

引用格式:高若允,杨柳生,田雪,杨鸿飞,林勇明.干热河谷阴、阳坡失稳性坡面植被与环境因子关系的冗余分析[J].山地学报,2022,40(6):835-846.

GAO Ruoyun, YANG Liusheng, TIAN Xue, YANG Hongfei, LIN Yongming. Redundancy analysis of the relationship between plant and environmental factors on shady and sunny unstable slope in dry-hot valley [J]. Mountain Research, 2022, 40(6):835-846.

干热河谷阴、阳坡失稳性坡面植被 与环境因子关系的冗余分析

高若允^{1,2,3},杨柳生^{1,2,3},田雪^{1,2,3},杨鸿飞^{1,2,3},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 610299; 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:中国干热河谷区失稳性坡面不仅是泥石流频发流域的治理重点,也是抑制谷内生态系统持续逆向演变的关键。针对干热河谷失稳性坡面脆弱生态系统方面的研究,仍未全面深入探讨失稳性坡面上植被与环境因子间的内在联系,缺乏针对性的生态恢复措施。本文以中国云南东川蒋家沟干热河谷阴、阳坡失稳性坡面为研究对象,在野外调查采样和室内试验的基础上,利用冗余分析(RDA)探究干热河谷失稳性坡面上植被养分、多样性特征与环境因子间的关系。结果表明:(1)阳坡各区段植被地上部分碳、氮元素含量显著大于地下部分,稳定区显著大于堆积区($P < 0.05$),阴坡仅堆积区植被地上部分碳、氮元素含量显著大于地下部分,失稳区地上部分氮元素含量显著大于地下($P < 0.05$)。(2)阳坡 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均显著大于阴坡($P < 0.05$),且4个指数在阴、阳坡分布规律不一致,具体表现为阳坡稳定区显著大于堆积区,阴坡堆积区显著大于失稳区($P < 0.05$)。(3)随着坡面稳定程度的降低,土壤有机碳、含水率、全氮和水解氮含量出现不同程度的减小,容重、全磷和速效磷含量则增大。(4)RDA 分析结果表明环境因子很好地解释了植被养分、多样性指数的变化,坡向、区段、容重是显著影响因子,其对植被养分、多样性指数的解释率分别为14.53%、44.42%;24.36%、4.18%;6.67%、2.58%。研究结果反映了干热河谷植被养分、物种多样性特征对环境因子的响应和适应策略,可为干热河谷失稳性坡面治理与植被恢复提供理论支撑。

关键词:干热河谷;失稳性坡面;植被;环境因子;冗余分析;蒋家沟

中图分类号: X43

文献标志码: A

中国西南干热河谷区位于横断山区大断裂带上,受地形地貌和焚风效应的长期影响,该区域气候常年干旱、水热矛盾突出,加上人类活动的长期干扰,当地水土流失十分严重,生态防护功能低下,是我国水土流失治理和生态环境恢复的重点地区之

一^[1-3]。干热河谷区内因滑坡、崩塌运动形成了大量不稳定斜坡,干扰了坡面植被的自然演化进程,使其发生逆向演替,生态系统十分脆弱,是我国典型的生态脆弱区^[4]。

干热河谷内失稳性坡面不仅是泥石流频发流域

收稿日期 (Received date): 2022-08-30; **改回日期** (Accepted date): 2022-12-15

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研究基金(20190402)。
[National Natural Science Foundation of China (42071132); Research Fund of Key Laboratory of Mountain Disasters and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences (20190402)]

作者简介 (Biography): 高若允(1998-),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向:植物地理学。[GAO Ruoyun (1998-), female, born in Shangqiu, Henan province, M. Sc. candidate, research on phytogeography] E-mail: 18339160891@163.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:区域资源优化、生态学。[LIN Yongming (1982-), male, born in Fu'an, Fujian province, Ph. D., professor, research on optimization of regional resources and ecology] E-mail: monkey1422@163.com

的治理重点,也是抑制生态系统持续逆向演变的关键^[4]。植被和土壤作为陆地生态系统最重要的两个子系统,在脆弱生态系统的恢复与重建过程中起着关键性的作用^[5]。开展干热河谷脆弱生态系统植被和环境因子间相互关系的研究,分析干热河谷失稳性坡面上植被养分、物种多样性与环境因子的关系,揭示植被与环境的互馈机制,有助于了解植被养分分布格局和植被的立地条件状况,确定植被的生态适应性机制和生存策略,进而制定合理有效的退化生态系统恢复措施^[6]。

近年来,针对干热河谷失稳性坡面的相关研究,主要侧重于植被群落以及土壤个别因子的变化特征,例如,植被生态化学计量学特征^[7-8]、植被多样性和群落结构^[9-10]、土壤理化性质及养分特征^[11]等,但未全面深入探讨失稳性坡面上植被与环境因子间的内在联系,难以认清干热河谷植被地上、地下部分养分含量及物种多样性对外界环境干扰的响应机制,无法明确坡向、区段及土壤理化性质等环境因子在失稳性坡面生态治理和恢复过程中的作用,进而难以总结归纳出针对性的生态恢复措施。

本研究以云南东川蒋家沟流域干热河谷为研究区,选择流域内典型阴、阳坡失稳性坡面为研究对象;调查植被群落特征,采集并测定植被地上、地下部分养分及 0~20 cm 土壤理化性质;运用冗余分析方法^[12]探究植被—环境因子的内在联系,促进失稳性坡面上植被正向演替进程,以期蒋家沟流域干热河谷区的植被恢复和生态环境改善提供参考,从而维持干热河谷地区的生态系统稳定性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市东川区境内的蒋家沟流域,地理位置为 103°06′~103°13′ E, 26°13′~26°17′N。流域内海拔为 1042~3269 m,气候垂直分异明显,按海拔高度从高到低依次可划分为湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区、亚热带干热河谷区^[4]。本研究选择平均海拔低于 1600 m 的干热河谷区为研究区,区内基岩以浅变质的昆阳群板岩为主,岩层松散易风化,土壤为储水稳水性差的山地燥红土。研究区年均气温为 20℃,年平均降水量和年平均蒸发量分别为 693 mm、3638 mm,蒸发

量约是降水量的 5 倍^[8]。历史上过度的矿石开采、放牧、滑坡和泥石流等人为和自然因素导致干热河谷区内植被群落自然演替进程被严重破坏,植被退化明显,形成了以干热草坡为主的稀树灌草丛带^[7]。区内草本植物主要有鬼针草(*Bidens pilosa*)、丛毛羊胡子草(*Eriophorum comosum*)、芸香草(*Cymbopogon distans*)和扭黄茅(*Heteropogon contortus*)等抗逆性较强的优势物种,灌木主要为马桑(*Coriaria sinica*)、苦刺(*Sophora davidii*)、坡柳(*Dodonaea viscosa*)等物种,乔木主要为人工引种的新银合欢(*Leucaena leucocephala*)、桉树(*Eucalyptus camaldulensis*)。

