

引用格式: 刘忆南, 林苡婧, 李奇, 孙凡, 林勇明. 蒋家沟失稳性坡面不同区段植被-土壤的耦合关系[J]. 山地学报, 2024, 42(4): 456-470.  
LIU Yinan, LIN Yijing, LI Qi, SUN Fan, LIN Yongming. Coupling relationship between vegetation and soil in different zones of unstable slopes in the Jiangjiagou valley, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(4): 456-470.

## 蒋家沟失稳性坡面不同区段植被-土壤的耦合关系

刘忆南<sup>a, b</sup>, 林苡婧<sup>a</sup>, 李奇<sup>a, b</sup>, 孙凡<sup>a, b</sup>, 林勇明<sup>a, b\*</sup>

(福建农林大学 a. 菌草与生态学院(碳中和学院); b. 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:** 植被和土壤的耦合关系是衡量生态系统协调可持续发展的关键。当前关于植被和土壤之间协同作用机理的研究多集中于人类活动干扰或自然演替的生态系统, 灾害干扰生态系统恢复过程的研究仅关注灾害造成的坡面失稳区, 忽视了灾害对坡面整体生态过程的影响效应。因此, 本文选择蒋家沟流域 3 个气候区具有代表性的 5 个失稳性坡面(包括稳定区、失稳区和堆积区 3 个区段)为研究对象, 基于 7 个植被指标和 8 个土壤指标的评价体系, 采用熵权法和主成分分析法确定各指标综合权重和影响失稳性坡面生态系统的主要因子, 并构建植被-土壤耦合协调度模型。结果表明: (1) Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数是影响蒋家沟失稳性坡面生态系统稳定性的最主要因子; 植被生物量和土壤有效钾、有机碳、全氮、水解氮也是重要的影响因子。(2) 蒋家沟失稳性坡面稳定区的植被和土壤综合评价指数总体上均高于失稳区和堆积区; 温带湿润山岭区的植被综合评价指数最高, 亚热带和暖温带半湿润区次之, 干热河谷区最低; 亚热带和暖温带半湿润区的土壤综合评价指数明显低于其他 2 个气候区。(3) 亚热带和暖温带半湿润区、干热河谷区的失稳区和堆积区均为植被土壤初级协调发展, 其稳定区和温带湿润山岭区全部区段均为植被土壤中级协调发展; 温带湿润山岭区整体表现为土壤滞后发展, 干热河谷区整体表现为植被滞后发展。研究结果可为制定最佳策略以促进蒋家沟脆弱生态系统快速有效恢复和协调可持续发展提供理论支撑。

**关键词:** 失稳性坡面; 植被; 土壤; 耦合; 蒋家沟

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** A

土壤是地球生命赖以生存的物质宝库, 为植被提供必需的养分和环境, 其理化特征和演化规律是影响植被群落组成和分布的关键<sup>[1]</sup>。植被恢复是减少土壤侵蚀和土地退化的重要手段, 不仅能够增加生物多样性, 形成复杂有序的结构体系, 植被的凋落物和根系等也有助于增加土壤养分含量、调节水分循环, 从而改善土壤理化特征<sup>[2-3]</sup>。外界条件变化同样影响植被和土壤的性质, 如气候类型、地形地貌特征、恢复年限以及人类活动等因素的变化可作

用于土壤结构形成、植被多样性以及养分周转速率等方面<sup>[4]</sup>, 进而改变植被-土壤复合系统的功能。植被和土壤在生态系统发展过程中相互约束, 共同引导群落的发展演替方向, 最终在气候条件的制约下形成相对平衡的顶极群落<sup>[5]</sup>。

在中国脆弱生态区, 泥石流、滑坡等地质灾害摧毁和掩埋大面积植被, 使植被对土体的锚固作用显著减弱, 同时土壤结构破坏造成土壤微生物所依赖的生存载体遭到损害甚至消失, 制约养分周转循环,

收稿日期(Received date): 2024-05-14; 改回日期(Accepted date): 2024-08-16

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42071132); 福建省自然科学基金(2021J01060)。[National Natural Science Foundation of China (42071132); Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J01060)]

作者简介(Biography): 刘忆南(1998-), 女, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要研究方向: 自然地理学。[LIU Yinan (1998-), female, born in Changde, Hunan province, M. Sc. candidate, research on physical geography] E-mail: lyn181120@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 林勇明(1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 自然地理学、恢复生态学。[LIN Yongming (1982-), male, Ph. D., professor, research on physical geography and restoration ecology] E-mail: monkey1422@163.com

从而导致生态系统的稳定性降低,植被-土壤复合系统功能退化<sup>[6-7]</sup>。当前研究主要聚焦植被群落演替和土壤性质改变的单向关系<sup>[8-9]</sup>;两者之间协同作用机理的研究多集中于人类活动干扰或自然演替的生态系统<sup>[10-13]</sup>。此外,关于灾害干扰生态系统恢复过程的研究侧重于演变特征、影响评价以及恢复成效等方面<sup>[14-16]</sup>,灾害干扰后植被-土壤耦合关系的研究主要以滑坡或崩塌造成的失稳区为研究对象<sup>[4]</sup>,忽视了灾害体上方尚存的稳定区和下方的堆积区,无法准确认识灾害对坡面整体生态过程的影响效应。

已有研究<sup>[8]</sup>表明,不同海拔梯度存在温度、光照、水分等多种环境因素的差异,造成植被和土壤之间的作用程度和发展步调有所不同。然而,不同海拔梯度、不同灾害干扰程度对灾害干扰生态系统恢复过程植被-土壤的耦合关系究竟产生多大影响尚不清楚,无法清晰表述植被-土壤的耦合差异对生态系统发展的影响,难以提出针对性的治理和恢复方案。本研究以云南东川蒋家沟流域为研究区,选择温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区以及干热河谷区具有代表性的5个失稳性坡面(包括稳定区、失稳区和堆积区3个区段)为研究对象,将失稳性坡面作为整体,运用耦合度模型、耦合协调度模型和主成分分析法,探究蒋家沟不同气候区失稳性坡面不同区段植被-土壤的耦合关系和造成不同坡面耦合差异的主要因子,以期深入理解灾害干扰生态系统恢复过程与生态学机制,为蒋家沟实现植被和土壤的正向协同演替提升提供理论支撑,进而优化生态恢复措施,促进蒋家沟脆弱生态系统快速有效恢复和协调可持续发展。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市东川区蒋家沟(103°06'~103°13'E、26°13'~26°17'N),区域内海拔高度1000~3300 m,相对差异较大,气候、植被和土壤等地理要素垂直带性分异明显,干湿季节差异大,雨季主要集中在6—9月。以海拔高度为依据可将该区域划分为温带湿润山岭区(>2200 m)、亚热带和暖温带半湿润区(1600~2200 m)、干热河谷区(<1600 m)3个气候区。温带湿润山岭区植被覆

盖度高,主要植被包括云南松(*Pinus yunnanensis*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等;亚热带和暖温带半湿润区主要植被包括云南松(*Pinus yunnanensis*)和铁苋菜(*Acalypha australis*)等;干热河谷区植被稀疏,主要植被包括扭黄茅(*Heteropogon contortus*)和荩草(*Arthraxon hispidus*)等<sup>[15,17-18]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置

结合实地调查和前期研究<sup>[18]</sup>,于蒋家沟设置温带湿润山岭区大地阴坡和小尖风阳坡、亚热带和暖温带半湿润区多照沟阳坡、干热河谷区大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡共5块失稳性坡面标准样地(图1),大小均为50 m×400 m,形成历史约40 a,每个坡面由上至下均由稳定区、失稳区和堆积区3个区段组成(样地概况详见相关文献<sup>[18]</sup>)。稳定区基本未受滑坡影响,植被覆盖度高,生长植被主要为原生灌草或云南松人工林;失稳区为滑坡作用的主要区域,地表裸露较多,土质疏松;堆积区为坡度平缓的滑坡堆积体,其表层多为粗砾石,内部则以细粒物质为主。

