural Science Foundation of China (42071132); Research Fund of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences (20190402); Outstanding Young Scientific Research Project of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq2017016)]

作者简介 (Biography): 杨柳生(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 森林资源管理。[YANG Liusheng (1995-), male, born in Sandu, M. Sc. candidate, research on forest resource management] E-mail: liushengy923@126.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 林勇明(1982-), 男, 福建福安人, 博士, 教授, 主要研究方向: 恢复生态学。[LIN Yongming (1982-), male, born in Fu'an, Fujian province, Ph. D., professor, research on restoration ecology] E-mail: monkey1422@163.com

等方面具有重要的指示意义。

植被碳储量随着植被密度和物种多样性的增加而增加^[8],反之则不断下降^[9],进而导致土壤有机碳输入减少^[10],最终引起生态系统碳储量下降。植被恢复过程中,生态系统碳储量会随群落盖度、禾草、豆科以及多年生植物的重要值、植被生物量等的增大呈显著增加的趋势,但杂草和一年生植物重要值的增加则会降低生态系统碳储量^[10]。目前,前人大多单一的分析土壤碳储量或植被碳储量,研究包括不同物种、不同林龄间植被碳储量的差异^[11-12],以及不同植被类型、群落演变条件下土壤碳储量的变化特征^[2,13-14],对植物群落变化过程与碳储量分布间耦合关系的综合性研究仍比较缺乏^[10],此外,研究对象为荒漠、草地、湿地、森林等典型陆地生态系统^[15],较少关注灾害频发区生态系统的固碳能力、碳储量分布特征等问题^[16],阻碍了对灾害干扰形成的失稳性坡面上植物群落特征变化对生态系统碳储量的影响机制的认识。

蒋家沟为中国西南山区泥石流频发流域,是典型的生态环境脆弱区^[17]。近年来,相关学者致力于该流域生态脆弱区的修复工作,生态环境得到初步改善^[17-18]。然而,受矿产开采及滥砍滥伐的影响,坡面植被稀疏且以草本植物为主^[16,19-20],滑坡、泥石流等地质灾害的干扰形成数量众多的失稳性坡面,进而导致植物群落正向演替规律失常^[21],难以发挥正常的水土保持及固碳作用,因此,如何促进植被正向演替、提高固碳能力成为蒋家沟生态恢复治理的关键性问题。鉴于此,本文依托蒋家沟流域,探究生态脆弱区植物群落特征与生态系统碳储量分布特征的关系,分析失稳性坡面碳储量的变化规律及差异原因,为该地区科学配置植物措施、合理进行生态修复及固碳管理等提供数据支撑和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蒋家沟是小江流域最具代表性的一条大型泥石流沟,位于云南省昆明市东川区绿茂乡境内(26°13'N~26°17'N,103°06'E~103°13'E),距东川市23.7 km,流域面积约48.52 km²。蒋家沟流域地处世界深大断裂带,地质侵蚀强烈,沟壑纵横、地势陡峭,坡度>25°的区域超过61%,流域海拔分布范

围为1041~3269 m,土壤类型主要为山地燥红壤和山地棕黄壤。蒋家沟流域干湿季节分明,降雨集中于夏季,海拔较低处的干热河谷区多年年均降水量与年蒸发量分别为691 mm和3752 mm,年均温度为20.2℃(-6.2℃~40.9℃)。受复杂的地形和海拔差异的影响,其气候类型产生了多样化,从河谷到分水岭可分为植被稀疏的亚热带干热河谷区、泥石流固体物质主要源区的亚热带和暖温带半湿润区、植被覆盖率较高的温带湿润山岭区^[22]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及样方布设

2017年7—9月,在蒋家沟3个气候区的典型阴坡和阳坡上选取了形成历史40a左右、受人类活动干扰较少的5个标准样地,每个样地面积为50 m×400 m,其中,亚热带和暖温带半湿润区村落聚集、人类活动频繁,未发现合适的样地,故只选择了1个阳坡样地——受干扰程度较少的多照沟阳坡;在亚热带干热河谷气候区内选取大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡;温带湿润山岭区内选取大地阴坡和小尖风阳坡。根据各样地坡面稳定程度和地形地貌等特征将失稳性坡面划分为面积均大于500 m²的稳定区、失稳区和堆积区3个区段,各区段间相对高程均在50 m以上。关于各区段划分依据详见文献^[20]。样地基本概况见表1^[23]。

对选取的5个失稳性坡面不同区段进行植被调查(包括稳定区人工林和其他区段自然植被),考虑到乔木和灌木仅分布在大地阴坡(幼龄林阶段)、小尖风阳坡(幼龄林阶段)和多照沟阳坡(中龄林阶段)的稳定区,因此在这3块样地的稳定区内各随机设置了3个20 m×20 m的标准乔木样方和3个5 m×5 m灌木样方,各区段内同样随机设置1 m×1 m的草本样方各3个,在查菁沟阳坡和大凹子沟阴坡各区段分别随机设置9个1 m×1 m草本样方,5个样地共设置了9个乔木样方、27个灌木样方和81个草本样方。

1.2.2 植被调查与样品采集

在每个样方内调查植被类型、物种数以及植被盖度、高度等。采用刈割法对样方中草本植物进行取样,去除其表面泥土,并进行植物地上、地下部分分离以测定地上、地下生物量。仅大地阴坡、小尖风阳坡、多照沟阳坡3个样地的稳定区内收集到凋落物,其他坡面区段因以草本植物为主,地表植被稀

表 1 样地基本概况

Tab. 1 Characteristics of sample plots

气候区	失稳性坡面	经纬度	区段	海拔/m	坡度/(°)	坡向	主要物种
温带湿润山岭区	I	103°11'49"E, 26°16'32"N	稳定区	3150	27	NE	黄独、鹅绒委陵菜、画眉草
			失稳区	3075	35	NE	鹅绒委陵菜、香薷、紫苑
			堆积区	2950	45	NE	野棉花、东方草莓、景天
	II	103°10'55"E, 26°16'46"N	稳定区	3200	30	SE	云南松、老鹳草、广布野豌豆
			失稳区	3025	38	SE	毛马唐、牛至、广布野豌豆
			堆积区	2950	50	SE	牛筋草、香薷、牛至
亚热带和暖温带 半湿润区	III	103°11'02"E, 26°14'29"N	稳定区	2225	20	E	云南松
			失稳区	2175	37	E	茅、艾、艾纳香
			堆积区	2050	45	E	铁苋菜、艾、菊叶香藜
亚热带干热河谷	IV	103°8'30"E, 26°14'38"N	稳定区	1575	16	NE	扭黄茅、拟金茅
			失稳区	1525	25	NE	扭黄茅
			堆积区	1475	30	NE	鬼针草
	V	103°8'01"E, 26°15'06"N	稳定区	1550	25	S	扭黄茅、黄背草、田菁
			失稳区	1450	30	S	田菁、苎草、扭黄茅
			堆积区	1350	40	S	扭黄茅、苎草、铁苋菜

注:1. I、II、III、IV、V分别代表大地阴坡、小尖风阳坡、多照沟阳坡、大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡;NE、SE、E、S分别代表东北、东南、东、南。