1.2 样地设置与样品采集

2017 年 7 月中旬到 8 月上旬对研究区进行实地调查,根据研究区特殊的地形地貌条件,在吴建召^[13]研究的基础上,选择 2 个坡向不同(阳坡、阴坡)、发育程度和形成时间相似(约为 40 年)^[13]的失稳性坡面设置垂直带谱,带宽 50 m,带长 400 m。依据坡位及坡体稳定性将坡面划分为 3 种稳态区段,其中,稳定区位于坡面上沿,整体较为稳定,暂未受到滑坡影响,植被生长良好;失稳区位于坡面中部,整体处于失稳状态,易受到流水侵蚀的影响,植被覆盖度低;堆积区位于坡脚,由砾石及松散固体物质堆积而成,坡度较陡,植被稀疏。

经过前期调查发现 2 个坡面均没有乔木、灌木的发育,以草本植物为优势种群。因此,在各稳态区段以 15 m 为间距划分 3 条 10 m×50 m 的样线,在每个样线上以 10 m 为间距划分 3 个 1 m×1 m 的样方,在每个样方内调查植被的物种组成、采集植被地上部分、地下部分(根系)和土壤样品。使用手持式 GPS 测量仪测量并记录经纬度、海拔、坡度等基本信息(表 1)。在每个样方内采用齐地刈割法获取样方内植株的地上部分,采用直接挖掘法获取植被地下部分,分别装入已标记的自封袋中带回实验室。去除样方表面的凋落物和腐殖质层后,在样方内用体积为 100 cm³ 的环刀对 0~20 cm 土壤随机重复采样 3 次。同时,在每个样方内采用“S”形布设 5 个样点,用土钻钻取各样点 0~20 cm 土壤,将 5 个样点的土样混合均匀后用自封袋密封,在实验室通风处自然风干。每个区段共采集 27 个环刀样、9 个土壤混合样。

表 1 样地基本特征
Tab. 1 Basic characteristics of sample plots

样地	经度	纬度	区段	海拔/m	坡度/(°)	优势种	植被覆盖率/%
阴坡	103°8'30"E	26°14'38"N	稳定区	1550 ~ 1600	16	扭黄茅、芸香草、拟金茅	92.2
			失稳区	1500 ~ 1550	25	芸香草、扭黄茅	62.2
			堆积区	1450 ~ 1500	30	鬼针草	27.6
阳坡	103°8'6"E	26°15'15"N	稳定区	1500 ~ 1600	25	扭黄茅、田菁、黄背草	92.1
			失稳区	1400 ~ 1500	30	扭黄茅、田菁、苎草	62.7
			堆积区	1300 ~ 1400	40	苎草、铁苋菜	32.2

1.3 物种多样性计算

利用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数分析物种多样性特征,计算公式详见参考文献[14]。

1.4 样品分析

将采集的植被地上部分、地下部分置于 0.5 mm 的尼龙网筛内,用蒸馏水反复冲洗干净,置于烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,然后在 80 ℃ 下烘干至恒重,用植物粉碎机进行粉碎。将粉碎后的植被地上部分、地下部分和土壤样品分别过 0.149 mm 孔径筛后,采用常规分析方法测定养分含量:采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法测植被地上、地下部分碳含量和土壤有机碳^[15];采用 H₂SO₄-半微量凯氏定氮法测植被地上、地下部分氮含量和土壤全氮^[15];采用 Mo-Sb 抗比色法测植被地上、地下部分磷含量和土壤全磷^[15];采用火焰光度计法测植被地上、地下部分钾含量^[15];采用碱解-扩散法测土壤水解氮^[15];采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测土壤速效磷^[16]。采用环刀法测土壤容重和含水率^[16];采用 pH 计测土壤 pH^[16]。

1.5 数据处理

选择物种数据矩阵、植被养分矩阵与环境因子矩阵进行 RDA 分析,物种数据矩阵由多样性指数组成,植被养分矩阵包括植被地上、地下养分含量,环境因子主要包括坡向、区段及土壤理化性质。参考相关文献^[17]对定性指标进行编码,坡向分为 2 类,1 为阳坡,2 为阴坡。区段分为 3 类:1 为稳定区,2 为失稳区,3 为堆积区。利用 R 4.1.0 进行 RDA 分析及作图,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 多重比较对植被养分与土壤理化性质进行组间差异性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同坡向植被地上、地下养分特征

干热河谷阴、阳坡植被地上部分的碳、氮、磷和钾含量整体上均大于地下部分,阳坡植被碳、氮含量在地上、地下部分差异显著($P < 0.05$);阴坡堆积区植被地上部分碳、氮和磷含量均显著大于地下部分,稳定区植被地上部分磷、钾含量显著大于地下部分($P < 0.05$)(表 2)。阳坡植被碳含量随坡面稳定程度的降低而减小,且稳定区显著大于堆积区($P < 0.05$),而植被氮含量随稳定程度的降低呈先增加后减小的趋势($P > 0.05$),阴坡植被氮、钾含量随坡面稳定程度的降低呈先减小后增加的趋势,磷含量随坡面稳定程度的降低而增加,堆积区显著大于稳定区和失稳区($P < 0.05$)(表 2)。

2.2 不同坡向物种多样性指数

干热河谷阴、阳坡不同区段物种多样性指数表明,阳坡稳定区和失稳区 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数整体上显著大于阴坡,在堆积区则相反($P < 0.05$)。除 Margalef 丰富度指数外,阳坡 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数整体上随着坡面稳定程度的降低而减小,稳定区显著大于堆积区($P < 0.05$);阴坡 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数由大到小依次为堆积区、稳定区、失稳区,堆积区显著大于失稳区($P < 0.05$)(表 3)。

2.3 不同坡向土壤理化性质特征

土壤有机碳、pH、容重、含水率、全氮、全磷等 8

表 2 干热河谷阴、阳坡植被地上、地下部分养分

Tab. 2 Aboveground and underground nutrients of plants on shady and sunny slope in dry-hot valley (g · kg⁻¹)