#### 1.2.2 群落特征调查与样品采集

##### (1) 植被样品采集

在有乔木分布的区段随机设置3个20 m×20 m的样方,对乔木的种类、数量、盖度、高度和胸径等进行记录,于每个乔木样方中随机设置3个5 m×5 m的灌木小样方和3个1 m×1 m的草本小样方,分别对灌木和草本的种类、数量、盖度和高度等进行记录;在无乔木分布但有灌木分布的区段随机设置3个5 m×5 m的样方,再于每个灌木样方中随机设置3个1 m×1 m的草本小样方,分别对灌木和草本的种类、数量、盖度和高度等进行记录;在仅有草本分布的区段随机设置9个1 m×1 m的样方,对草本的种类、数量、盖度和高度等进行记录。对各区段面积1 m<sup>2</sup>的草本和地面凋落物进行全部收获,并选取长势良好的灌木和乔木摘取适量叶片,记录好对应的坡面、区段和总盖度,用于测定植被碳含量、生物量和计算物种多样性相关指数。

##### (2) 土壤样品采集

在5块样地的3个区段分别随机抽取3个5 m×5 m的样方,采用5点取样法进行取土。利用100 cm<sup>3</sup>环刀采集0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm的原状土,用于测定土壤容重;同时,采集表层土

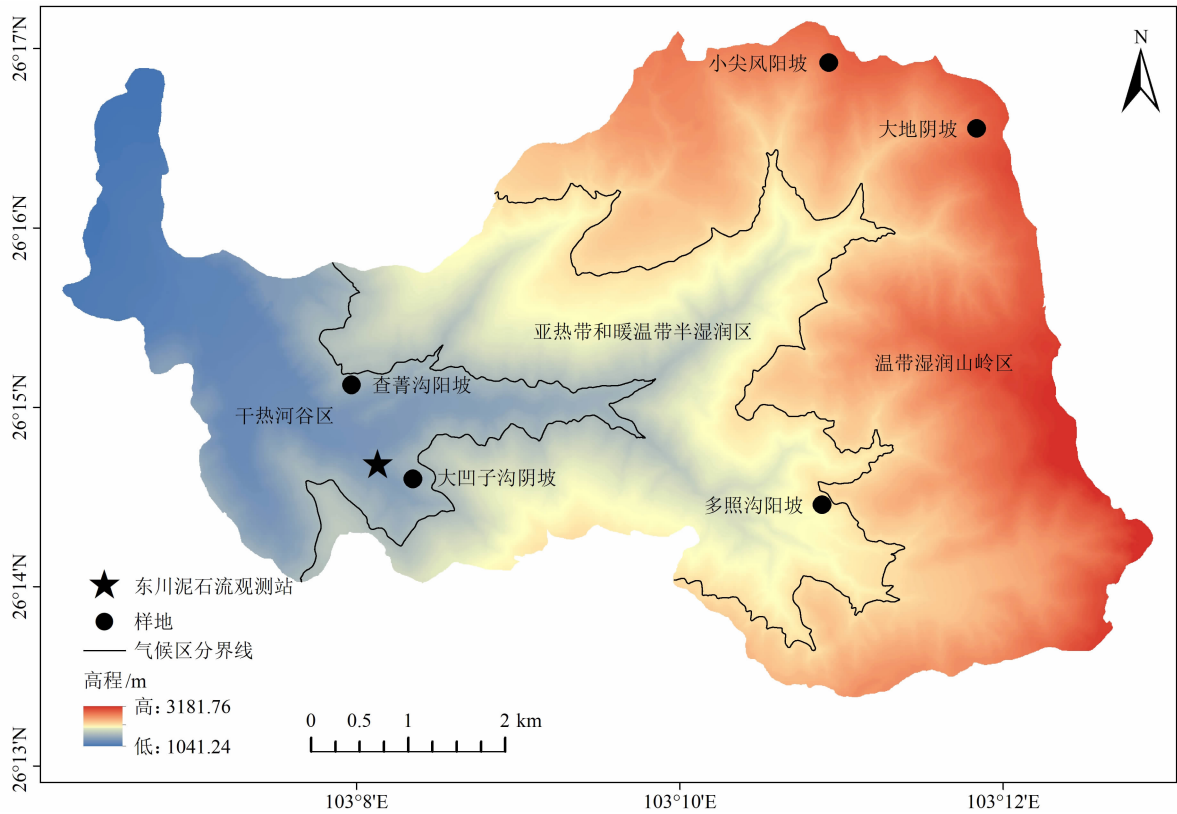


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of research area

(0~20 cm),用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、水解氮(HN)、有效磷(AP)和有效钾(AK)等养分含量和pH值。

### 1.2.3 样品测定

利用环刀法测定土壤容重,重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤SOC含量和植被碳含量,半微量凯氏定氮法测定土壤TN含量,钼锑抗比色法测定土壤TP含量和AP含量,pH计测定土壤pH值,碱解-扩散法测定土壤HN含量,原子吸收分光光度计测定土壤AK含量,收获法测定草本和地面凋落物生物量,转换因子法测定乔木生物量,灌木生物量采用秦岭淮河以南灌木林平均生物量值<sup>[15,18]</sup>。

### 1.2.4 物种多样性分析

利用Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数分析物种多样性特征<sup>[19]</sup>。

## 1.3 模型建立

### 1.3.1 耦合度模型

耦合度是对多系统关联程度的度量,反映系统间的相互作用强弱,其值介于0和1之间,越接近1

表明系统间耦合越强,相反,越接近0表明系统间耦合越弱。耦合度模型如下<sup>[4]</sup>:

$$f(x) = \sum_{i=1}^p ax_i \quad (1)$$

$$g(y) = \sum_{j=1}^q by_j \quad (2)$$

$$C = \frac{2(f(x)g(y))^{\frac{1}{2}}}{f(x) + g(y)} \quad (3)$$

式中, $f(x)$ 、 $g(y)$ 分别为植被、土壤综合评价指数; $C$ 为植被-土壤耦合度; $p$ 、 $q$ 分别为植被、土壤系统对应的指标个数,此处 $p=7$ 、 $q=8$ ; $a$ 、 $b$ 分别为植被、土壤系统中各指标对应的综合权重值; $x_i$ 、 $y_j$ 分别为植被第 $i$ 个、土壤第 $j$ 个指标对应的标准化值。

### 1.3.2 耦合协调度模型

耦合协调度在耦合度的基础上,添加衡量多系统调和程度的组分,对多系统整体功效和系统间的协调程度进行衡量。其值介于0和1之间,越接近1表明系统间协调性越好,相反,越接近0表明系统间协调性越差。耦合协调度模型如下<sup>[20]</sup>:

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (4)$$

$$D = (CT)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中,  $T$  为植被-土壤综合调和指数;  $D$  为植被-土壤耦合协调度;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为植被、土壤系统对应的权重值。

1.4 权重确定

采用熵权法<sup>[21]</sup>计算植被、土壤系统对应的权重值,即第1层指标的权重值;采用主成分分析法<sup>[22]</sup>计算各指标在对应系统中的权重值,即第2层指标的权重值;最后通过两层权重相乘计算各指标对应的综合权重值。

1.5 耦合协调类型划分

本研究参照余杭<sup>[4]</sup>等的划分标准,根据耦合协调度( $D$ 值)、植被综合评价指数与土壤综合评价指数的比值( $R$ 值),将蒋家沟失稳性坡面植被-土壤耦合协调状况划分为 $5 \times 3$ 共15种耦合协调类型。

1.6 数据处理与分析

运用 Excel 和 R 语言对蒋家沟失稳性坡面 15 个指标进行单因素方差分析和 LSD 多重比较,对失

稳性坡面生态系统的影响因子进行主成分分析,对气候区、坡向和区段影响植被-土壤系统耦合度和耦合协调度的效应进行多因素方差分析,文中显著性水平为  $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 植被和土壤相关指标特征

对蒋家沟 5 个失稳性坡面不同区段的 7 个植被指标和 8 个土壤指标进行对比分析(表 1、表 2)。

从区段看,稳定区的植被碳含量、Margalef 丰富度指数、TN 含量最高,失稳区和堆积区的相对顺序随坡面条件的不同而有所变化;生物量、植被覆盖度、土壤 SOC 含量、HN 含量、AK 含量总体上呈现从大到小的趋势,依次为稳定区、失稳区、堆积区,这一趋势在大地阴坡和多照沟阳坡出现顺序颠倒的现

表 1 不同失稳性坡面植被特征  
Tab. 1 Characteristics of vegetation on different unstable slopes