2. 黄独 *Dioscorea bulbifera*; 鹅绒委陵菜 *Potentilla anserine*; 画眉草 *Eragrostis pilosa*; 香薷 *Elsholtzia ciliata*; 紫苑 *Aster tataricus*; 野棉花 *Anemone vitifolia*; 东方草莓 *Fragaria orientalis*; 景天 *Androsace bulleyana*; 云南松 *Pinus yunnanensis*; 老鹳草 *Geranium wilfordii*; 广布野豌豆 *Vicia cracca*; 毛马唐 *Digitaria chrysolephara*; 牛至 *Origanum vulgare*; 牛筋草 *Eleusine indica*; 茅 *Imperata cylindrica*; 艾 *Artemisia argyi*; 艾纳香 *Blumea balsamifera*; 菊叶香藜 *Chenopodium foetidum*; 扭黄茅 *Heteropogon contortus*; 拟金茅 *Eulaliopsis binata*; 鬼针草 *Bidens pilosa*; 黄背草 *Themeda japonica*; 田菁 *Sesbania cannabina*; 苎草 *Arthraxon hispidus*; 铁苋菜 *Acalypha australis*。

疏,受焚风作用凋落物极少,且易分解并被地表径流带走,未收集到凋落物,故植被生物量未将乔灌层及凋落物层生物量计算在内。因此,本研究在具有乔灌分布的样方(大地阴坡、小尖风阳坡、多照沟阳坡的稳定区)中随机设置3个20 cm × 20 cm的小样方,采用全部收获法进行凋落物层的取样。因失稳区、堆积区土壤结构发生重组且土层浅薄(小于20 cm),土壤采集后易造成滑坡以及水土流失等,所以仅采集土壤表层0~20 cm的土壤样品,采集完成后回填土壤并压实。在草本样方内对角线中心设置1个体积为40 cm × 20 cm × 20 cm(长×宽×深)的取样坑,使用100 cm³环刀采取0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm土层样品,每层3个重复,用于测量土壤容重。然后采集各层未扰动土壤,重复3次,放置实验室风干后测定土壤理化性质。

1.2.3 测定方法

由于本研究区样地仅见云南松一种乔木,故云

南松生物量公式参考罗恒春^[24]等人的方法,公式如下:

$$B = aV + b \quad (1)$$

式中, B 为生物量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); V 为林分蓄积量($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$); a 、 b 分别为蓄积量与生物量转换模型参数,根据方精云^[25]等提出的林分蓄积量与生物量转换模型, a 、 b 分别取值0.52和0。关于失稳性坡面灌木碳储量的研究尚少,无统一标准,坡面灌木根系发达,难以采集,挖掘过程中容易破坏坡面稳定性,为避免破坏生态系统稳定性,故未采集坡面灌木,采用秦岭—淮河以南灌木林平均生物量值 $19.76 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-2}$ ^[26-27]。测定植物鲜重后,放入烘箱80℃下烘干后称量其干重,根据干重与鲜重比求得草本植被生物量,将采集到的凋落物80℃烘干至恒重,称重并计算单位面积凋落物量,最后计算植被碳储量。环刀采集的土壤在105℃下烘干后,测量干重并计算土壤容重,采用硫酸-重铬酸钾外加热法测

定土壤有机碳。

1.2.4 数据处理

多样性指数计算公式如下^[4]：

$$\text{重要值} = (\text{相对高度} + \text{相对密度} + \text{相对盖度}) / 300 \quad (2)$$

$$\text{相对高度} = (\text{某个种的平均高} / \text{所有种的平均高总和}) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{相对多度} = (\text{某个种的个体数量} / \text{所有种的个体数量总和}) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{相对盖度} = (\text{某个种的盖度} / \text{所有种的盖度总和}) \times 100 \quad (5)$$

物种多样性采用物种数 S 、丰富度指数 (Margalef) M 、优势度指数 (Simpson) D 、香农维纳尔 (Shannon-Wiener) 指数 H 和均匀度指数 (Pielou) E 等 5 个指标进行分析,物种多样性越大表示植物群落物种丰富程度越大、稳定性越高,公式如下^[13-14]：

$$M = (S - 1) / \ln S \quad (6)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (7)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (8)$$

$$E = H / \ln S \quad (9)$$

式中, p_i 为第 i 个物种占总个体数的比例 ($p_i = N_i / N$, N_i 为样方中第 i 种物种的个体数; N 为全部物种的个体总数); S 为样方内物种总数。

植被碳储量测定^[10]: 根据生物量回归方程计算出云南松生物量后,利用生物量与转换系数计算其碳储量:

$$C_p = B \times C_f \quad (10)$$

式中, C_p 为植被碳储量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); C_f 为含碳率 (%)。本研究采用国际上常用的含碳率为 0.50 来计算乔木碳储量,灌木含碳率为 0.49,草本含碳率为 0.40,凋落物含碳率为 0.39^[28],最后将乔木、灌木、草本以及凋落物碳储量相加获得植被的碳储量^[29]。

土壤碳储量计算公式^[30]:

$$C_s = B_D \times h \times C_{\text{SOC}} \times 10^{-2} \quad (11)$$

式中, C_s 为土壤碳储量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); B_D 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土壤深度 (cm); C_{SOC} 为土壤有机碳的含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.2.5 数据分析

采用 Excel 2019 软件进行数据的处理及制图、

采用 SPSS 25.0 做单因素方差分析 (one-way ANOVA), LSD 进行分析组间差异性、不同指标间相关性采用 pearson 相关分析,碳储量数据采用平均值 \pm 标准误差表示,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 失稳性坡面植物群落特征

通过野外实地调查,发现并记录了 65 科 134 种植物,乔木仅有云南松 1 种,灌木 15 种,草本 118 种,菊科、禾本科、蔷薇科和唇形科等为常见种植物且占有较高的优势度。失稳性坡面不同区段植物群落特征有所差异 (表 2),由于稳定区仅云南松一种乔木,因此乔木层无多样性指数,4 个物种 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数及 Pielou 指数在大地阴坡、小尖风阳坡和大凹子沟阴坡均表现为堆积区大于稳定区,在多照沟阳坡和查菁沟阳坡则相反。各坡面群落盖度均表现为稳定区大于失稳区和堆积区,灌草层植物群落平均高度在大地阴坡从大到小依次为堆积区、稳定区、失稳区,其他失稳性坡面区段均表现为稳定区大于堆积区。

就全流域而言,物种数和 Margalef 多样性指数均表现为从稳定区到堆积区逐渐增大,且堆积区显著高于稳定区 ($P < 0.05$)。Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数由大到小依次为堆积区、稳定区、失稳区,但均未表现出显著差异。群落盖度由大到小依次为稳定区、失稳区、堆积区 ($0.34 \pm 0.11 \sim 0.79 \pm 0.11$),其中稳定区显著高于堆积区 ($P < 0.05$)。

重要值可表示某一植物种在该群落的优势程度,失稳性坡面不同区段物种生活型和功能群存在差异 (图 1、图 2),5 个失稳性坡面中,仅大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡稳定区发现灌木分布,其在灌草层中占有一定优势度 (34.41% ~ 53.05%)。总体而言,多年生草本植物在各区段占据绝对优势 (61.93% ~ 77.57%),从稳定区到堆积区表现为先增加后减少的趋势,而一年生草本植物则不断增加 (12.72% ~ 36.89%)。禾本科和菊科植物在蒋家沟流域失稳性坡面具有相对较广的分布范围,从稳定区到堆积区总体表现为:禾本科植物先增多后减少,其他科植物反之,菊科植物则表现为不断增多的