样地	元素	地上部分养分含量			地下部分养分含量		
		稳定区	失稳区	堆积区	稳定区	失稳区	堆积区
阳坡	碳	339.63 ± 18.50Aa	320.45 ± 29.58Aab	310.90 ± 16.45Ab	266.77 ± 56.88Ba	231.43 ± 60.24Bab	170.63 ± 26.55Bb
	氮	12.56 ± 2.42Aab	14.35 ± 5.32Aa	10.24 ± 2.73Ab	6.46 ± 0.97Ba	7.25 ± 3.34Ba	3.92 ± 0.40Ba
	磷	0.50 ± 0.40Aa	0.40 ± 0.16Aa	0.62 ± 0.45Aa	0.47 ± 0.05Aa	0.51 ± 0.22Aa	0.44 ± 0.07Aa
	钾	5.35 ± 3.04Aa	4.88 ± 1.74Aa	6.65 ± 4.10Aa	4.03 ± 0.58Ab	5.56 ± 0.50Aa	6.09 ± 0.49Aa
阴坡	碳	320.11 ± 18.49Aa	323.37 ± 15.34Aa	309.08 ± 27.34Aa	339.67 ± 13.73Aa	294.19 ± 44.28Aa	221.36 ± 61.08Bb
	氮	8.42 ± 8.42Ab	7.20 ± 1.07Ab	20.15 ± 9.37Aa	6.55 ± 1.01Aa	5.54 ± 0.80Ba	7.01 ± 1.46Ba
	磷	0.48 ± 0.07Ab	0.51 ± 0.13Ab	1.10 ± 0.29Aa	0.35 ± 0.04Bb	0.40 ± 0.06Ab	0.63 ± 0.08Ba
	钾	5.35 ± 0.86Ab	5.12 ± 0.83Ab	20.79 ± 9.07Aa	4.17 ± 0.74Bb	4.13 ± 0.74Ab	13.71 ± 5.56Aa

注:不同大写字母表示同一坡向相同区段植被地上、地下养分在 $P < 0.05$ 水平差异显著;不同小写字母表示相同坡向不同区段植被养分在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

表 3 干热河谷阴、阳坡物种多样性指数

Tab. 3 Species diversity index of shady and sunny slope in dry-hot valley

样地	区段	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>P</i>
阳坡	稳定区	13	2.48 ± 0.07Aa	1.40 ± 0.07Aa	0.71 ± 0.03Aa	0.87 ± 0.03Aa
	失稳区	14	2.56 ± 0.04Aa	1.36 ± 0.03Aa	0.69 ± 0.02Aa	0.83 ± 0.03Aab
	堆积区	13	2.04 ± 0.12Bb	0.99 ± 0.1Bb	0.54 ± 0.04Bb	0.79 ± 0.04Ab
阴坡	稳定区	11	2.26 ± 0.15Aab	0.94 ± 0.11Bb	0.49 ± 0.05Bab	0.66 ± 0.05Bab
	失稳区	10	1.64 ± 0.24Bb	0.61 ± 0.13Bb	0.35 ± 0.07Bb	0.55 ± 0.09Bb
	堆积区	27	2.78 ± 0.13Aa	1.38 ± 0.09Aa	0.68 ± 0.04Aa	0.78 ± 0.04Aa

注:*S* 为物种数;*M* 为 Margalef 丰富度指数;*H* 为 Shannon-Wiener 多样性指数;*D* 为 Simpson 优势度指数;*P* 为 Pielou 均匀度指数。不同大写字母表示相同区段不同坡向多样性指数在 $P < 0.05$ 水平差异显著;不同小写字母表示相同坡向不同区段多样性指数在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

个指标的测定结果表明,除失稳区全氮和 pH 外,阴坡的土壤有机碳、含水率、全氮和 pH 值显著大于阳坡,而土壤速效磷显著小于阳坡($P < 0.05$)。阳坡与阴坡的土壤有机碳、含水率、全氮和水解氮由大到小依次为稳定区、失稳区、堆积区,有机碳、含水率在区段间差异显著($P < 0.05$),阳坡的全磷、速效磷含量由大到小依次为稳定区、失稳区、堆积区,失稳区 pH 显著大于稳定区、堆积区($P < 0.05$)(图 1)。

2.4 植被与环境因子的冗余分析

植被养分特征、物种多样性指数与环境因子间的冗余分析(RDA)二维排序图显示,坡向、区段、水解氮、有效磷和含水率的箭头连线较长,说明其对植被养分特征、物种多样性特征具有较强的解释能力(图 2)。环境因子对植被养分的总累积解释率为 76.2%,第 1、2 排序轴分别解释了 43.6%、19.9%

(图 2a);环境因子对多样性指数的总累积解释率为 85.7%,第 1、2 排序轴分别解释了 62.8%、12.4%(图 2b)。

冗余分析二维排序图只能定性反映植被养分特征、物种多样性特征与环境因子之间的相关性,难以定量环境因子对植被的贡献率。鉴于此,采用蒙特卡罗置换检验对 10 个环境因子进行筛选排序,结果表明区段、坡向、容重、全氮和含水率对植被养分分布具有显著影响,坡向、含水率、区段、容重、全氮、水解氮、pH 和全磷对多样性指数具有显著影响(表 4)。