气候区	坡面	碳含量/(g · kg <sup>-1</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	307.66 ± 24.45Ba	246.83 ± 8.81BCa	274.04 ± 20.95ABa	276.18 ± 13.05BC	251.35 ± 13.58B
	小尖风阳坡	287.12 ± 7.05Ba	184.18 ± 8.89Cb	208.27 ± 49.86Bb	226.53 ± 21.44C	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	452.10 ± 6.98Aa	286.07 ± 19.77ABb	294.84 ± 13.70Ab	344.34 ± 27.92A	344.34 ± 27.92A
干热河谷区	查菁沟阳坡	290.02 ± 11.88Ba	246.21 ± 5.32BCa	233.89 ± 23.79ABa	256.71 ± 11.57BC	280.14 ± 10.67B
	大凹子沟阴坡	331.75 ± 10.92Ba	317.30 ± 18.67Aab	261.66 ± 26.82ABb	303.57 ± 14.60AB	
气候区	坡面	生物量/(g · m <sup>-2</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	5083.28 ± 24.26Ba	192.33 ± 31.30Bb	221.00 ± 57.39Ab	1832.21 ± 813.03AB	1693.19 ± 530.27AB
	小尖风阳坡	4461.96 ± 89.49Ca	119.00 ± 23.27Bb	81.53 ± 11.59Bb	1554.17 ± 727.47AB	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	7274.46 ± 32.11Aa	218.28 ± 35.67Bb	163.97 ± 22.08ABb	2552.24 ± 1180.68A	2552.24 ± 1180.68A
干热河谷区	查菁沟阳坡	331.95 ± 57.38Ea	130.82 ± 13.41Bb	76.97 ± 10.30Bb	179.91 ± 42.46B	259.37 ± 49.12B
	大凹子沟阴坡	605.87 ± 57.14Da	361.53 ± 35.73Ab	49.05 ± 7.62Bc	338.82 ± 82.91AB	
气候区	坡面	植被覆盖度/%				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	75.00 ± 2.89ABa	57.00 ± 2.89ABa	36.00 ± 2.31ABb	56.00 ± 5.80A	48.56 ± 4.64A
	小尖风阳坡	65.00 ± 1.73Ba	38.33 ± 1.67BCb	20.00 ± 3.61Bb	41.11 ± 6.65A	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	70.00 ± 1.15Ba	25.33 ± 1.76Cb	53.50 ± 23.68Aa	49.61 ± 9.47A	49.61 ± 9.47A
干热河谷区	查菁沟阳坡	92.22 ± 1.94Aa	63.33 ± 0.96Ab	32.22 ± 0.56Bc	62.59 ± 8.69A	61.53 ± 6.17A
	大凹子沟阴坡	91.67 ± 1.73Aa	61.94 ± 1.94Ab	27.78 ± 1.21Bc	60.46 ± 9.27A	

表 1( 续)

气候区	坡面	Margalef 丰富度指数				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	3.47 ± 0.00Bb	3.62 ± 0.07Ab	5.01 ± 0.06Aa	4.04 ± 0.25A	3.95 ± 0.15A
	小尖风阳坡	4.40 ± 0.00Aa	3.60 ± 0.16Ab	3.62 ± 0.31Bb	3.87 ± 0.17A	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	2.31 ± 0.00Ca	1.50 ± 0.07Bb	1.14 ± 0.14CDb	1.65 ± 0.18B	1.65 ± 0.18B
干热河谷区	查菁沟阳坡	1.23 ± 0.04Da	1.30 ± 0.02Ba	0.85 ± 0.05Db	1.12 ± 0.07C	1.05 ± 0.07C
	大凹子沟阴坡	1.01 ± 0.10Da	0.60 ± 0.13Cb	1.31 ± 0.08Ca	0.97 ± 0.12C	
气候区	坡面	Simpson 优势度指数				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	0.79 ± 0.00ABb	0.92 ± 0.01Aab	0.96 ± 0.00Aa	0.89 ± 0.03A	0.89 ± 0.01A
	小尖风阳坡	0.87 ± 0.00Aa	0.90 ± 0.02Aa	0.92 ± 0.01Aa	0.90 ± 0.01A	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	0.67 ± 0.00Ba	0.66 ± 0.05Ba	0.48 ± 0.14Cb	0.60 ± 0.05BC	0.60 ± 0.05B
干热河谷区	查菁沟阳坡	0.71 ± 0.01Ba	0.69 ± 0.03Ba	0.54 ± 0.02BCb	0.65 ± 0.03B	0.58 ± 0.03B
	大凹子沟阴坡	0.49 ± 0.01Cb	0.35 ± 0.07Cc	0.68 ± 0.03Ba	0.50 ± 0.05C	
气候区	坡面	Shannon-Wiener 多样性指数				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	2.26 ± 0.00Ac	2.83 ± 0.04Ab	3.32 ± 0.03Aa	2.80 ± 0.15A	2.73 ± 0.08A
	小尖风阳坡	2.63 ± 0.00Aa	2.59 ± 0.11Aa	2.75 ± 0.08Ba	2.66 ± 0.04A	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	1.69 ± 0.00Ba	1.73 ± 0.42Ba	0.98 ± 0.21Cb	1.47 ± 0.18B	1.47 ± 0.18B
干热河谷区	查菁沟阳坡	1.40 ± 0.02Ba	1.36 ± 0.06Ba	0.99 ± 0.04Ca	1.25 ± 0.07BC	1.12 ± 0.07C
	大凹子沟阴坡	0.94 ± 0.02Cb	0.61 ± 0.13Cb	1.38 ± 0.08Ca	0.98 ± 0.12C	
气候区	坡面	Pielou 均匀度				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	0.74 ± 0.00Aa	0.89 ± 0.01Aa	0.94 ± 0.01Aa	0.86 ± 0.03A	0.86 ± 0.02A
	小尖风阳坡	0.80 ± 0.00Aa	0.85 ± 0.04Aa	0.93 ± 0.01Aa	0.86 ± 0.02A	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	0.66 ± 0.00Aab	0.91 ± 0.21Aa	0.62 ± 0.18Bb	0.73 ± 0.09AB	0.73 ± 0.09B
干热河谷区	查菁沟阳坡	0.87 ± 0.03Aa	0.83 ± 0.04Aa	0.79 ± 0.02ABa	0.83 ± 0.02A	0.74 ± 0.03AB
	大凹子沟阴坡	0.65 ± 0.02Aa	0.55 ± 0.08Ba	0.78 ± 0.02ABa	0.66 ± 0.04B	

注:表中数据为平均值 ± 标准误差;不同大写字母表示不同失稳性坡面同一区段的差异显著性( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示不同区段同一失稳性坡面的差异显著性( $P < 0.05$ )。下同。

表 2 不同失稳性坡面土壤特征  
Tab. 2 Characteristics of soil on different unstable slopes

气候区	坡面	SOC 含量/(g · kg <sup>-1</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	34.63 ± 2.47Ab	45.90 ± 4.5Aa	19.16 ± 3.73Ac	33.23 ± 4.29A	29.09 ± 2.63A
	小尖风阳坡	33.07 ± 0.70Aa	26.35 ± 0.20Bb	15.43 ± 0.46Ac	24.95 ± 2.58AB	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	12.61 ± 2.28Ba	14.41 ± 1.77Ca	14.43 ± 3.40ABa	13.82 ± 1.32C	13.82 ± 1.32B
干热河谷区	查菁沟阳坡	21.81 ± 6.80Ba	13.92 ± 1.27Cab	6.03 ± 2.29Bb	13.92 ± 3.10C	18.09 ± 2.46B
	大凹子沟阴坡	34.73 ± 1.23Aa	20.44 ± 1.59BCb	11.60 ± 0.42ABb	22.26 ± 3.42BC	

表 2(续)