表 2 失稳性坡面不同区段群落数量特征与物种多样性指数

Tab.2 Quantitative characteristics and species diversity indexes of communities in different sections of unstable slopes

失稳性坡面	区段	物种数 S	Margalef 指数	Shannon-Wiener 指数	Simpson 指数	Pielou 指数	盖度/%	平均高度/m
I	稳定区	20	6.34	2.76	0.92	0.92	75	0.19
	失稳区	36	9.77	3.03	0.93	0.85	57	0.18
	堆积区	63	14.97	3.85	0.97	0.93	36	0.27
II	稳定区	27	7.89	2.95	0.92	0.9	65	0.29
	失稳区	35	9.56	2.86	0.91	0.81	38	0.16
	堆积区	29	8.32	3.13	0.95	0.93	20	0.24
III	稳定区	13	4.68	2.34	0.88	0.91	70	0.31
	失稳区	14	4.93	2.01	0.80	0.76	25	0.16
	堆积区	10	3.91	1.79	0.76	0.78	54	0.29
IV	稳定区	11	4.17	1.34	0.60	0.56	92	0.55
	失稳区	10	3.91	1.06	0.44	0.46	62	0.5
	堆积区	27	7.89	2.63	0.91	0.8	28	0.19
V	稳定区	13	4.68	2.31	0.88	0.9	92	0.36
	失稳区	14	4.93	2.16	0.86	0.82	63	0.25
	堆积区	13	4.68	2.04	0.84	0.79	32	0.22
QLY	稳定区	16.80 ± 2.98b	5.55 ± 1.38b	2.34 ± 0.56a	0.84 ± 0.12a	0.84 ± 0.14a	78.80 ± 12.56a	0.34 ± 0.12a
	失稳区	21.80 ± 5.64ab	6.62 ± 2.52ab	2.22 ± 0.70a	0.79 ± 0.18a	0.74 ± 0.14a	49.00 ± 16.78b	0.28 ± 0.12a
	堆积区	28.40 ± 9.42a	7.95 ± 3.91a	2.69 ± 0.74a	0.89 ± 0.08a	0.85 ± 0.07a	34.00 ± 12.64b	0.22 ± 0.04a

注:QLY代表全流域;不同小写字母表示同一指标不同区段差异显著。

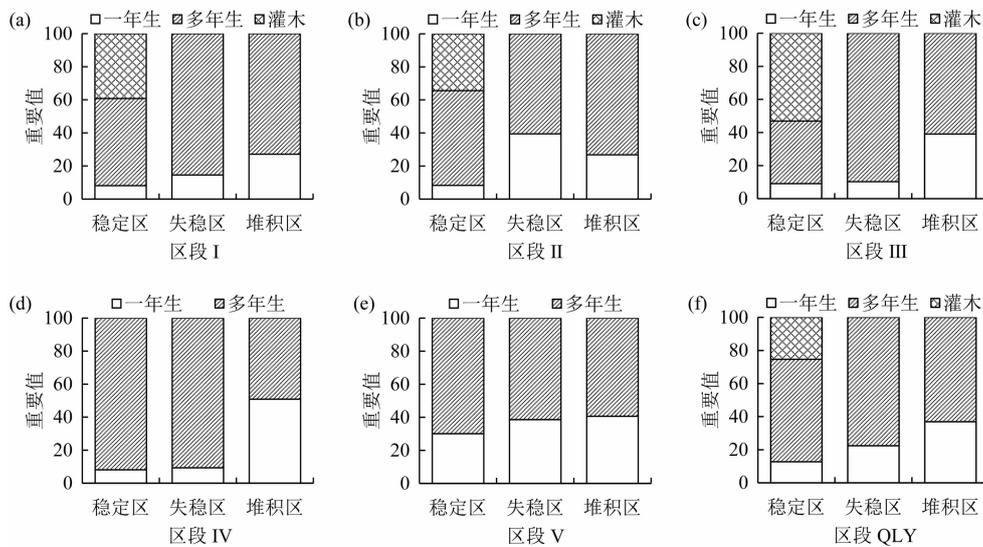


图 1 失稳性坡面不同区段植物生活型重要值:

(a)大地阴坡;(b)小尖风阳坡;(c)多照沟阳坡;(d)大凹子沟阴坡;(e)查菁沟阳坡;(f)全流域

Fig.1 Important values of plant life forms in different sections of unstable slopes; (a)Dadi shady slope; (b)Xiaojianfeng sunny slope;

(c)Duozhao gully sunny slope; (d)Da'aozi gully shade slope; (e)Chajing gully sunny slope;(f)whole watershed

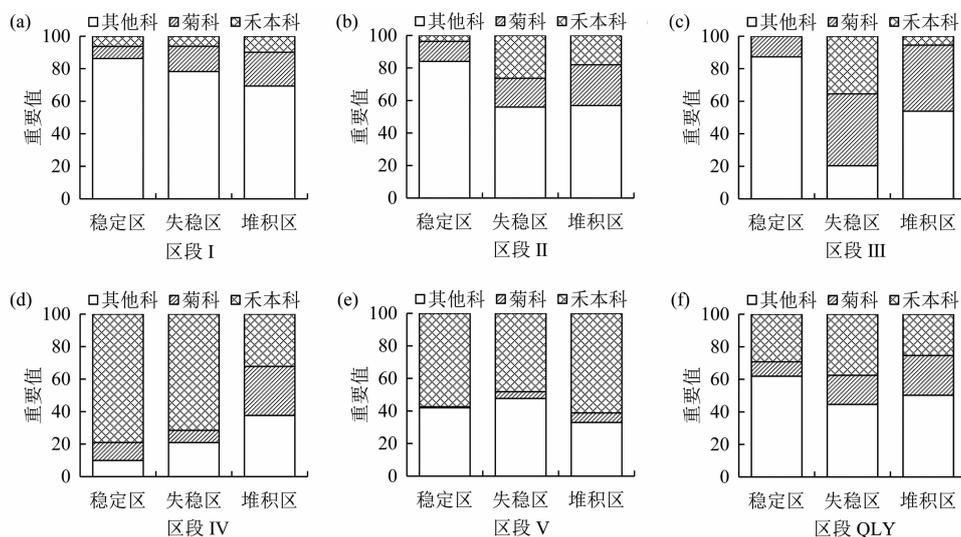


图2 失稳性坡面不同区段植物功能群重要值

(a)大地阴坡;(b)小尖风阳坡;(c)多照沟阳坡;(d)大凹子沟阴坡;(e)查菁沟阳坡;(f)全流域

Fig. 2 Important values of functional groups in different sections of unstable slopes: (a) Dadi shady slope; (b) Xiaojianfeng sunny slope; (c) Duozhao gully sunny slope; (d) Da'aozi gully shade slope; (e) Chajing gully sunny slope; (f) whole watershed