3 讨论

3.1 土壤理化性质特征

坡向通过影响太阳辐射和降水的空间再分配,

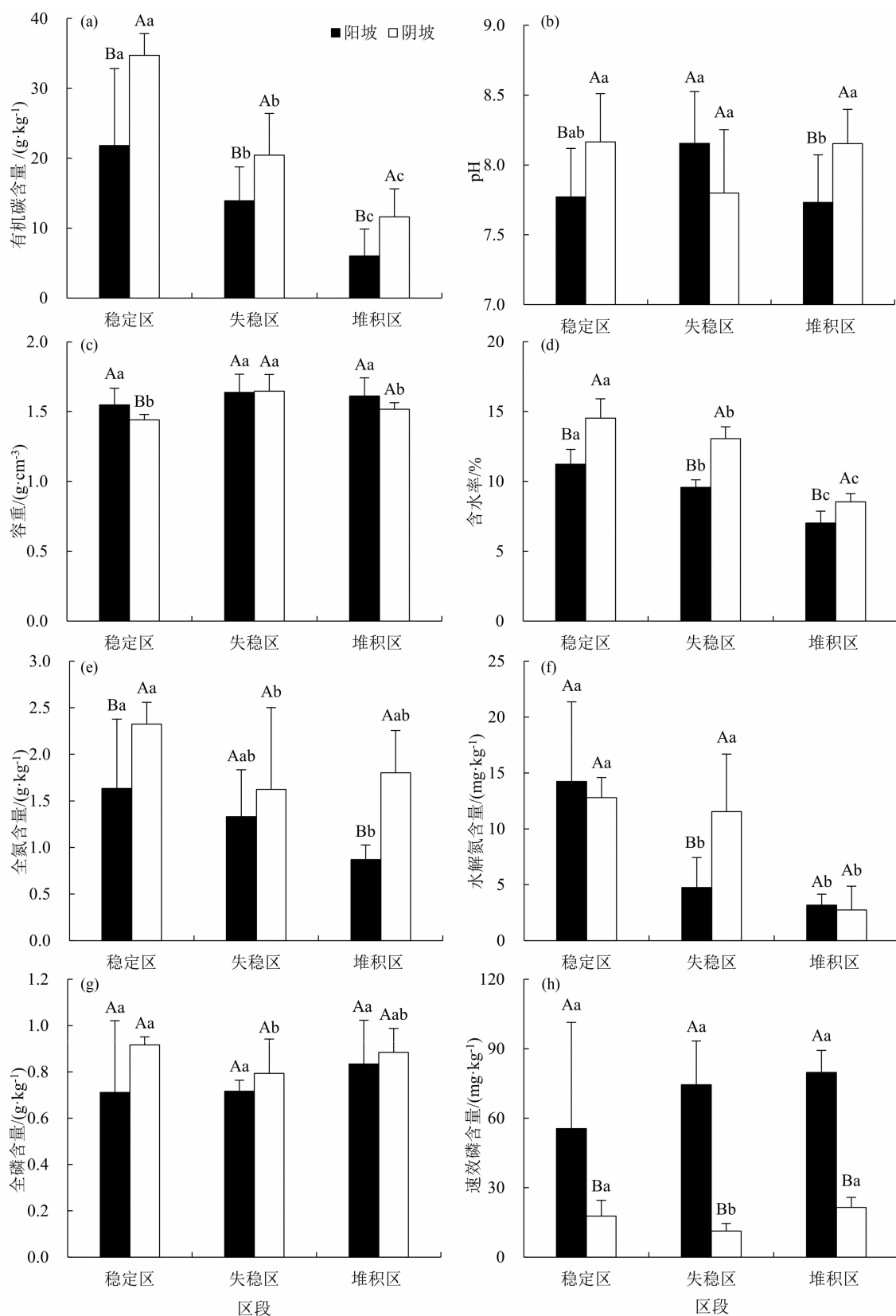


图1 干热河谷阴、阳坡土壤理化性质:

(a) 有机碳含量;(b)pH;(c)容重;(d)含水率;(e)全氮含量;(f)水解氮含量;(g)全磷含量;(h)速效磷含量

Fig. 1 Soil physical and chemical properties of shady and sunny slope in dry-hot vally: (a) organic carbon content; (b) pH; (c) bulk density; (d) water content; (e) total nitrogen content; (f) hydrolyzable nitrogen; (g) total phosphorus content; (h) available phosphorus content (不同大写字母表示相同区段不同坡向土壤理化性质在 $P < 0.05$ 水平显著差异; 不同小写字母表示相同坡向不同区段土壤理化性质在 $P < 0.05$ 水平显著差异。)

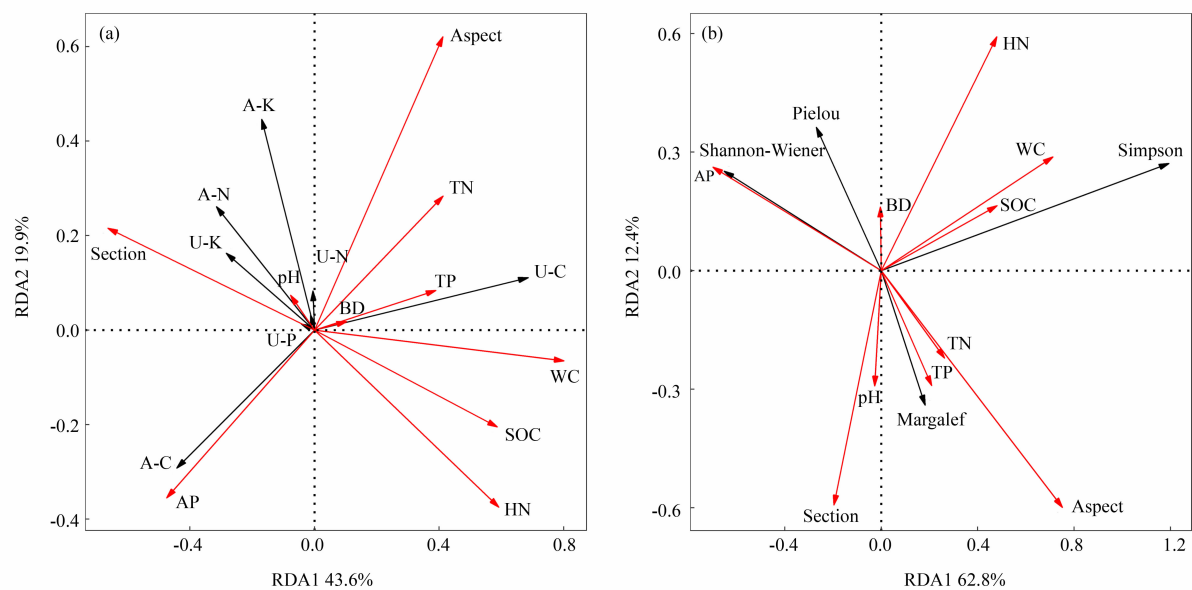


图2 植被养分、多样性指数与环境因子的 RDA 排序图:(a) 植被养分;(b) 物种多样性指数

Fig.2 RDA ranking of vegetation nutrients, diversity index and environmental factors;

(a) vegetation nutrients; (b) species diversity index

(A-C、U-C 分别代表植被地上、地下碳元素;A-N、U-N 分别代表植被地上、地下氮元素;A-P、U-P 分别代表植被地上、地下磷元素;A-K、U-K 分别代表植被地上、地下钾元素;Margalef 为 Margalef 丰富度指数;Shannon-Wiener 为 Shannon-Wiener 多样性指数;Simpson 为 Simpson 优势度指数;Pielou 为 Pielou 均匀度指数;Aspect 为坡向;Section 为区段;SOC 为有机碳;TN 为全氮;TP 为全磷;BD 为容重;WC 为含水率;HN 为水解氮;AP 为速效磷。)

表4 环境因子对植被养分、多样性指数的解释率和显著性检验

Tab.4 Interpretation rate and significance level of environmental factors on vegetation nutrients and diversity indexes