气候区	坡面	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	1.43 ± 0.00Cb	1.30 ± 0.02Bc	1.72 ± 0.03Aa	1.49 ± 0.06B	1.58 ± 0.04A
	小尖风阳坡	1.67 ± 0.03Aab	1.60 ± 0.09Ab	1.75 ± 0.00Aa	1.67 ± 0.03A	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	1.33 ± 0.02Db	1.58 ± 0.00Aa	1.58 ± 0.01Ba	1.50 ± 0.04B	1.50 ± 0.04A
干热河谷区	查菁沟阳坡	1.55 ± 0.05Ba	1.64 ± 0.05Aa	1.61 ± 0.04Ba	1.60 ± 0.03AB	1.57 ± 0.02A
	大凹子沟阴坡	1.44 ± 0.00Cb	1.65 ± 0.00Aa	1.52 ± 0.00Bb	1.53 ± 0.03B	
气候区	坡面	TN 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	1.15 ± 0.30BCb	1.96 ± 0.23Aa	1.34 ± 0.20ABCab	1.49 ± 0.17AB	1.44 ± 0.12A
	小尖风阳坡	1.87 ± 0.06ABa	1.50 ± 0.09ABab	0.80 ± 0.01Cb	1.39 ± 0.16B	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	0.92 ± 0.13Ca	1.09 ± 0.19Ba	1.57 ± 0.23ABa	1.20 ± 0.14B	1.20 ± 0.14A
干热河谷区	查菁沟阳坡	1.63 ± 0.48ABCa	1.33 ± 0.20ABa	0.87 ± 0.06BCa	1.28 ± 0.19B	1.60 ± 0.14A
	大凹子沟阴坡	2.32 ± 0.11Aa	1.62 ± 0.36ABa	1.80 ± 0.26Aa	1.92 ± 0.17A	
气候区	坡面	TP 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	0.74 ± 0.01Aa	0.80 ± 0.03Aa	0.90 ± 0.07Aa	0.81 ± 0.03A	0.78 ± 0.02A
	小尖风阳坡	0.74 ± 0.01Aa	0.69 ± 0.04Aa	0.79 ± 0.08Aa	0.74 ± 0.03AB	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	0.47 ± 0.01Bb	0.60 ± 0.02Ab	0.90 ± 0.02Aa	0.66 ± 0.06B	0.66 ± 0.06B
干热河谷区	查菁沟阳坡	0.71 ± 0.19Aa	0.72 ± 0.02Aa	0.83 ± 0.12Aa	0.75 ± 0.07AB	0.81 ± 0.04A
	大凹子沟阴坡	0.92 ± 0.02Aa	0.79 ± 0.04Aa	0.88 ± 0.07Aa	0.86 ± 0.03A	
气候区	坡面	pH 值				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	5.61 ± 0.02Bb	5.69 ± 0.10Cb	6.32 ± 0.27Ba	5.87 ± 0.14B	6.01 ± 0.10B
	小尖风阳坡	5.83 ± 0.23Bb	6.28 ± 0.09Bab	6.36 ± 0.15Ba	6.16 ± 0.12B	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	5.63 ± 0.09Bb	5.95 ± 0.07BCb	6.53 ± 0.04Ba	6.04 ± 0.14B	6.04 ± 0.14B
干热河谷区	查菁沟阳坡	7.77 ± 0.14Aa	8.15 ± 0.07Aa	7.73 ± 0.19Aa	7.89 ± 0.10A	7.96 ± 0.07A
	大凹子沟阴坡	8.16 ± 0.17Aa	7.80 ± 0.21Aa	8.15 ± 0.14Aa	8.04 ± 0.11A	
气候区	坡面	HN 含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	气候区平均值
温带湿润山岭区	大地阴坡	18.07 ± 2.35Ab	24.74 ± 2.48Aa	12.21 ± 1.91Ab	18.34 ± 2.13A	13.94 ± 1.87A
	小尖风阳坡	17.61 ± 3.86Aa	6.94 ± 0.63BCb	4.08 ± 0.14Bb	9.54 ± 2.35B	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	1.86 ± 0.65Ba	1.72 ± 0.46Ca	1.64 ± 0.15Ba	1.74 ± 0.24C	1.74 ± 0.24C
干热河谷区	查菁沟阳坡	14.24 ± 4.20Aa	4.76 ± 0.25Cb	3.18 ± 0.49Bb	7.39 ± 2.12B	8.21 ± 1.32B
	大凹子沟阴坡	12.79 ± 0.85Aa	11.54 ± 1.73Ba	2.74 ± 0.09Bb	9.02 ± 1.68B	

表 2(续)

气候区	坡面	AP 含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )				气候区平均值
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	
温带湿润山岭区	大地阴坡	7.55 ± 1.06Bb	5.35 ± 0.47Bb	105.7 ± 27.51ABa	39.53 ± 18.35AB	44.65 ± 13.19A
	小尖风阳坡	8.76 ± 1.44Bb	12.21 ± 2.67Bb	128.31 ± 10.62Aa	49.76 ± 19.90AB	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	6.24 ± 0.57Bb	5.74 ± 0.41Bb	77.5 ± 13.63Ba	29.83 ± 12.55AB	29.83 ± 12.55A
干热河谷区	查菁沟阳坡	55.50 ± 22.49Aa	74.49 ± 5.05Aa	79.82 ± 4.32Ba	69.94 ± 7.71A	43.37 ± 7.52A
	大凹子沟阴坡	17.69 ± 4.45Ba	11.26 ± 0.98Ba	21.44 ± 1.56Ca	16.80 ± 2.04B	

气候区	坡面	AK 含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )				气候区平均值
		稳定区	失稳区	堆积区	坡面平均值	
温带湿润山岭区	大地阴坡	49.33 ± 6.11ABa	37.06 ± 1.40Aa	17.30 ± 7.99Ab	34.56 ± 5.51A	31.70 ± 4.79A
	小尖风阳坡	58.70 ± 7.81Aa	18.55 ± 5.15Bb	9.28 ± 1.21Ab	28.84 ± 8.06AB	
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	61.40 ± 2.85Aa	36.62 ± 8.43Ab	6.88 ± 1.34Ac	34.97 ± 8.30A	34.97 ± 8.30A
干热河谷区	查菁沟阳坡	44.09 ± 4.30Ba	10.03 ± 0.30Bb	3.69 ± 1.04Ab	19.27 ± 6.40AB	16.28 ± 3.25B
	大凹子沟阴坡	12.02 ± 1.16Ca	13.51 ± 4.09Ba	14.32 ± 1.35Aa	13.29 ± 1.33B	

象;Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度方面,通常堆积区的值高于稳定区,但在多照沟阳坡和查菁沟阳坡,稳定区的值反超堆积区;容重呈现堆积区大于稳定区的趋势;TP 含量呈现堆积区大于失稳区的趋势;在 pH 值的分布上,通常由大到小依次为堆积区、失稳区、稳定区,干热河谷区的两个坡面出现这一顺序颠倒的现象;AP 含量基本遵循堆积区最高、稳定区次之、失稳区最低的规律,小尖风阳坡和查菁沟阳坡出现失稳区高于稳定区的现象。

从气候区看,植被碳含量呈现明显的梯度变化,亚热带和暖温带半湿润区最高,干热河谷区次之,温带湿润山岭区最低;在生物量、AK 含量方面,表现为亚热带和暖温带半湿润区最高,温带湿润山岭区次之,干热河谷区最低;植被覆盖度、pH 值由大到小依次为干热河谷区、亚热带和暖温带半湿润区、温带湿润山岭区;Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数温带湿润山岭区最为丰富,亚热带和暖温带半湿润区次之,干热河谷区相对较低;Pielou 均匀度、土壤 SOC 含量、容重、HN 含量、AP 含量由大到小依次为温带湿润山岭区、干热河谷区、亚热带和暖温带半湿润区;TN 含量、TP 含量由大到小依次为干热河谷区、温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区。

从坡向看,阴坡的植被碳含量、生物量、土壤

SOC 含量、TN 含量、TP 含量、HN 含量高于阳坡;在温带湿润山岭区,阴坡的植被覆盖度、Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、AK 含量高于阳坡,而在干热河谷区,阳坡高于阴坡;阳坡的 Simpson 优势度指数、容重、AP 含量高于阴坡;干热河谷区阳坡的 Pielou 均匀度高于阴坡;对于 pH 值,温带湿润山岭区的阳坡高于阴坡,干热河谷区的阴坡高于阳坡。

## 2.2 植被和土壤相关指标的主成分分析

对蒋家沟失稳性坡面 7 个植被指标和 8 个土壤指标进行主成分分析(表 3),所提取的 3 个主成分特征值均大于 1,累积贡献率 74.14%,可实现有效降维,基本能够反映指标的整体信息量。根据各主成分载荷值的绝对量大小,第 1 主成分的主要影响因素包括 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数,说明物种多样性对蒋家沟失稳性坡面生态系统的发展影响最大;第 2 主成分的主要影响因素包括生物量、AK 含量;第 3 主成分的主要影响因素包括土壤 SOC 含量、TN 含量、HN 含量,说明植被生产力和土壤养分含量在蒋家沟失稳性坡面生态系统的发展过程中也起着重要作用。