趋势。但在单个失稳性坡面并未表现出一致的规律性,例如在大地阴坡,禾本科和菊科植物重要值由小到大均依次为稳定区、失稳区、堆积区,其他科植物表现则相反,而在大凹子沟阴坡,禾本科植物重要值由大到小依次为稳定区、失稳区、堆积区,其他科植物重要值反之,菊科植物则从稳定区到堆积区表现为先减少后增加的趋势。

2.2 失稳性坡面不同区段植被碳储量特征

各失稳性坡面不同区段植被碳储量表现为从堆积区到稳定区逐渐增加(表3),变化范围为 $0.012 \pm 0.006 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \sim 3.601 \pm 0.026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,5个失稳性坡面和流域总体趋势均表现为稳定区显著高于失稳区和堆积区($P < 0.05$)。总体而言,各区段草地上部分碳储量高于地下部分,但仅大凹子沟阴坡稳定区草本植物碳储量地上部分显著高于地下部分($P < 0.05$),其他坡面各区段均未达到显著水平。

2.3 失稳性坡面不同区段土壤碳储量特征

蒋家沟流域失稳性坡面不同区段间土壤碳储量存在显著差异性(图3),土壤碳储量变化幅度为 $1.89 \pm 1.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \sim 11.21 \pm 1.68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,总体表现为稳定区显著高于堆积区($P < 0.05$)。在同一气候区,土壤碳储量在大地阴坡和小尖风阳坡表现为稳定区和失稳区均显著高于堆积区($P < 0.05$),在大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡则表现为稳定区显著

大于失稳区和堆积区($P < 0.05$)。

2.4 蒋家沟失稳性坡面生态系统碳储量特征

失稳性坡面各区段生态系统碳储量存在显著差异性,分布范围为 $1.91 \pm 1.38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \sim 12.28 \pm 0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4),总体表现为从稳定区到堆积区逐渐减少,且稳定区显著高于堆积区($P < 0.05$)。除多照沟阳坡外,生态系统碳储量在各失稳性坡面均表现为稳定区显著高于堆积区($P < 0.05$)。结合表3和图3分析可知,除多照沟阳坡稳定区植被碳储量占比(51.66%)大于土壤碳储量占比(48.34%)外,其他失稳性坡面各区段均表现为土壤碳储量占绝对优势(79.05%~99.76%)。

2.5 失稳性坡面植物群落多样性及结构组成对生态系统碳储量的影响

蒋家沟流域失稳性坡面不同区段植物群落多样性特征显著影响着生态系统碳储量(表4),一年生草本植物重要值与土壤碳储量呈显著负相关($P < 0.05$)。乔木生物量、凋落物生物量、灌木重要值和其他科重要值与植被碳储量呈极显著正相关($P < 0.01$),而一年生和多年生草本植物均与植被碳储量呈显著负相关($P < 0.05$)。植被盖度和凋落物生物量与生态系统碳储量呈显著正相关($P < 0.05$),而一年生草本植物重要值与生态系统碳储量呈极显著负相关($P < 0.01$)。

表 3 失稳性坡面不同区段植被碳储量及其分配
Tab. 3 Carbon stocks and distribution of vegetation in different sections of unstable slopes

区段	I		II		III		IV		V		QLY		
	碳储量/ (kg·m ⁻²)	比例/%	碳储量/ (kg·m ⁻²)	比例/%									
稳定区	乔木	1.255 ± 0.067b	51.72	0.948 ± 0.065b	45.10	2.487 ± 0.106a	69.04	-	-	-	1.563 ± 0.814	56.46	
	灌木	0.988	40.73	0.988	46.83	0.988	27.43	-	-	-	0.998	35.68	
	凋落物	0.169 ± 0.021a	6.97	0.150 ± 0.031a	7.11	0.111 ± 0.027a	3.08	-	-	-	0.143 ± 0.029	5.18	
	草本地上	0.007 ± 0.004Bb	0.27	0.013 ± 0.006Bb	0.64	0.010 ± 0.001Bb	0.64	0.159 ± 0.051ABa	75.11	0.094 ± 0.073ABb	84.61	0.057 ± 0.007B	2.05
	草本地下	0.006 ± 0.004Bb	0.23	0.007 ± 0.003Bb	0.32	0.005 ± 0.001Bb	0.15	0.053 ± 0.031CDa	24.89	0.017 ± 0.007BCb	15.39	0.018 ± 0.002B	0.64
合计	2.424 ± 0.015Ab	-	2.107 ± 0.038Ac	-	3.601 ± 0.026Aa	-	0.212 ± 0.082Ad	-	0.111 ± 0.079Ae	-	2.769 ± 0.048A	-	
失稳区	草本地上	0.021 ± 0.005Ba	44.31	0.009 ± 0.003Ba	44.28	0.036 ± 0.015Ba	58.17	0.087 ± 0.041CDa	72.05	0.028 ± 0.008BCa	74.27	0.036 ± 0.003B	62.63
	草本地下	0.027 ± 0.012Ba	55.69	0.011 ± 0.003Ba	55.72	0.026 ± 0.006Ba	41.83	0.034 ± 0.017Da	27.95	0.010 ± 0.002Ca	25.73	0.022 ± 0.001B	37.37
	合计	0.048 ± 0.016Ba	-	0.020 ± 0.006Ba	-	0.062 ± 0.021Ba	-	0.120 ± 0.055BCa	-	0.038 ± 0.010BCa	-	0.058 ± 0.002B	-
堆积区	草本地上	0.054 ± 0.020Ba	81.46	0.012 ± 0.009Bb	69.89	0.036 ± 0.018Ba	70.54	0.010 ± 0.005Dc	81.81	0.019 ± 0.008BCb	78.24	0.026 ± 0.002B	77.06
	草本地下	0.012 ± 0.006Ba	18.54	0.005 ± 0.001Ba	30.11	0.015 ± 0.007Ba	29.46	0.002 ± 0.001Da	18.19	0.005 ± 0.002Ca	21.76	0.008 ± 0.001B	22.94
	合计	0.066 ± 0.025Ba	-	0.018 ± 0.010Ba	-	0.051 ± 0.016Ba	-	0.012 ± 0.006Da	-	0.024 ± 0.009BCa	-	0.034 ± 0.001B	-

注:不同大写字母表示同一坡面各区段草本植物地上、地下部分和总碳储量差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示不同坡面相同区段相同层次差异显著($P < 0.05$)。