指标	环境因子	解释率排序	解释率	F 值	P 值
植被养分	坡向	2	14.53	8.950	0.002 **
	区段	1	24.36	11.219	0.001 **
	有机碳	8	0.95	0.890	0.451
	容重	3	6.67	4.507	0.025 *
	全氮	4	/	3.737	0.031 *
	全磷	7	1.56	2.095	0.134
	pH	6	6.20	2.198	0.126
	含水率	5	6.55	3.693	0.038 *
	水解氮	10	/	0.491	0.639
	速效磷	9	0.27	0.604	0.575
多样性指数	坡向	1	44.42	136.564	0.001 **
	区段	3	4.18	23.122	0.001 **
	有机碳	10	/	0.712	0.453
	容重	4	2.58	17.366	0.001 **
	全氮	5	/	16.245	0.001 **
	全磷	8	0.84	4.774	0.026 *
	pH	7	0.82	8.303	0.003 **
	含水率	2	19.90	38.853	0.001 **
	水解氮	6	6.08	10.555	0.002 **
	速效磷	9	0.40	0.830	0.382

注:/表示该环境因子与其他环境因子存在共同解释部分;*表示在0.05水平上影响显著;**表示在0.01水平上影响显著。

引起局部的水热条件差异,从而导致土壤异质性^[18]。本研究中,阴坡土壤有机碳和全氮整体上均显著大于阳坡,与 Gong^[19]的研究结果相似。土壤碳、氮主要来源于有机质分解,阴坡的水热条件优于阳坡,植被发育较好,能够产生更多的凋落物,故土壤碳、氮来源高于阳坡。此外,阳坡凋落物分解速率较阴坡更快,土壤中可溶性有机组分随地表径流的流失量大于阴坡,最终导致阳坡土壤有机碳、全氮含量低于阴坡^[20-21]。后期可通过削方减载等工程措施减缓边坡的坡度,控制土壤养分流失。本研究中,阳坡水解氮、速效磷含量显著高于阴坡,可能是因为阴坡立地条件优于阳坡,潮湿阴凉的土壤环境适合微生物生长繁殖,土壤中无机态氮的生物固持作用增强,土壤中可利用的速效氮和水解磷含量减少^[22]。

本研究中,阴、阳坡土壤有机碳、含水率、全氮和水解氮含量由大到小依次为稳定区、失稳区、堆积区,有机碳、含水率在区段间差异显著。土壤有机碳的积累受到植被状况、降解速率和环境条件的共同影响,稳定区的植被状况和凋落物数量有利于有机碳的积累;失稳区受到滑坡、泥石流的干扰,大量植被因根系受损而死亡,导致草地发生逆向演替甚至变成裸地,碳储能力较低;堆积区植被群落长期处于演替初期,植物固碳能力降低,土壤有机碳含量较低^[20,23]。自然状态下,土壤中氮素的产生主要有生物固氮和降水两种途径^[24],稳定区土壤中微生物数量较多,微生物固氮作用增强,土壤蓄水能力较强,能有效留存降水中的氮含量;失稳区和堆积区生境的改变削弱了微生物固氮作用,土壤中全氮和水解氮含量减少。因此,建议后期在失稳区和堆积区引种根系发达、抗逆性较强的乡土植被,提高植被覆盖度和生态系统稳定性,促进失稳性坡面上植被群落的正向演替进程。

3.2 植被地上、地下养分特征

植被为适应不同生境,通过调节养分含量在地下、地上部分的分配提高养分利用效率,进而维持其生长发育^[25]。本研究发现阳坡植被地上部分的碳、氮含量显著大于地下部分,这与前人研究结果一致^[26]。这可能是因为阳坡土壤多为土质贫瘠的初育土^[27],无法为植被输送足够的养分,因此植被将更多资源投入到地上部分以增加有机物的合成^[28-29],促进植被的生长。本研究中,植被碳、氮含量在阴、阳坡的分布格局不一致,主要表现为阴坡地

下部分植被碳、氮含量大于阳坡,阳坡地上部分植被碳、氮含量则大于阴坡,与汝海丽^[30]的研究结果相似。相较于阴坡而言,阳坡土壤微生物代谢能力较低,土壤净氮矿化速率较低,土壤养分含量低,植被为适应贫瘠的土壤环境,改变生理性策略将更多资源投入到地上部分来提高其抗逆性^[31],导致阴坡植被地上部分碳、氮含量小于阳坡。另一方面也可能与阳坡坡度较大,土壤养分流失严重,不利于植被的吸收和利用有关。

本研究中,阴、阳坡植被地上、地下部分碳含量均随坡面稳定程度的降低而降低,由大到小依次为稳定区、失稳区、堆积区,主要原因为:(1)稳定区土壤通透性较好,有利于根系的生长和养分吸收,而失稳区和堆积区土壤容重大,土壤通透性较差,不利于根系进行呼吸作用,削弱了根系吸收养分能力^[32];(2)稳定区植被盖度较大,叶片光合作用强度大,植物积累了大量糖类,导致叶片碳含量高。此外,本研究中堆积区植被氮、磷和钾含量在地上部分和地下部分均显著大于稳定区和失稳区,主要原因为:(1)堆积区处于坡面下部,土壤容重较大,渗透能力强,坡面径流中的可溶性有机组分随水分下渗而留存在土壤中,导致短期土壤可利用养分较高;(2)植被类型及其遗传特性引起的养分利用策略差异性,稳定区植被主要为多年生密丛型的拟金茅、扭黄茅,而堆积区主要为植株矮小的一年生草本植物,堆积区植被为适应干旱和养分胁迫下,提前进入生殖生长阶段,降低营养生长速度,植物体内保存大量养分。

3.3 植被物种多样性特征

本研究发现阳坡 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数整体上均大于阴坡,与刘旻霞^[33]得出的结论相反。其原因可能是阳坡受到人为活动(公路建设)和自然灾害(滑坡、泥石流)的中等程度干扰,坡面演替过程多次中断,甚至重新开始先锋演替过程,导致各演替阶段物种同时存在,有助于维持群落物种高多样性,阳坡物种多样性明显高于阴坡^[34]。

本研究中,阳坡失稳区物种数和 Margalef 丰富度指数均大于稳定区、堆积区,可能是因为失稳区遭到滑坡、泥石流的干扰,群落处于先锋阶段,尚未形成优势物种,处于草本植物抢占生态位阶段,因此物种数和 Margalef 丰富度指数较大。此外,本研究中,

阴、阳坡 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数分布规律不一致,一方面是因为阴坡失稳性坡面的堆积区位于河谷沟道附近,水分供应状况优于阳坡,更有利于物种生存,且堆积区内植被以低矮草本占优势,能够充分利用光照等因素,演替初期草本植物数量增多,因此堆积区物种多样性大于阳坡^[35];另一方面,与阳坡相比,阴坡稳定区植被盖度较大,限制了草本植物对光照资源的利用,喜阴植物在演替中逐渐取代喜阳植物,演替达到相对稳定阶段,植被物种较为单一,多样性指数反而小于阳坡。因此,建议后期对于干热河谷失稳性坡面进行植被恢复时,应在阳坡的失稳区和堆积区以及阴坡的稳定区适当引种一些其他先锋物种,增加该区段物种多样性,提高其抵抗外界环境干扰的能力,促进植被恢复进程。