## 2.3 植被-土壤耦合协调评价层次结构与指标权重确定

经熵权法计算第 1 层指标权重得到,植被指标

表 3 不同失稳性坡面的主要影响因子分析

Tab. 3 Analysis of main influencing factors of different unstable slopes

指标	载荷值		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
碳含量	-0.30	0.75	-0.06
生物量	0.17	0.86	-0.09
植被覆盖度	-0.33	0.51	0.50
Margalef 丰富度指数	<b>0.92</b>	0.08	0.13
Simpson 优势度指数	<b>0.95</b>	-0.05	0.05
Shannon-Wiener 多样性指数	<b>0.98</b>	-0.02	0.09
Pielou 均匀度	0.68	-0.30	-0.05
SOC 含量	0.34	0.22	<b>0.86</b>
容重	0.14	-0.65	-0.31
TN 含量	-0.17	-0.12	0.84
TP 含量	-0.15	-0.64	0.48
pH 值	-0.71	-0.50	0.09
HN 含量	0.32	0.18	<b>0.83</b>
AP 含量	0.14	-0.67	-0.31
AK 含量	0.33	<b>0.81</b>	0.15
特征值	4.30	3.94	2.89
累积贡献率	28.65%	54.89%	74.14%

注:粗体的数字表示各主成分中主要影响因子的载荷值。

权重为 0.48,土壤指标权重为 0.52,两个系统权重相当;经主成分分析法计算第 2 层指标权重得到 7 个植被指标和 8 个土壤指标在对应系统中的权重;最后通过两层权重相乘得到各指标的综合权重(表 4)。

2.4 植被-土壤耦合协调性分析

对表征蒋家沟失稳性坡面植被-土壤耦合协调性的相关指标进行对比分析(表 5)。植被综合评价指数表现为:5 个稳定区均为最高,且显著高于失稳区或堆积区;大地阴坡和小尖风阳坡显著高于多照沟阳坡,且上述 3 个坡面均显著高于查菁沟阳坡和大凹子沟阴坡;温带湿润山岭区整体表现为阴坡高于阳坡,干热河谷区则相反。土壤综合评价指数表现为:多照沟阳坡堆积区显著高于失稳区,大凹子沟阴坡稳定区显著高于失稳区;多照沟阳坡稳定区显著低于其他稳定区,大地阴坡失稳区显著高于其他失稳区;阴坡整体高于阳坡。除多照沟阳坡稳定

表 4 评价层次结构与指标权重

Tab. 4 Evaluation hierarchy and indicator weights

第 1 层指标		第 2 层指标		综合 权重
名称	权重	名称	权重	
植被	0.48	碳含量	0.13	0.06
		生物量	0.22	0.11
		植被覆盖度	0.09	0.05
		Margalef 丰富度指数	0.19	0.09
		Simpson 优势度指数	0.15	0.07
		Shannon-Wiener 多样性指数	0.17	0.08
		Pielou 均匀度	0.05	0.02
土壤	0.52	SOC 含量	0.11	0.06
		容重	0.11	0.06
		TN 含量	0.14	0.08
		TP 含量	0.22	0.12
		pH 值	0.06	0.03
		HN 含量	0.13	0.07
		AP 含量	0.13	0.07
		AK 含量	0.10	0.05

区的耦合度显著低于失稳区外,其他组合差异均不显著;除大地阴坡外,其他失稳性坡面稳定区的耦合协调度均为最高,且显著高于失稳区或堆积区。

耦合协调模型展示的结果表明,大地阴坡稳定区和堆积区、小尖风阳坡全部区段、多照沟阳坡稳定区属于中级协调发展类土壤滞后发展型;大地阴坡失稳区、查菁沟阳坡稳定区属于中级协调发展类植被土壤同步发展型;大凹子沟阴坡稳定区属于中级协调发展类植被滞后发展型;多照沟阳坡失稳区属于初级协调发展类土壤滞后发展型;多照沟阳坡堆积区、查菁沟阳坡失稳区和堆积区、大凹子沟阴坡失稳区和堆积区属于初级协调发展类植被滞后发展型。

通过多因素方差分析法分析气候区、坡向和区段 3 个单因素以及因素之间的交互作用对蒋家沟失稳性坡面植被-土壤系统耦合度和耦合协调度的影响效应(表 6)。仅气候区对植被-土壤系统耦合度的影响极显著;气候区、坡向和区段 3 个单因素以及三者的共同作用均对植被-土壤系统耦合协调度的影响极显著,根据  $F$  值得影响效应从高到低依次为气候区、区段、坡向、三者的共同作用;气候区和坡向的共同作用、坡向和区段的共同作用均对植被-土



表 5 不同失稳性坡面植被-土壤耦合协调性评价  
Tab. 5 Evaluation of vegetation and soil coupling coordination of different unstable slopes

指标	区段	温带湿润山岭区		亚热带和暖温带半湿润区	干热河谷区	
		大地阴坡	小尖风阳坡	多照沟阳坡	查菁沟阳坡	大凹子沟阴坡
$f(x)$	稳定区	0.31 ± 0.00Aa	0.33 ± 0.00Aa	0.31 ± 0.00Aa	0.17 ± 0.00Ba	0.14 ± 0.00Ba
	失稳区	0.25 ± 0.00Ab	0.22 ± 0.01Ab	0.14 ± 0.02Bb	0.14 ± 0.00Ba	0.08 ± 0.02Cb
	堆积区	0.29 ± 0.00Aa	0.22 ± 0.01Bb	0.11 ± 0.03Cb	0.09 ± 0.00Cb	0.12 ± 0.01Ca
$g(y)$	稳定区	0.22 ± 0.02Aa	0.23 ± 0.01Aa	0.12 ± 0.01Bab	0.24 ± 0.08Aa	0.29 ± 0.00Aa
	失稳区	0.30 ± 0.03Aa	0.16 ± 0.02Ba	0.11 ± 0.00Bb	0.18 ± 0.01Ba	0.20 ± 0.03Bb
	堆积区	0.22 ± 0.00Aa	0.16 ± 0.02Aa	0.20 ± 0.02Aa	0.17 ± 0.02Aa	0.21 ± 0.02Aab
$C$	稳定区	0.98 ± 0.01ABa	0.98 ± 0.00Aa	0.90 ± 0.02Bb	0.97 ± 0.03ABa	0.94 ± 0.00ABa
	失稳区	0.99 ± 0.00Aa	0.99 ± 0.01Aa	0.99 ± 0.01Aa	0.99 ± 0.00Aa	0.90 ± 0.05Ba
	堆积区	0.99 ± 0.00Aa	0.98 ± 0.01Aa	0.91 ± 0.07Aab	0.95 ± 0.02Aa	0.96 ± 0.02Aa
$D$	稳定区	0.51 ± 0.01Aa	0.52 ± 0.01Aa	0.44 ± 0.01Ba	0.44 ± 0.03Ba	0.45 ± 0.00Ba
	失稳区	0.52 ± 0.01Aa	0.43 ± 0.02Bb	0.36 ± 0.02Cb	0.40 ± 0.01BCab	0.36 ± 0.02Cb
	堆积区	0.50 ± 0.00Aa	0.43 ± 0.01Bb	0.38 ± 0.03CDB	0.35 ± 0.01Db	0.40 ± 0.01BCab
$R$	稳定区	1.42 ± 0.16Ba	1.43 ± 0.07Ba	2.57 ± 0.24Aa	0.86 ± 0.23Ca	0.48 ± 0.01Ca
	失稳区	0.86 ± 0.08BCb	1.37 ± 0.12Aa	1.27 ± 0.17ABb	0.80 ± 0.02Ca	0.45 ± 0.14Ca
	堆积区	1.30 ± 0.03Aa	1.40 ± 0.22Aa	0.54 ± 0.17Bc	0.54 ± 0.05Ba	0.60 ± 0.10Ba
耦合协调模型	稳定区	中级协调发展类 土壤滞后发展型	中级协调发展类 土壤滞后发展型	中级协调发展类 土壤滞后发展型	中级协调发展类 植被土壤同步发展型	中级协调发展类 植被滞后发展型
	失稳区	中级协调发展类 植被土壤同步发展型	中级协调发展类 土壤滞后发展型	初级协调发展类 土壤滞后发展型	初级协调发展类 植被滞后发展型	初级协调发展类 植被滞后发展型
	堆积区	中级协调发展类 土壤滞后发展型	中级协调发展类 土壤滞后发展型	初级协调发展类 植被滞后发展型	初级协调发展类 植被滞后发展型	初级协调发展类 植被滞后发展型

表 6 气候区、坡向和区段对植被-土壤系统耦合的影响效应检验结果  
Tab. 6 Test results of the effects of climate zones, slope orientations and zones on the coupling of vegetation and soil systems