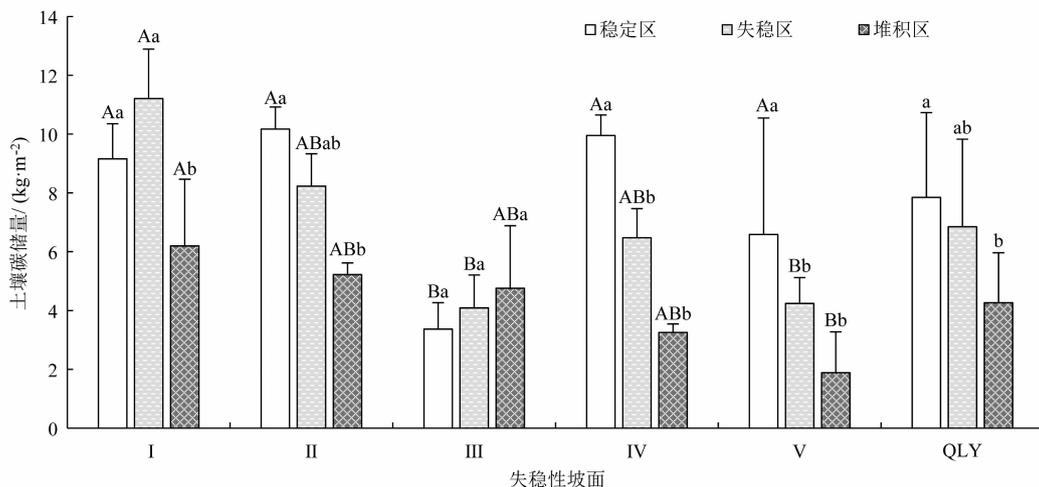


图3 失稳性坡面不同区段土壤碳储量

Fig. 3 Soil carbon stocks in different sections of unstable slopes

注:不同大写字母表示各个样地相同区段差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一样地不同区段差异显著($P < 0.05$)。

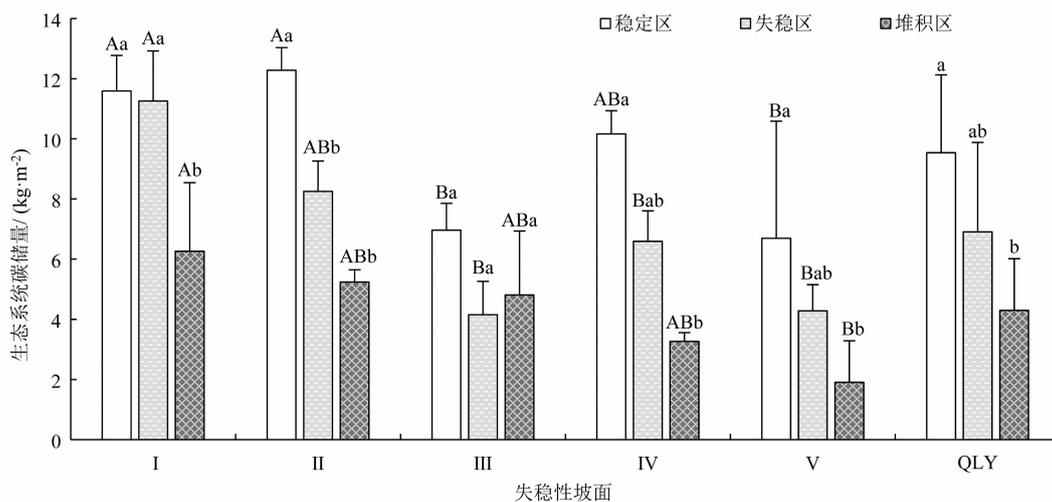


图4 失稳性坡面不同区段生态系统碳储量

Fig. 4 Carbon stocks of ecosystem in different sections of unstable slopes

注:不同大写字母表示各个样地相同区段差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一样地不同区段差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 蒋家沟流域失稳性坡面植物多样性特征

蒋家沟不同气候区失稳性坡面乔灌木物种多样性匮乏,除大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡的稳定区分布有云南松人工林和少量灌木外,其他坡面不同区段均以草本植物为主,这表明坡面自然植被群落演替处于草本植物阶段^[31-32]。

物种在有利的生境中会发生积累效应^[33],表现为从堆积区到稳定区,综合环境条件逐渐变得优越,

植物个体数量不断增加;然而,植物种类却逐渐减少,积累效应并未在物种数上得到体现,这可能与优势物种对环境控制作用有关。相对于堆积区和失稳区而言,稳定区干扰较少、环境条件优越,这有利于竞争力强的物种(如拟金茅和扭黄茅)在该区段成为优势物种而限制其他植物种生长。失稳性坡面植物多样性指数的规律性较为复杂,例如,Shannon-Wiener指数在大地阴坡和小尖风阳坡由大到小依次为堆积区、失稳区、稳定区,在查菁沟阳坡表现则相反,这与罗清虎^[31]等调查的蒋家沟干热河谷地区植物群落特征规律一致。然而,Margalef指数在阳

表 4 失稳性坡面不同区段植物群落多样性及结构组成
与生态系统碳储量的相关关系

Tab. 4 Correlation between plant community diversity and composition
and ecosystem carbon stocks in different sections of unstable slopes

指标	碳储量/(kg·m ⁻²)		
	土壤	植被	生态系统
盖度	0.484	0.381	0.569 *
平均高度	0.177	0.004	0.160
Margalef 指数	0.279	-0.130	0.204
Shannon-Wiener 指数	0.187	0.117	0.209
Simpson 指数	-0.019	0.194	0.052
Pielou 指数	-0.049	0.351	0.081
乔木生物量	-0.004	0.983 * *	0.346
凋落物生物量	0.370	0.827 * *	0.626 *
草本层地上生物量	0.278	-0.333	0.130
草本层地下生物量	0.455	-0.402	0.265
一年生草本重要值	-0.528 *	-0.535 *	-0.663 * *
多年生草本重要值	0.354	-0.594 *	0.106
灌木重要值	0.122	0.997 * *	0.465
菊科重要值	-0.262	-0.243	-0.321
禾本科重要值	-0.142	-0.495	-0.304
其他科重要值	0.287	0.653 * *	0.489

注: * 和 * * 分别表示碳储量与对应指标差异达 0.05、0.01 显著水平。

坡失稳区达到最大值,但在阴坡堆积区为最大值,与前人得出的物种多样性在中度环境(中等海拔、坡度、水热条件等)条件下达到最大值的结论^[5]不同,这主要因为除降水、温度、立地条件的影响外,物种多样性还受到人类活动、地质灾害扰动的影响,因此在灾害频发区,高的植被多样性仅表明先锋植物种类增多,无法指示物种数形成了积累效应。

植被物种重要值常用于计算和评估物种多样性,其大小是评价优势种和亚优势种的重要指标^[34],失稳性坡面各区段植物群落均以多年生草本植物占优,从堆积区到稳定区表现为一年生植物逐渐减少、多年生植物逐渐增多,而灌木仅分布于大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡的稳定区。本研究发现,蒋家沟流域干热河谷区以多年生草本植物占据主导优势,这主要是因为多年生草本植物较一年生草本植物在物种组成和结构方面受环境条件的干扰较小,而该区域气候极为干热、泥石流灾害频发,

导致物种组成向单一的方向发展^[35]。此外,随着灾害干扰程度从堆积区到稳定区逐渐减弱,坡面稳定程度的增加更有利于多年生植物的生长和演替,从而导致一年生植物逐渐减少,这与王蒙^[36]、郭春秀^[35]等人的研究结果一致。禾本科、菊科植物在失稳性坡面具有相对较广的分布范围,其他科植物种占比大,但数量少而分散,这表明禾本科和菊科植物具有更强的生态适应性,能更好地适应干旱少雨且地质灾害频发的生境,可作为该流域植被恢复的先锋植物。