3.4 植被与环境因子的关系

干热河谷失稳性坡面上植被养分(地上、地下)与环境因子的 RDA 分析结果表明,环境因子对植被养分的总累积解释率为 76.2%,第 1、2 排序轴分别解释了 43.6%、19.9%。蒙特卡罗置换检验结果表明区段、坡向是影响植被养分分布的极显著影响因子,滑坡、泥石流的频繁发生导致失稳区和堆积区土壤结构严重受损、土壤养分大量流失,土壤与植被的养分循环系统的动态平衡被打破,影响植被养分的积累。就坡向而言,阴、阳坡水热条件差异较大,导致土壤养分积累速率差异,通过植被-土壤养分循环系统影响植被养分分布。容重和含水率是影响植被养分分布的显著影响因子,与刘育红^[36]的研究结果相似,这是因为根系作为植被吸收、输送养分的重要功能器官,根系的生长与土壤有效水的贮存量密切相关,而干热河谷有效水贮存量有限,限制了植被根系的生长发育。此外,土壤容重随着坡面稳定程度的下降而增大,土壤产生的高机械阻力抑制了根系对土壤水分和养分的吸收^[42]。

干热河谷失稳性坡面上多样性指数与环境因子的 RDA 分析结果显示,环境因子对多样性指数的总累积解释率为 85.7%,第 1、2 排序轴分别解释了 62.8%、12.4%。蒙特卡罗置换检验结果表明坡向、含水率、区段、容重、全氮、水解氮、pH 是影响多样性指数的极显著影响因子,全磷是影响物种多样性指数的显著影响因子,与白晓航^[37]的研究结果相似。土壤全磷含量的提高有利于促进植被的生长发育和

定居过程,进而提高群落多样性,故本研究全磷与 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数呈正相关关系。但土壤全磷含量对植被物种多样性的影响并非都是正相关关系,如本研究全磷与 Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数呈负相关关系,主要原因是植被群落在逐渐趋于稳定的过程中,不同种植物类型在对有限的空间等资源的竞争中出现了相互抑制现象,进而影响物种多样性^[38]。因此,后期可通过引种不同生态位的乡土植物来治理失稳性坡面,避免因资源竞争而产生的相互抑制现象。

本文研究结果促进了对干热河谷不同坡向失稳性坡面上植被与环境因子间互馈机制的认识,在一定程度上可以指导干热河谷失稳性坡面的治理和植被恢复工作,但其他环境因子如土壤温湿度、微生物、酶活性等对植被生长的影响作用尚不明了,有待进一步深入研究,以期在更广的维度揭示植被与环境因子间的关系,为干热河谷生态系统植被恢复提供参考。

4 结 论

本文分析了干热河谷阴、阳坡失稳性坡面上植被养分特征、物种多样性特征和环境因子特征,并利用冗余分析方法探究了植被养分、多样性指数对环境因子的响应机制,得出如下结论:

(1) 阳坡不同区段植被地上部分碳、氮含量显著大于地下,阴坡仅堆积区碳、氮元素及失稳区氮元素含量地上部分显著大于地下。

(2) 阳坡物种多样性指数整体上大于阴坡,并随着坡面稳定程度的降低而减小,稳定区显著大于堆积区;阴坡多样性指数由大到小依次为堆积区、稳定区、失稳区,堆积区显著大于失稳区。

(3) 土壤有机碳、含水率、全氮和水解氮含量随着坡面稳定程度的降低而减小,容重、全磷和速效磷含量则增大。

(4) RDA 分析结果表明坡向、区段、容重是影响植被养分、多样性指数的显著影响因子,解释率分别为 14.53%、44.42%;24.36%、4.18%;6.67%、2.58%。

参考文献 (References)