耦合协调指标	方差来源	平方和	均方	$F$ 值	$P$ 值
耦合度	A	0.02	0.01	5.39	< 0.01
	B	0.00	0.00	1.48	> 0.05
	C	0.00	0.00	0.67	> 0.05
	A × B	0.01	0.01	2.55	> 0.05
	A × C	0.01	0.00	1.65	> 0.05
	B × C	0.00	0.00	1.12	> 0.05
	A × B × C	0.00	0.00	1.11	> 0.05
	误差	0.06	0.00		
耦合协调度	A	0.09	0.04	57.04	< 0.01
	B	0.01	0.01	9.15	< 0.01
	C	0.04	0.02	23.44	< 0.01
	A × B	0.01	0.01	5.85	0.01 - 0.05
	A × C	0.00	0.00	0.95	> 0.05
	B × C	0.01	0.00	4.15	0.01 - 0.05
	A × B × C	0.01	0.01	6.59	< 0.01
	误差	0.02	0.00		

注: A 表示气候区; B 表示坡向; C 表示区段。

壤系统耦合协调度的影响显著, 根据  $F$  值可得前者的影响效应大于后者。

### 3 讨论

#### 3.1 不同失稳性坡面植被-土壤系统主要影响因子

本研究对蒋家沟 5 个失稳性坡面生态系统进行主成分分析, 探究影响植被和土壤关系的主要因子。分析结果表明, 物种多样性对蒋家沟失稳性坡面生态系统的发展影响最大, 植被生产力和土壤养分也起着重要作用。温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区均大面积分布云南松林, 对于推动生态系统的物质循环具有举足轻重的作用, 但随林冠层增大, 林下灌草层植被可接受到的光照逐渐减少, 加上地表凋落物覆盖过多阻碍灌草层植被生长, 导致群落结构逐渐单一, 物种多样性随之降低。对此, 可对乔木实施修枝和间伐, 促进林下植被生长和凋落物分解<sup>[23-24]</sup>。干热河谷区群落结构以耐旱耐瘠薄的灌草植被为主, 可适当引入乡土乔木, 改善该区群落

的立体结构。根据植被生物量、土壤养分等指标可知,受泥石流侵袭后的坡面生态系统还未恢复至灾前状态,因水土流失导致损失的土壤养分尚未得到有效补充,然而,植被在恢复初期对养分的需求极为迫切,这一供需矛盾严重制约植被的生长恢复<sup>[25]</sup>。对此,可通过人工施肥、引入固氮植被等措施,及时补给土壤养分,促进地上凋落物和地下死根及时降解,加速系统养分循环<sup>[2]</sup>。

### 3.2 不同失稳性坡面植被和土壤特征的差异

植被和土壤是蒋家沟失稳性坡面脆弱生态系统相互作用最为密切的两个系统,良好的植被覆盖有助于保持水土、调节土壤水温和提高土壤质量,适宜的土壤环境为植被提供生长场地、输送养分物质以及推动生物多样性发展。通过分析蒋家沟 5 个失稳性坡面植被和土壤的相关指标发现,不同坡面和不同区段在海拔、坡度和坡向等的影响下,指标间的彼此作用程度不一,使得两个系统的发展步调产生差异,进而形成具有不同特征的生态系统<sup>[26]</sup>。

失稳性坡面植被种类构成及分布格局对坡面水土保持、泥沙拦截、松散土体固结等具有重大影响<sup>[27]</sup>。本研究结果表明失稳性坡面稳定区的植被生长状态优于失稳区和堆积区,其间差异主要体现在植被碳含量、生物量和覆盖度上,这主要与失稳性坡面不同区段的坡度和土壤质量有关。稳定区位于山体上坡段,坡度较平缓,土体稳定且未受侵蚀,土壤富含养分,适宜植被生长;山体受到侵蚀形成的过渡段和松散物质堆积而成的下坡段分别为失稳区和堆积区,坡度相对较大,土体不稳定,易受侵蚀,由于原生植被遭受冲刷与掩埋,侵蚀剥离作用致使岩层破碎,大量粗骨碎屑物残留于土壤中,造成土壤贫瘠,长期处于生态恢复的先锋演替阶段,植被生长状态不佳<sup>[28]</sup>。温带湿润山岭区的植被生长状态最优,亚热带和暖温带半湿润区次之,干热河谷区最差,其间差异主要体现在物种多样性指数上。这是因为温带湿润山岭区优越的水热条件有利于坡面上不同种类植被的生长繁殖,且因相对较低的气温在一定程度上减缓植被凋落物的分解速率,使土壤中的养分得以积累,肥力得以增强,从而进一步促进植被繁茂生长;干热河谷区因气候干热,地表植被以草本为主,植被群落结构和多样性匮乏<sup>[18,29]</sup>。此外,随海拔升高,土壤种子库的种子密度和种类均呈增多趋势,这一变化丰富了高海拔地区的群落结构,是温带

湿润山岭区物种繁茂和蒋家沟流域植被生长状况出现梯度差异的原因之一<sup>[30]</sup>。相较于阳坡,阴坡通常展现出太阳辐射较为温和、水分蒸发较少以及土壤更为肥沃等特点,其植被生长状态往往更好,温带湿润山岭区植被生长特征与之相符;然而,干热河谷区阳坡植被优于阴坡,则可能是因为该阳坡恰好位于迎风方向,充足的降水和光照共同促进了该阳坡植被的茁壮生长。

土壤是植被生命活动过程中物质交换和能量传递的主要媒介,为植被提供养分和水,作用于植被群落结构和功能,影响植被演替和更新<sup>[31-32]</sup>。本研究中多照沟阳坡和大凹子沟阴坡失稳区的土壤条件均为各自坡面中最差,区段间特征差异主要体现在 TN、TP、AP、SOC 等土壤养分含量上,这是因为失稳区坡度最大,土体结构不稳定,加上这两个坡面气温高、水分少,植被立地生长条件差,导致土壤养分易随土壤崩落而流失<sup>[33]</sup>。多照沟阳坡稳定区的土壤条件较其他稳定区差,这主要因为多照沟人类活动频繁,其稳定区位于坡脚处,放牧、伐树等人为活动加大了该区的土壤干扰强度,使得土壤硬化固结,植被生产力和生物量下降,进而阻碍土壤养分蓄积<sup>[34]</sup>;大地阴坡失稳区的土壤条件显著优于其他失稳区,则是因为滑坡虽然破坏大地阴坡失稳区的植被和土壤结构,但该区因受高海拔和阴坡向形成的优越水热条件的综合影响,其恢复与更新速度明显快于其他坡面的失稳区。阴坡土壤优于阳坡主要是因为阴坡的光照和水分更加适宜土壤微生物的生存和活动,从而促进改善了土壤质地。

### 3.3 不同气候区植被-土壤耦合协调状况

本研究中 5 个失稳性坡面植被-土壤耦合度均较高且差异不大,但耦合协调度差异显著,表明蒋家沟植被和土壤之间的相互作用强烈,但在不同坡面和不同区段其协调程度存在区别。

亚热带和暖温带半湿润区、干热河谷区的失稳区和堆积区均为植被土壤初级协调发展,其稳定区和温带湿润山岭区全部区段均为植被土壤中高级协调发展,说明温带湿润山岭区植被土壤耦合协调状况最佳。这是因为该区气候湿润,有利于众多植被根植繁衍,地表凋落物增加,又因低温环境下土壤微生物活性受抑制,凋落物分解速率降低,从而共同促进改良表层土壤;土壤系统条件改善反作用于植被系统,为群落演替提供保障<sup>[18,35-36]</sup>。温带湿润山岭区

植被和气候处于较高水平的平衡状态,其生态系统稳定性取决于植被群落自身的结构和多样性,受土壤系统的影响相对较小<sup>[37]</sup>。亚热带和暖温带半湿润区、干热河谷区的稳定区相对于失稳区和堆积区而言,植被原生状态和土壤结构未遭受侵蚀破坏,植被和土壤系统间的相互关系稳定,耦合协调性更好。

温带湿润山岭区整体表现为土壤滞后发展,可能因为该区植被生长发育对土壤养分的消耗大于植被对土壤性状的改善,导致当前土壤条件不足以支持植被正常演替发展<sup>[38-40]</sup>,对此可通过多施有机肥料,在林下种植喜阴且易分解的植被,促进养分归还土壤<sup>[4,23]</sup>。干热河谷区整体表现为植被滞后发展,这是因为该区高温干旱、土壤贫瘠且多砾石,使得植被结构单一,以灌草植被为主<sup>[41]</sup>,可通过适当引种不同生态位的先锋物种,同时提高植被抚育水平,以促进植被生长<sup>[42]</sup>。亚热带和暖温带半湿润区的稳定区和失稳区均为土壤滞后发展,堆积区为植被滞后发展,应采取针对性措施促进植被和土壤协调发展。