3.2 植物群落特征差异对生态系统碳储量的影响

生态系统碳储量由植被和土壤两部分碳储量组成^[10],因此植物群落变化及差异对生态系统碳储量的影响主要表现为对二者的影响。

植被的碳储量与生物量密切相关^[37],高的植被生物量意味着生态系统具有更高的植被碳储量。植物群落的组成和变化均可改变植被生物量,进而导致植被碳储量分配及分布产生差异,大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡稳定区植被碳储量显著高于失稳区和堆积区,这归功于该区段乔灌木的分布,乔灌木相对草本植物能够积累更多的生物量,导致稳定区有较高的植被碳储量;大巴子沟阴坡和查菁沟阳坡则因根系发达且植株高大的禾本科植物拟金茅和扭黄茅占优势,其具有更高的生物量,因此稳定区碳储量更高。相对于稳定区,失稳区和堆积区受灾害干扰频率更高,植被的生长以及群落演替阻力大,仅分布生长快、周期短的矮小草本植物,如马先蒿、毛马唐、鬼针草等,植物群落结构单一且长期处于以草本植物占优势的初期演替阶段^[20],导致其生物量积累缓慢,最终造成稳定区植被碳储量显著高于失稳区和堆积区。

土壤碳输入量、分解量和积累量决定土壤碳储量,凋落物则是土壤碳储量增加的重要来源^[10],然而大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡稳定区凋落物(以云南松针叶为主)输入,并未造成土壤碳储量与失稳区间的显著差异,这可能是因为针叶树种凋落物分解缓慢^[16],无法有效提高土壤中的碳输入量。此外,研究区灾害扰动以及人为活动造成不同区段植被盖度、凋落物数量及质量、植被根系种类和分布的差异性,进而引起土壤有机碳积累的异速性^[38]。其中,5个样地稳定区的植被覆盖度高,稳定性更好,有效减少了土壤水分和养分的流失,有利

于土壤有机碳含量的积累。堆积区植物群落结构简单,植被盖度低,大量土壤有机碳随降雨和坡面径流冲刷而流失^[16];同时,植被生长季与灾害多发季重叠,滑坡、崩塌等地质灾害对坡面土壤扰动大,造成土壤层序紊乱,植被生长阻力大且无法长期定植,导致土壤碳输入低于稳定区,最终造成堆积区土壤碳储量显著低于稳定区。

相关研究表明,生态系统中90%的有机碳都存储在土壤中^[39],因此土壤碳储量在生态系统碳储量中占主导地位^[40]。除多照沟阳坡外,各坡面区段生态系统碳储量均以土壤碳储量为主(79.05%~99.76%),因此生态系统碳储量的总体变化趋势与土壤碳储量相似(图3、图4),总体表现为从稳定区到堆积区逐渐减少的趋势,这与董凌勃^[10]等人的研究结果一致。多照沟阳坡稳定区植被碳储量占比(51.66%)大于土壤碳储量占比(48.34%),主要原因有两点:(1)稳定区云南松处于中龄林阶段,云南松对植被碳储量贡献率大(69.04%);(2)失稳区和堆积区因当地居民从事农业活动和过度放牧导致土壤碳输入的减少^[16]。

植被盖度、凋落物生物量与生态系统碳储量均呈显著正相关关系($P < 0.05$)(表4),总体而言,植被盖度增加可减少地表裸露从而降低地表径流对表土的冲刷作用,大幅减少了土壤有机碳的流失;此外,稳定区丰富的植被具有更高的生物量,增加了植被碳储量,同时向土壤中输送更多的凋落物及根系,经微生物分解释放增加了土壤碳储量^[7]。从堆积区到稳定区,一年生植被逐渐减少,多年生草本植物逐渐增多,因一年生植物对生态系统有机碳的贡献率低于多年生植物^[41],因此一年生草本植物重要值与生态系统碳储量呈显著负相关($P < 0.05$)。

4 结论

本文采用群落学研究方法对蒋家沟流域不同垂直气候带5个失稳性坡面(包括稳定区、失稳区和堆积区)、共15个区段的植物群落植物多样性展开调查,并分析了坡面植物群落差异对生态系统碳储量分布的影响,主要结果如下:

(1)草本植物从堆积区到稳定区表现为一年生植物逐渐减少、多年生植物逐渐增多的趋势,失稳区和堆积区均以草本植物为主,乔灌植物匮乏,因此失

稳性坡面在自然演替状态下极难恢复,需要进行人工引种干预。

(2)禾本科和菊科植物具有较强的生态适应性,能更好地适应干旱少雨且地质灾害频发的生境,可作为蒋家沟流域植被恢复的先锋植物。

(3)植被盖度随着坡面稳定程度(即从堆积区到稳定区)不断提高有利于减少土壤有机碳流失,从而增加生态系统碳储量。

(4)人类活动及地质灾害干扰导致土壤碳输入阻力增大,从而弱化了各区段植物群落对生态系统碳储量分布影响,导致除多照沟阳坡外,各失稳性坡面稳定区生态系统碳储量显著高于堆积区($P < 0.05$)。

综上,失稳性坡面植物群落通过增加植被、提高土壤碳储量和减少土壤有机碳的流失等影响生态系统碳储量的分布格局,其中,植被盖度和凋落物生物量是主要的影响因子。本研究未进行长期定位观测,植物群落动态变化过程与生态系统碳储量间的耦合关系尚不明确,此外土壤理化性质、微生物群落特征等因素也未涉及,因此未来还应对研究区内植物群落时间动态、土壤理化性质等非生物因素和微生物等生物因素展开研究,从而更加全面地揭示蒋家沟失稳性坡面植物群落特征对生态系统碳储量的影响机制。

参考文献(References)

- [1] 王丽丽,宋长春. 陆地生态系统碳循环对土地利用变化的响应[J]. 土壤通报,2010,41(1):216-221. [WANG Lili, SONG Changchun. Research advances in the responses of carbon cycle in terrestrial ecosystems to land use changes [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(1): 216-221] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2010.01.045
- [2] 赵青,刘爽,陈凯,等. 武夷山自然保护区不同海拔甜槠天然林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 生态学报,2021,41(13):5328-5339. [ZHAO Qing, LIU Shuang, CHEN Kai, et al. Change characteristics and influencing factors of soil organic carbon in *castanopsis eyrei* natural forests at different altitudes in Wuyishan Nature Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5328-5339] DOI: 10.5846/stxb202009082341
- [3] 张广帅,邓浩俊,杜锬,等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例[J]. 生态学报,2016,36(3):675-687. [ZHANG Guangshuai, DENG Haojun, DU Kun, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica,