[1] 阮长明,杜寿康,孙永玉,等.金沙江干热河谷不同区段土壤碳

- 氮磷化学计量和酶活性研究[J]. 环境科学研究, 2022, **35** (11): 2486 – 2494. [RUAN Changming, DU Shoukang, SUN Yongyu, et al. Stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus and soil enzyme activity at various reaches of the dry-hot valley of Jinsha River [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35** (11): 2486 – 2494] DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.07.21
- [2] 王妍方, 李仕杰, 罗琪, 等. 61年来滇西南地区干热河谷与热带雨林地区气候变化分析[J]. 西部林业科学, 2021, **50**(2): 145 – 153. [WANG Yanfang, LI Shijie, LUO Qi, et al. Climate change of dry-hot valley and tropical rainforest in southwest Yunnan in the past 61 years [J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, **50**(2): 145 – 153] DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2021.02.020
- [3] 方海东, 纪中华, 杨艳鲜, 等. 金沙江干热河谷新银合欢人工林枯落物层持水特性研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(5): 52 – 55. [FANG Haidong, JI Zhonghua, YANG Yanxian, et al. Study on litter water retaining capacity of *Leucaena Leucocephala* plantation in Jinsha River hot and dry valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(5): 52 – 55] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2005.05.013
- [4] 高若允, 蔡子昕, 杨柳生, 等. 气候和区段对昆明蒋家沟流域山地失稳性坡面土壤化学计量特征的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, **42**(4): 170 – 177. [GAO Ruoyun, CAI Zixin, YANG Liusheng, et al. The influence of climate and sections on the stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus on unstable mountain slopes in Jiangjiagou watershed, Kunming [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2022, **42**(4): 170 – 177] DOI: 10.11929/j.swfu.202109066
- [5] 余杭, 高若允, 杨柳生, 等. 震后生态恢复初期植被-土壤的耦合关系研究——以汶川县威州镇、绵竹市汉旺镇为例[J]. 北京林业大学学报, 2021, **43**(5): 53 – 63. [YU Hang, GAO Ruoyun, YANG Liusheng, et al. Coupling relationship between vegetation and soil in the early stage of ecological restoration after earthquake: A case study of Weizhou town in Wenchuan county and Hanwang town in Mianzhou city of Sichuan province, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, **43**(5): 53 – 63] DOI: 10.12171/j.1000-1522.20200289
- [6] ACHAT D L, AUGUSTO L, GALLET-BUDYNEK A, et al. Future challenges in coupled C-N-P cycle models for terrestrial ecosystems under global change: A review [J]. Biogeochemistry, 2016, **131** (1-2): 173 – 202. DOI: 10.1007/s10533-016-0274-9
- [7] 刘颖, 贺静雯, 余杭, 等. 干热河谷优势灌木细根、粗根与叶片养分(C、N、P)含量及化学计量比[J]. 山地学报, 2020, **38** (5): 668 – 678. [LIU Ying, HE Jingwen, YU Hang, et al. Nutrients (C, N, P) contents and stoichiometric ratios of fine root, coarse root and leaf in dominant shrubs in dry-hot valley [J]. Mountain Research, 2020, **38**(5): 668 – 678] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000544
- [8] 余杭, 高若允, 杨文嘉, 等. 干热河谷优势草本植物叶片、根系及土壤碳氮磷含量及关系[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (3): 727 – 735. [YU Hang, GAO Ruoyun, YANG Wenjia, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents and relationships of C, N, P of leaf, root and soil and their relationships in dominant herbaceous plants in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, **28**(3): 727 – 735] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.01008
- [9] 何周窈, 王勇, 苏正安, 等. 干热河谷冲沟沟头活跃度对植物群落结构的影响[J]. 草业学报, 2020, **29**(9): 28 – 37. [HE Zhouyao, WANG Yong, SU Zheng'an, et al. Differences in vegetation community structure in hot-dry valleys in Yunnan province related to valley stability [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, **29** (9): 28 – 37] DOI: 10.11686/cyxb2019529
- [10] TANG Rong, LIU Erxi, ZHANG Yazhou, et al. Genetic diversity and population structure of *Amorphophallus albus*, a plant species with extremely small populations (PSESP) endemic to dry-hot valley of Jinsha River [J]. BMC Genetics, 2020, **21**(1): 102 – 112. DOI: 10.1186/s12863-020-00910-x
- [11] DUAN Xu, HAN Jiaojiao, ZHAO Yangyi. Characterization of soil water by the means of hydrogen and oxygen isotope ratio at dry-wet season under different soil layers in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. Open Chemistry, 2020, **18**(1): 822 – 832. DOI: 10.1515/chem-2020-0112
- [12] MA Tianshu, DENG Xiangwen, CHEN Liang, et al. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification [J]. Science of the Total Environment, 2020, **736**: 1 – 139667. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139667
- [13] 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.1000-1552.2019066
- [14] 马剑, 刘贤德, 何晓玲, 等. 祁连山典型灌丛群落结构特征及其多样性研究[J]. 干旱区地理, 2021, **44**(5): 1427 – 1437. [MA Jian, LIU Xiande, HE Xiaoling, et al. Structural characteristics and diversity of typical shrub communities in Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2021, **44**(5): 1427 – 1437] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.05.23
- [15] 刘旻霞, 车应弟, 李俐蓉, 等. 南高寒草甸微地形上植物叶片特征与环境因子的冗余分析[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(9): 2473 – 2480. [LIU Minxia, CHE Yingdi, LI Lirong, et al. Redundancy analysis of leaf traits and environmental factors of alpine meadow in southern Gansu province [J]. Chinese Journal of

- Ecology, 2017, **36**(9): 2473 – 2480] DOI: 10.13292/j.1000 – 4890.201709.028
- [16] 国家林草局. 森林土壤水分——物理性质的测定: LY/T1215 – 1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999. [State Forestry Bureau. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215—1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999]
- [17] 龙健, 廖洪凯, 李娟, 等. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤—石漠化关系研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2131 – 2138. [LONG Jian, LIAO Hongkai, LI Juan, et al. Relationships between soil and rocky desertification in typical Karst Mountain area based on redundancy analysis [J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 2131 – 2138] DOI: 10.13227/j.hjks.2012.06.054
- [18] 李瑞, 刘旻霞, 张灿, 等. 甘南亚高寒草甸不同坡向土壤微生物群落分布特征[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(11): 1884 – 1891. [LI Rui, LIU Minxia, ZHANG Can, et al. Distribution characteristics of soil microbial communities along different slope direction of Gannan sub-alpine meadows [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(11): 1884 – 1891] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 – 5906.2017.11.009
- [19] GONG X, BRUECK H, GIES K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid Environments, 2008, **72**(4): 483 – 493. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2007.07.001
- [20] 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 Environmental Biology, 2020, **26**(5): 1192 – 1199] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 – 687x.2019.09052
- [21] GBUREK W J, SHARPLEY A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(2): 267 – 277. DOI: 10.2134/jep1998.00472425002700020005x
- [22] 牛丹, 黄懿梅, 倪银霞, 等. 不同退耕还草方式下宁夏南部山区土壤氮素转化速率与微生物变化的耦合关系[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(10): 1586 – 1595. [NIU Dan, HUANG Yimei, NI Yinxia, et al. Coupling relations of nitrogen transformation rate and microbial changes during soil mineralization under different methods of returning farmland and grassland in the mountainous area of southern Ningxia, northwest China [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(10): 1586 – 1595] DOI: 10.13198/j.issn.1001 – 6929.2015.10.13
- [23] SINGH P, BENBI D K. Soil organic carbon pool changes in relation to slope position and land-use in Indian lower Himalayas [J]. Catena, 2018, **166**: 171 – 180. DOI: 10.1016/j.catena.2018.04.006
- [24] 王淑平. 土壤有机碳和氮的分布及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2003: 9 – 10. [WANG Shuping. Distribution of soil organic carbon and nitrogen and their responses to climatic change [D]. Beijing: Institute of Botany, CAS, 2003: 9 – 10]
- [25] ACHAT D L, AUGUSTO L, GALLET-BUDYNEK A, et al. Future challenges in coupled C-N-P cycle models for terrestrial ecosystems under global change: A review [J]. Biogeochemistry, 2016, **131**(1 – 2): 173 – 202. DOI: 10.1007/s10533 – 016 – 0274 – 9
- [26] 贺海波, 李彦. 干旱、盐胁迫条件下两种盐生植物生物量分配对策的研究[J]. 干旱区研究, 2008, **25**(2): 242 – 247. [HE Haibo, LI Yan. Study on measures of biomass allocation of two desert halophyte species under drought and salt stress [J]. Arid Zone Research, 2008, **25**(2): 242 – 247] DOI: 10.03866/j.azr.2008.02.003
- [27] 陈爱民, 邓浩俊, 严思维, 等. 泥石流频发流域物源区坡面不同植被类型土壤质量综合评价[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(2): 249 – 256. [CHEN Aimin, DENG Haojun, YAN Siwei, et al. Comprehensive assessment of soil quality under different vegetation types in the provenance slope of the area of high-frequency debris flow [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2016, **22**(2): 249 – 256] DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.07038
- [28] HOEKSEMA J D, CHAUDHARY V B, GEHRING C A, et al. A meta - analysis of context - dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi [J]. Ecology Letters, 2010, **13**(3): 394 – 407. DOI: 10.1111/j.1461 – 0248.2009.01430.x
- [29] 陈静, 李玉霖, 崔夺, 等. 氮素及水分添加对科尔沁沙地 4 种优势植物地上生物量分配的影响[J]. 中国沙漠, 2014, **34**(3): 696 – 703. [CHEN Jing, LI Yulin, CUI Duo, et al. Response of aboveground biomass allocation in four dominant species to water and nitrogen addition in the Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2014, **34**(3): 696 – 703] DOI: 10.7522/j.issn.1000 – 694X.2013.00372
- [30] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(10): 1752 – 1763. [RU Haili, ZHANG Haidong, JIAO Feng, et al. Plant and soil C, N, P stoichiometric characteristics in relation to micro-topography in the Hilly Loess Plateau Region, China [J]. Journal of Natural Resources, 2016, **31**(10): 1752 – 1763] DOI: 10.11849/zrzyxb.20151216
- [31] STERNBERG M, SHOSHANY M. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semiarid and an arid site in Israel [J]. Ecological Research, 2001, **16**(2): 335 – 345. DOI: 10.1046/j.1440 – 1703.2001.00393.x
- [32] 姚颖, 刘建明, 刘忠玲, 等. 不同坡位山杏天然林生长和土壤理化性质比较[J]. 森林工程, 2019, **35**(6): 36 – 41 + 54.