多因素方差分析结果表明,气候区、坡向和区段3个单因素对蒋家沟失稳性坡面植被-土壤系统耦合的影响均极为显著,影响效应从高到低依次为气候区、区段、坡向。相对而言,其中两者或三者的共同作用对植被-土壤系统耦合的影响均较小,可能是因为气候区、坡向和区段对植被-土壤系统的作用存在相反的效果,部分相互抵消,因而对系统耦合的综合影响减小甚至不显著。

## 4 结论

(1)在不同气候区背景下,物种多样性对蒋家沟失稳性坡面生态系统的发展影响最大,植被生产力和土壤养分也起着重要作用。主成分分析结果显示,Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、Margalef丰富度指数是影响蒋家沟失稳性坡面生态系统稳定性的最主要因子;植被生物量和土壤有效钾、有机碳、全氮、水解氮也是重要的影响因子。

(2)蒋家沟失稳性坡面植被综合评价指数表现为:5个稳定区均为最高,且显著高于失稳区或堆积区;大地阴坡和小尖风阳坡显著高于多照沟阳坡,且上述3个坡面均显著高于查菁沟阳坡和大凹子沟阴坡;温带湿润山岭区整体表现为阴坡高于阳坡,干

热河谷区则相反。土壤综合评价指数表现为:多照沟阳坡堆积区显著高于失稳区,大凹子沟阴坡稳定区显著高于失稳区;多照沟阳坡稳定区显著低于其他稳定区,大地阴坡失稳区显著高于其他失稳区;阴坡整体高于阳坡。总的来说,蒋家沟失稳性坡面稳定区的植被和土壤综合评价指数总体上均高于失稳区和堆积区;温带湿润山岭区的植被综合评价指数最高,亚热带和暖温带半湿润区次之,干热河谷区最低;亚热带和暖温带半湿润区的土壤综合评价指数明显低于其他2个气候区。

(3)蒋家沟5个失稳性坡面耦合协调模型展示的结果表明,亚热带和暖温带半湿润区、干热河谷区的失稳区和堆积区均为植被土壤初级协调发展,其稳定区和温带湿润山岭区全部区段均为植被土壤中高级协调发展;温带湿润山岭区整体表现为土壤滞后发展,干热河谷区整体表现为植被滞后发展,亚热带和暖温带半湿润区的稳定区和失稳区均为土壤滞后发展,堆积区为植被滞后发展。应采取针对性措施促进植被和土壤协调发展。

(4)气候区、坡向和区段对蒋家沟失稳性坡面植被-土壤系统耦合的影响均极为显著( $P < 0.01$ ),影响效应从高到低依次为气候区、区段、坡向。

## 参考文献(References)

- [1] 徐长林. 坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(4): 26-35. [XU Changlin. Variations in vegetation composition and nutrient characteristics related to aspect in an alpine meadow in the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(4): 26-35] DOI: 10.11686/cyxb2015481
- [2] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 90-96. [YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al. Relationships between vegetation characteristics and soil properties at different restoration stages on slope land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, south-central China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 90-96] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0129
- [3] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307. [LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al. Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2297-2307] DOI: 10.5846/stxb201306111672
- [4] 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 Mianzhu City of Sichuan Province, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, **43**(5): 53 – 63] DOI: 10.12171/j.1000-1522.20200289
- [5] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 42 – 50. [JIAO Juying, MA Xianghua, BAI Wenjuan, et al. Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on abandoned cropland on hilly-gullied Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(5): 42 – 50] DOI: 10.11766/trxb200411110506
- [6] 赵丽丽, 钟哲科, 史作民. 汶川地震对岷江柏林土壤微生物群落及养分的影响[J]. 土壤通报, 2016, **47**(1): 98 – 104. [ZHAO Lili, ZHONG Zheke, SHI Zuomin. Effects of Wenchuan Earthquake on soil microbial communities and nutrients in Cupressus chenginana forest [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(1): 98 – 104] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2016.01.016
- [7] WANG Shijie, LIU Qiming, ZHANG Dianfa. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2004, **15**(2): 115 – 121. DOI: 10.1002/ldr.592
- [8] 张荣, 李婷婷, 金锁, 等. 不同海拔高度对周公山柳杉人工林植物多样性及土壤养分的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, **40**(5): 38 – 46. [ZHANG Rong, LI Tingting, JIN Suo, et al. Effects of different altitude on plant diversity and soil nutrients of Cryptomeria fortunei plantation in Zhougong mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, **40**(5): 38 – 46] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.05.006
- [9] FAN Houbao, WU Jianping, LIU Wenfei, et al. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. Plant Soil, 2015, **392**(1/2): 127 – 138. DOI: 10.1007/s11104-015-2444-2
- [10] 郭文芳, 李鑫, 陈艳梅, 等. 太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系[J]. 生态学报, 2023, **43**(15): 6170 – 6181. [GUO Wenfang, LI Xin, CHEN Yanmei, et al. Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(15): 6170 – 6181] DOI: 10.5846/stxb202210062825
- [11] 白一茹, 阮晓晗, 包维斌, 等. 宁南山区坡面不同土地利用方式下植被-土壤耦合关系评价[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(4): 251 – 258. [BAI Yiru, RUAN Xiaohan, BAO Weibin, et al. Evaluation on coupling of vegetation and soil on slopes of mountain area in southern Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(4): 251 – 258] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.029
- [12] 张晓宁, 李晓丹, 刘星雨, 等. 高寒草地植被与土壤水源涵养功能的时空耦合关系[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(5): 243 – 251 + 274. [ZHANG Xiaoning, LI Xiaodan, LIU Xingyu, et al. Spatial and temporal coupling relationship between alpine grassland vegetation and soil water conservation function [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, **37**(5): 243 – 251 + 274] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.05.029
- [13] 王枫, 宋同清, 杜虎, 等. 中国南海北部不同岛屿植被与土壤的耦合协调发展度[J]. 生态学报, 2023, **43**(8): 3319 – 3326. [WANG Feng, SONG Tongqing, DU Hu, et al. Coupling coordinative degree of vegetation and soil in different islands in the north of South Sea, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(8): 3319 – 3326] DOI: 10.5846/stxb202103020565
- [14] 方迎潮, 王道杰, 何松塍, 等. 云南东川蒋家沟泥石流 2003—2014 年冲淤演变特征[J]. 山地学报, 2018, **36**(6): 907 – 916. [FANG Yingchao, WANG Daojie, HE Songtang, et al. Characteristics of debris flow erosion and deposition at Jiangjia Gully, Dongchuan, Yunnan Province, China for 2003 – 2014 [J]. Mountain Research, 2018, **36**(6): 907 – 916] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000386
- [15] 俞陈辉, 田雪, 刘鑫铭, 等. 泥石流流域失稳性坡面土壤抗蚀性评价[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(4): 13 – 21 + 29. [YU Chenhui, TIAN Xue, LIU Xinming, et al. Evaluation of soil anti-erodibility of unstable slope in debris flow basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(4): 13 – 21 + 29] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.04.003
- [16] 谢贤健. 泥石流频发区不同土地利用类型下土壤分形维数与理化性质的关联度[J]. 草业科学, 2024, **41**(1): 49 – 58. [XIE Xianjian. Correlation degree analysis of soil fractal dimension and physical and chemical properties under different land use types in debris flow prone areas [J]. Pratacultural Science, 2024, **41**(1): 49 – 58] DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0638
- [17] 郭晓军, 苏凤涇, 洪勇, 等. 蒋家沟流域雨季降水中氢氧同位素特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(2): 82 – 85 + 90. [GUO Xiaojun, SU Fenghuan, HONG Yong, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainy season precipitation in Jiangjiagou Watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, **19**(2): 82 – 85 + 90]
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(9): 305 – 310. [PENG Wanxia, SONG Tongqing, ZENG Fuping, et al. Models of vegetation and soil coupling coordinative degree in grain for green project in depressions between karst hills [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, **27**(9): 305 – 310] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.053
- [21] 赵丽, 朱永明, 付梅臣, 等. 主成分分析法和熵值法在农村居民点集约利用评价中的比较[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(7): 235 – 242. [ZHAO Li, ZHU Yongming, FU Meichen, et al. Comparative study on intensive use of rural residential land based on principal component analysis and entropy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(7): 235 – 242] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.039
- [22] 颜惠琴, 牛万红, 韩惠丽. 基于主成分分析构建指标权重的客观赋权法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, **31**(6): 519 – 523. [YAN Huiqin, NIU Wanhong, HAN Huili. Objective weight method based on principal component analysis to establish index weight [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2017, **31**(6): 519 – 523] DOI: 10.13349/j.cnki.jdxn.2017.06.009
- [23] 陈爱民, 严思维, 林勇明, 等. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(9): 62 – 70. [CHEN Aimin, YAN Siwei, LIN Yongming, et al. Evaluation of soil anti-erodibility at different ages of *Leucaena leucocephala* forests in the area with high-frequency debris flow [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, **38**(9): 62 – 70] DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150530
- [24] 潘开文, 何静, 吴宁. 森林凋落物对林地微生境的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 153 – 158. [PAN Kaiwen, HE Jing, WU Ning. Effect of forest litter on microenvironment conditions of forestland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(1): 153 – 158] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2004.0035
- [25] 余杭, 罗清虎, 李松阳, 等. 灾害干扰受损森林土壤的碳、氮、磷初期恢复特征与变异性[J]. 山地学报, 2020, **38**(4): 532 – 541. [YU Hang, LUO Qinghu, LI Songyang, et al. Initial recovery characteristics and variability of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in the damaged forests under disaster disturbance [J]. Mountain Research, 2020, **38**(4): 532 – 541] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000531
- [26] 张广帅, 邓浩俊, 俞伟, 等. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(4): 646 – 654. [ZHANG Guangshuai, DENG Haojun, YU Wei, et al. Vertical gradient analysis of soil environmental factors and vegetation community in mountain areas of frequent debris flow: A case study in the Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2014, **20**(4): 646 – 654] DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.02016
- [27] CUI Peng, LIN Yongming. Debris-flow treatment: The integration of botanical and geotechnical methods [J]. Journal of Resources and Ecology, 2013, **4**(2): 97 – 104. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2013.02.001
- [28] 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 & Environmental Biology, 2018, **24**(4): 681 – 688] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2017.10017
- [29] 杨柳生, 高若允, 孙凡, 等. 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, et al. Plant community and ecosystem carbon stocks in the unstable slopes subjected to high-frequency debris flow [J]. Mountain Research, 2022, **40**(3): 355 – 368] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000677
- [30] 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
- [31] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2014, **33**(10): 2610 – 2617. [CUI Ningjie, ZHANG Danju, LIU Yang, et al. Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(10): 2610 – 2617] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0221
- [32] LUGO A E. The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures [J]. Forest Ecology and Management, 1997, **99**: 9 – 19. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00191-6
- [33] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(6): 2279 – 2287. [LI Yuyuan, SHAO Ming'an, ZHENG Jiyong, et al.

- Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2279–2287] DOI: 10.3321/j.issn:1000–0933.2007.06.017
- [34] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被-土壤系统有机碳组分储量特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(15): 4617–4625. [WANG Heyun, DONG Zhi, GUO Jianying, et al. Organic carbon storage properties in *Stipa breviflora* desert steppe vegetation soil systems under different grazing intensities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(15): 4617–4625] DOI: 10.5846/stxb201507011399
- [35] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. *地理研究*, 2003, **22**(6): 733–741+811. [LAN Anjun, ZHANG Baiping, XIONG Kangning, et al. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou Province [J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(6): 733–741+811] DOI: 10.3321/j.issn:1000–0585.2003.06.008
- [36] LIN Wentzu, CHOU Wenchieh, LIN Chaoyuan, et al. Vegetation recovery monitoring and assessment at landslides caused by earthquake in Central Taiwan [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **210**(1): 55–66. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.02.026
- [37] 杜虎, 彭晚霞, 宋同清, 等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. *植物生态学报*, 2013, **37**(3): 197–208. [DU Hu, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al. Plant community characteristics and its coupling relationships with soil in depressions between karst hills, north Guangxi, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(3): 197–208] DOI: 10.3724/SP.J.1258.2013.00020
- [38] 王皓月, 郭月峰, 徐雅洁, 等. 九峰山不同林分类型生态恢复植被-土壤系统耦合关系评价[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(12): 2309–2316. [WANG Haoyue, GUO Yuefeng, XU Yajie, et al. Coupling relationship between vegetation and soil system in ecological restoration of different stand types in Jiufeng Mountain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(12): 2309–2316] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2021.12.005
- [39] SUL W J, ASUMING-BREMPONG S, WANG Qiong, et al. Tropical agricultural land management influences on soil microbial communities through its effect on soil organic carbon [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **65**(10): 33–38. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.05.007
- [40] 冯二朋, 张立伟, 赖勇, 等. 王屋山不同海拔植被-土壤耦合协调度研究[J]. *河南农业大学学报*, 2023, **57**(6): 949–957. [FENG Erpeng, ZHANG Liwei, LAI Yong, et al. Study on vegetation-soil coupling coordination degree along different elevation in Wangwu Mountain [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2023, **57**(6): 949–957] DOI: 10.16445/j.cnki.1000–2340.20231019.002
- [41] 孟莹莹, 周莉, 周旺明, 等. 长白山风倒区植被恢复26年后物种多样性变化特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(1): 142–149. [MENG Yingying, ZHOU Li, ZHOU Wangming, et al. Characteristics of plant species diversity in a windthrow area on Changbai Mountain after 26 years of natural recovery [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(1): 142–149] DOI: 10.5846/stxb201405301109
- [42] 高若允, 杨柳生, 田雪, 等. 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, et al. 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] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000717

## Coupling Relationship Between Vegetation and Soil in Different Zones of Unstable Slopes in the Jiangjiagou Valley, China

LIU Yinan<sup>a, b</sup>, LIN Yijing<sup>a</sup>, LI Qi<sup>a, b</sup>, SUN Fan<sup>a, b</sup>, LIN Yongming<sup>a, b\*</sup>

(a. College of JunCao Science and Ecology (College of Carbon Neutrality); b. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** A coupling relationship between vegetation and soil is crucial for evaluating the coordinated and sustainable development of ecosystems. Past research on the synergetic mechanism between vegetation and soil primarily concerned about the ecosystems disturbed by human activities or suffered by natural succession, with kind of awareness of the restoration processes of disaster-disturbed ecosystem merely at a plot of instable slope, other

than a complete slope.

In this study, five representative unstable slopes with three zones (stable, unstable and accumulation zone) across three climate zones at the Jiangjiagou valley in southeastern China were selected as research objects. Inclusive of seven vegetation indicators and eight soil indicators in the proposed evaluation system, it used the entropy weight method and principal component analysis to determine the comprehensive weight of each indicator as well as the main factors affecting the unstable slope ecosystem. A coupling coordination degree model of vegetation-soil were also constructed.

(1) Shannon Wiener diversity index, Simpson dominance index and Margalef richness index were the most significant factors governing the stability of the unstable slope ecosystems in the Jiangjiagou valley. In addition, vegetation biomass, soil available potassium, organic carbon, total nitrogen and hydrolyzed nitrogen also played an important role in regulating ecosystem stability.

(2) The comprehensive vegetation and soil evaluation indexes at the stable zones were higher than those obtained at the unstable and accumulation zones on the unstable slopes in the Jiangjiagou valley. The comprehensive vegetation evaluation indexes exhibited the highest values in the temperate humid mountain ridge region, followed by the subtropical and warm temperate sub-humid region, and the lowest values in the dry-hot valley region. It got significantly lower values on the comprehensive soil evaluation indexes in the subtropical and warm temperate sub-humid region than ones in the other two climate zones.

(3) Both the unstable and accumulation zones in the subtropical and warm temperate sub-humid region and the dry-hot valley region exhibited primary coordinated development of vegetation and soil, while the stable zones and all zones of the temperate humid mountain ridge region exhibited intermediate coordinated development of vegetation and soil. The temperate humid mountain ridge region showed lagging soil development, while the dry-hot valley region showed lagging vegetation development.

The research results can provide theoretical support for formulating optimal strategies to promote rapid and effective restoration and coordinated sustainable development of the fragile ecosystem in the Jiangjiagou valley.

**Key words:** unstable slope; vegetation; soil; coupling; the Jiangjiagou valley

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)