- 2016, **36**(3): 675 – 687] DOI: 10.5846/stxb201405060892
- [4] 彭阳. 退耕造林与弃耕撂荒形成的植被群落特征和碳储量比较 [D]. 北京:中国林业科学研究院,2017: 2 – 8. [PENG Yang. Comparison on vegetation community characteristics and carbon storage between afforestation and abandonment of farmland [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017: 2 – 8]
- [5] 徐远杰,陈亚宁,李卫红,等. 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释[J]. 植物生态学报,2010, **34**(10): 1142 – 1154. [XU Yuanjie, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(10): 1142 – 1154] DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.10.003
- [6] 宋永昌. 植被生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2017: 35 – 48. [SONG Yongchang. Vegetation ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2017: 35 – 48]
- [7] DENG Lei, SHANGGUAN Zhouping, SWEENEY S. Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China [J]. PLOS One, 2013, **8**(8): e71923. DOI: 10.1371/journal.pone.0071923
- [8] BAUL T K, PEULY T A, NANDI R, et al. Carbon stocks of homestead forests have a mitigation potential to climate change in Bangladesh [J]. Scientific Reports, 2021, **11**: 1 – 11. DOI: 10.1038/s41598-021-88775-7
- [9] SURENDRA A, OSURI A M, RATNAM J. Varying impacts of logging frequency on tree communities and carbon storage across evergreen and deciduous tropical forests in the Andaman Islands, India [J]. Forest Ecology and Management, 2021, **481**: 118791. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118791
- [10] 董凌勃,海旭莹,汪晓珍,等. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报,2020, **40**(23): 8559 – 8569. [DONG Lingbo, HAI Xuying, WANG Xiaozhen, et al. Effects of plant community dynamics on ecosystem carbon stocks since returning farmlands to grasslands on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(23): 8559 – 8569] DOI: 10.5846/stxb202002150259
- [11] 张逸如,刘晓彤,高文强,等. 天然林保护工程区近20年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J]. 生态学报,2021, **41**(13): 5093 – 5105. [ZHANG Yiru, LIU Xiaotong, GAO Wenqiang, et al. Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(13): 5093 – 5105] DOI: 10.5846/stxb202101200215
- [12] 佟健,金光泽,李凤日,等. 黑龙江省不同龄组软阔混交林碳密度及其分配[J]. 生态学杂志,2014, **33**(12): 3191 – 3202. [TONG Jian, JIN Guangze, LI Fengri, et al. Carbon density and distribution in soft broad-leaved mixed forest of different age classes in Heilongjiang province, northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(12): 3191 – 3202] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0279
- [13] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因素[J]. 土壤学报,2004, **41**(5): 687 – 699. [XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(5): 687 – 699] DOI: 10.11766/trxb200312090505
- [14] 赵威,李亚鸽,亓琳,等. 豫西丘陵坡地弃耕农田植被演替对土壤碳、氮库的影响[J]. 生态学报,2018, **38**(19): 7016 – 7025. [ZHAO Wei, LI Yage, QI Lin, et al. Effects of vegetation succession on soil carbon and nitrogen storage in abandoned hilly farmlands of the western Henan region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(19): 7016 – 7025] DOI: 10.5846/stxb201709261739
- [15] 颜韦. 中国典型陆地生态系统的生物量分配及其影响因素分析[D]. 上海:华东师范大学,2017: 2 – 5. [YAN Wei. Biomass allocation pattern and its influencing factors across typical terrestrial ecosystems in China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017: 2 – 5]
- [16] 余杭,孙凡,李松阳,等. 不同区段金沙江下游山地失稳性坡面土壤有机碳含量特征[J]. 应用与环境生物学报,2020, **26**(5): 1192 – 1199. [YU Hang, SUN Fan, LI Songyang, et al. Characteristics of soil organic carbon content in different sections of the unstable slopes of the mountainous area in the lower reaches of the Jinsha River [J]. Chinese Journal of Applied Environment Biology, 2020, **26**(5): 1192 – 1199] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.09052
- [17] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. 中国水土保持科学,2009, **7**(5): 7 – 13 + 31. [CUI Peng. Advances in debris flow prevention in China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, **7**(5): 7 – 13 + 31] DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2009.05.002
- [18] 林勇明,崔鹏,王道杰,等. 泥石流频发区人工新银合欢林群落特征[J]. 中国水土保持科学,2009, **7**(6): 63 – 67. [LIN Yongming, CUI Peng, WANG Daojie, et al. Community characteristic of plantation of *Leucaena leucocephala* in the area with high-frequency debris flow [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, **7**(6): 63 – 67] DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2009.06.011
- [19] 刘颖,贺静雯,李松阳,等. 蒋家沟流域不同海拔梯度的土壤种子库与地上植被的关系[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, **41**(2): 54 – 67. [LIU Ying, HE Jingwen, LI Songyang, et al. Relationship between soil seed bank and aboveground vegetation along an altitude gradient in the Jiangjia Gully [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, **41**(2): 54 – 67] DOI: 10.11929/j.swfu.202001051
- [20] 吴建召,孙凡,崔羽,等. 不同气候区失稳性坡面植被生物量与土壤密度的关系——以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为例[J]. 北京林业大学学报,2020, **42**(3): 24 – 35. [WU

- Jianzhao, SUN Fan, CUI Yu, et al. Relationship between vegetation biomass and soil bulk density on unstable slopes in different climatic regions: A case study of Jiangjiagou Watershed in Dongchuan district of Kunming city, Yunnan province of southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(3): 24–35 DOI: 10.12171/j.1000.1522.20190066
- [21] 罗清虎,孙凡,崔羽,等. 泥石流频发流域失稳性坡面主要植物种间关联性[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, **24**(4): 689–696. [LUO Qinghu, SUN Fan, CUI Yu, et al. Interspecific association among main plant species in the unstable slope with high-frequency debris flow [J]. *Chinese Journal of Applied Environment Biology*, 2018, **24**(4): 689–696] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2017.11005
- [22] 杜榕桓,康志成,陈循谦,等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1987: 53–64. [DU Ronghuan, KANG Zhicheng, CHEN Xunqian, et al. A comprehensive investigation and control planning for debris flow in the Xiaojiang River basin of Yunnan province [M]. Chongqing: Science and Technology Literature Publishing House Chongqing Branch, 1987: 53–64]
- [23] 杨柳生,林静远,木力迪尔·艾尔肯,等. 泥石流流域气候与区段对坡面土壤 pH 值的影响——以云南蒋家沟流域为例[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(1): 105–112. [YANG Liusheng, LIN Jingyuan, ERKEN M, et al. Effects of climate types and slope sections on the pH of soil in the unstable slope with high-frequency debris flow in Jiangjiagou watershed of Yunnan province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(1): 105–112] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.01.012
- [24] 罗恒春,魏安超,黄田,等. 云南松生物量和碳储量动态变化分析[J]. *林业资源管理*, 2016(6): 37–43. [LUO Hengchun, WEI Anchao, HUANG Tian, et al. Analysis on dynamic change of biomass and carbon stock of *Pinus yunnanensis* in Yunnan, China [J]. *Forest Resources Management*, 2016(6): 37–43] DOI: 10.13466/j.cnki.lyzyl.2016.06.008
- [25] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, **16**(5): 497–508. [FANG Jingyun, LIU Guohua, XU Songling. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(5): 497–508]
- [26] 王磊,丁晶晶,季永华,等. 江苏省森林碳储量动态变化及其经济价值评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, **34**(2): 1–5. [WANG Lei, DING Jingjing, JI Yonghua, et al. The dynamic carbon storage and economic value assessment of forest in Jiangsu province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2010, **34**(2): 1–5] DOI: 10.3969/j.issn.1000–2006.2010.02.001
- [27] 李亮,王映雪. 云南省森林碳汇能力及经济价值分析[J]. *中国集体经济*, 2011, **24**(5): 23–27. [LI Liang, WANG Yingxue. Analysis of forest carbon sink capacity and economic value in Yunnan province [J]. *China Collective Economy*, 2011, **24**(5): 23–27] DOI: 10.3969/j.issn.1008–1283.2011.24.018
- [28] 刘迎春,王秋风,于贵瑞,等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. *生态学报*, 2011, **31**(15): 4277–4286. [LIU Yingchun, WANG Qiufeng, YU Guirui, et al. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(15): 4277–4286]
- [29] 牟长城,王彪,卢慧翠,等. 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量[J]. *生态学报*, 2013, **33**(16): 4956–4965. [MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al. Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(16): 4956–4965] DOI: 10.5846/stxb201212271884
- [30] ZHAO Wei, HU Zhongmin, LI Shenggong, et al. Impact of land use conversion on soil organic carbon stocks in an agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, **27**(8): 999–1010. DOI: 10.1007/s11442–017–1417–1
- [31] 罗清虎,孙凡,吴建召,等. 泥石流频发流域物源区坡面植被群落特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, **24**(4): 681–688. [LUO Qinghu, SUN Fan, WU Jianzhao, et al. Characterizing the vegetation community in the provenance slope with high-frequency debris flow [J]. *Chinese Journal of Applied Environment Biology*, 2018, **24**(4): 681–688] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2017.10017
- [32] 刘颖,贺静雯,李松阳,等. 云南蒋家沟流域不同海拔梯度土壤种子库特征[J]. *森林与环境学报*, 2020, **40**(3): 225–233. [LIU Ying, HE Jingwen, LI Songyang, et al. Soil seed bank characteristics in different altitude gradients in Jiangjia Gully watershed, Yunnan [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, **40**(3): 225–233] DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2020.03.001
- [33] WILSON J B, SYKES M T. Some tests for niche limitation by examination of species diversity in the Dunedin area, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Botany*, 1988, **26**(2): 237–244. DOI: 10.1080/0028825X.1988.10410115
- [34] 张倩,孙小妹,杨晶,等. 坡向对东祁连山高寒草甸群落物种功能群及其多样性的影响[J]. *西北植物学报*, 2019, **39**(8): 1480–1490. [ZHANG Qian, SUN Xiaomei, YANG Jing, et al. Effect of slope aspect on species functional groups and species diversity in alpine meadow of the east of Qilian mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(8): 1480–1490] DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2019.08.1480
- [35] 郭春秀,姚拓,马俊梅,等. 石羊河下游不同类型荒漠草地黑果枸杞群落结构及物种多样性特征[J]. *草地学报*, 2017, **25**(3): 529–537. [GUO Chunxiu, YAO Tuo, MA Junmei, et al. Characteristics and species diversity of *Lycium ruthenicum* on