- [YAO Ying, LIU Jianming, LIU Zhongling, et al. Comparison on *Armeniaca sibirica* natural forest growth and soil physicochemical properties in different slope position [J]. Forest Engineering, 2019, **35**(6): 36–41 + 54] DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2019.06.023
- [33] 刘旻霞, 南笑宁, 张国娟, 等. 高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系[J]. 生态学报, 2021, **41**(13): 5398–5407. [LIU Minxia, NAN Xiaoning, ZHANG Guojuan, et al. Relationship between species diversity and functional diversity of plant communities on different slopes in alpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(13): 5398–5407] DOI: 10.5846/stxb202003250690
- [34] LIU Xuehua, LIU Xiaofei, WU Liulin, et al. Diversity in phytoplankton communities: A field test of the intermediate disturbance hypothesis [J]. Ecological Engineering, 2019, **129**: 54–60. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.12.009
- [35] 赵安, 周晓雷, 田青, 等. 迭山北坡云冷杉林火烧迹地灌木群落特征和物种多样性研究[J]. 西部林业科学, 2021, **50**(5): 90–100. [ZHAO An, ZHOU Xiaolei, TIAN Qing, et al. Analysis of shrub community and species diversity in burned area of *Picea asperata*–*Abies fabri* forest in the northern slope of Dieshan Mountains [J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, **50**(5): 90–100] DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2021.05.013
- [36] 刘育红, 魏卫东, 杨元武, 等. 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J]. 西北农业学报, 2018, **27**(4): 480–490. [LIU Yuhong, WEI Weidong, YANG Yuanwu, et al. Redundancy analysis on relationships between grassland vegetation and soil factors on degraded alpine meadow [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, **27**(4): 480–490] DOI: 10.7606/j.issn.1004–1389.2018.04.004
- [37] 白晓航, 张金屯, 曹科, 等. 小五台山亚高山草甸的群落特征及物种多样性[J]. 草业科学, 2016, **33**(12): 2533–2543. [BAI Xiaohang, ZHANG Jintun, CAO Ke, et al. Community characteristic and species diversity of subalpine meadows in Xiaowutai Mountain [J]. Pratacultural Science, 2016, **33**(12): 2533–2543] DOI: 10.11829/j.issn.1001–0629.2016–0281
- [38] 何雅琴, 曾纪毅, 陈国杰, 等. 福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(3): 759–769. [HE Yaqin, ZENG Jiye, CHEN Guojie, et al. Characteristics and species diversity of typical forest community in Dalian Island of Pingtan, Fujian, China [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2022, **28**(3): 759–769] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2020.12002.

Redundancy Analysis of the Relationship Between Plant and Environmental Factors on Shady and Sunny Unstable Slope in Dry-hot Valley

GAO Ruoyun^{1,2,3}, YANG Liusheng^{1,2,3}, TIAN Xue^{1,2,3}, YANG Hongfei^{1,2,3}, 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 Water Resources, Chengdu 610299, China;

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

Abstract: Unstable slopes in dry-hot valleys of Southwest China are not only the focus of debris flow basin management, but also the key to inhibit the continuous reverse evolution of ecosystems in valleys. However, for the study of fragile ecosystems on unstable slopes in dry-hot valleys, the internal relationship between vegetation and environmental factors on unstable slopes has not been fully explored, and there is a lack of targeted ecological restoration measures.

In this paper, the shady and sunny unstable slopes in the Jiangjiagou dry-hot valley in Dongchuan, Yunnan province, China were selected for field surveys and samples collection. The nutrient contents of the aboveground and underground parts of vegetation and the physicochemical properties of soil were determined. Redundancy analysis (RDA) was used to investigate the relationship between vegetation nutrients, diversity characteristics and

environmental factors on unstable slopes.

The results showed that: (1) The nutrient content of plants in different slope aspects differed significantly between the aboveground and the underground. The aboveground carbon and nitrogen contents of plants in different areas of the sunny slope were significantly larger than those of the underground respectively ($P < 0.05$), while they were significantly larger in unstable and deposition areas of the shady slope than the underground, and the stable area was significantly larger than that in the deposition area ($P < 0.05$). (2) The Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, Simpson dominance index, and Pielou evenness index in sunny slope were significantly larger than the shady slope ($P < 0.05$). These four indexes had higher values in stable area than in deposition area for sunny slope, whereas they were reverse for shady slope ($P < 0.05$). (3) Soil organic carbon, water content, total nitrogen and hydrolyzed nitrogen decreased with the decrease of slope stability, whereas soil bulk density, total phosphorus and available phosphorus increased. (4) The RDA results showed that environmental factors well explained the changes of vegetation nutrients and diversity index. Aspect, section, and soil bulk density were the significant influencing factors, explaining 14.53% and 44.42%, 24.36% and 4.18%, and 6.67% and 2.58% of the variations in vegetation nutrients and diversity index, respectively. The results revealed the response and adaptation strategies of vegetation nutrient characteristics and species diversity characteristics to different environmental factors in dry-hot valley. This research also can provide a theoretical basis for the treatment of unstable slopes and the restoration of vegetation ecosystems in dry-hot valleys.

Key words: dry-hot valley; unstable slope; vegetation; environmental factors; redundancy analysis; Jiangjiagou