- different types of desert grassland in Shiyang river [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, **25**(3): 529 – 537] DOI: 10.11733/j.issn.1007 – 0435.2017.03.012
- [36] 王蒙,董治宝,逯军峰,等. 巴丹吉林沙漠周边植被特征和物种多样性[J]. *中国沙漠*,2015, **35**(5): 1226 – 1233. [WANG Meng, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al. Vegetation characteristics and species diversity around the Badain Jaran desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, **35**(5): 1226 – 1233] DOI: 10.7522/j.issn.1000 – 694X.2014.00113
- [37] 杨晓菲,鲁绍伟,饶良懿,等. 中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展[J]. *西北林学院学报*,2011, **26**(3): 73 – 78. [YANG Xiaofei, LU Shaowei, RAO Liangyi, et al. Advances in the researches of carbon storage of forest ecology and related factors in China [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, **26**(3): 73 – 78]
- [38] 王丽华,薛晶月,谢雨,等. 不同气候类型下四川草地土壤有机碳空间分布及影响因素[J]. *植物生态学报*,2018, **42**(3): 297 – 306. [WANG Lihua, XUE Jingyue, XIE Yu, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon among different climate types in Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, **42**(3): 297 – 306] DOI: 10.17521/cjpe.2017.0061
- [39] 刘华,雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. *西北植物学报*,2005, **25**(4): 835 – 843. [LIU Hua, LEI Ruide. Research methods and advances of carbon storage and balance in forest ecosystems of China [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, **25**(4): 835 – 843] DOI: 10.3321/j.issn:1000 – 4025.2005.04.036
- [40] 钟华平,樊江文,于贵瑞,等. 草地生态系统碳循环研究进展[J]. *草地学报*,2005, **13**(S1): 67 – 73. [ZHONG Huaping, FAN Jiangwen, YU Guirui, et al. Progress of carbon cycle research in grassland ecosystem [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, **13**(S1): 67 – 73] DOI: 10.3969/j.issn.1007 – 0435.2005.zl.015
- [41] 宋媛,赵溪竹,毛子军,等. 小兴安岭4种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性[J]. *生态学报*,2013, **33**(2): 443 – 453. [SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al. SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing'an Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(2): 443 – 453] DOI: 10.5846/stxb201112021844

Plant Community and Ecosystem Carbon Stocks in the Unstable Slopes Subjected to High-Frequency Debris Flow

YANG Liusheng^{1,2,3}, GAO Ruoyun^{1,2,3}, SUN Fan^{1,2,3}, JI Pen¹, LIN Yongming^{1,2,3*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Conservancy, Chengdu 610041, China;

3. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The successional development of plant communities changes their habitat characteristics and living conditions, playing an important role in the carbon cycle and carbon balance of terrestrial ecosystems. There is insufficient scientific understanding of the coupling relationships between plant community change process and carbon stock distribution, the carbon sequestration capacity and the identification of carbon source or sink in the disaster-affected ecosystems. As a result, the influencing mechanism of changes in plant community distributing on unstable slopes caused by disaster disturbances on ecosystem carbon stock is still poorly understood. In this study, vegetation ecosystem on different sections (downward as stable area, unstable area and deposition area) of unstable slopes in different climatic regions of the Jiangjia Gully in China, were selected to investigate community characteristics and their relationships with carbon stocks. The results showed that: (1) The number of plant species and Margalef diversity index gradually increased with the slope downward, whereas vegetation coverage decreased due to the lack of dominant species in the deposition area. (2) Perennials dominated in different sections of all unstable slopes, whereas *Gramineae* and *Compositae* distributed widely but dominated only in dry-hot valley

region. On all slopes, from top (stable area) to bottom (deposition area), the important values of plants in the whole watershed showed as follows: annual plants and *Compositae* increased; perennial plants and *Gramineae* increased first and then decreased; and other families decreased first and then increased. (3) Among all slopes, vegetation carbon stock in stable area was significantly higher than that in unstable area and deposition area ($P < 0.05$). Except Duozaogou sunny slope, soil carbon and ecosystem stocks of all slopes were significantly higher in stable area than in deposition area ($P < 0.05$). (4) Vegetation coverage and litter biomass were significantly positively correlated with ecosystem carbon stocks ($P < 0.05$), whereas the important value of annual herbs was significantly negatively correlated with ecosystem carbon stocks ($P < 0.01$), indicating that the carbon sequestration capacity of vegetation communities in stable area with high vegetation coverage and less disturbance was higher than that in deposition area. The results revealed the effects of community structure and diversity of vegetation on ecosystem carbon stocks on unstable slopes, which could provide reference for the allocation of vegetation measures, ecological restoration and carbon sequestration management in mountainous disaster prone area.

Key words: community characteristics; carbon stocks; unstable slope; section; plant diversity; the Jiangjia Gully