

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190066

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

吴建召^{1,2,3} 孙凡^{1,3} 崔羽^{1,2,3} 贺静雯^{1,2,3}
刘颖^{1,2,3} 李健^{1,3} 林勇明^{1,2,3} 王道杰^{2,4}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 640001; 3. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 640001)

摘要:【目的】探讨泥石流频发流域不同气候类型失稳性坡面土壤密度与生物量特征及其关系, 是因地制宜进行生态恢复的先决条件, 对促进该区域生态系统稳定发展及其变化的准确评估极为重要。【方法】选择蒋家沟流域温带湿润山岭区(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)、亚热带干热河谷区(大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡)3个主要气候区为研究区, 在各气候区失稳性坡面的不同区段(稳定区、失稳区、堆积区)设置样地, 进行植被群落调查、植物和分层土壤样品(0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm)采集, 测定植物地上和地下部分生物量及土壤密度等。【结果】(1)乔木生物量在亚热带和暖温带半湿润区显著高于温带湿润山岭区($P < 0.05$); 凋落物生物量则表现为温带湿润山岭区显著高于亚热带和暖温带半湿润区($P < 0.05$); 在无乔木分布的亚热带干热河谷区失稳性坡面, 地上生物量、地下生物量和总生物量均表现为稳定区 > 失稳区 > 堆积区($P < 0.05$)。 (2)不同气候区失稳性坡面的草本植物地上生物量和地下生物量的关系符合根冠异速生长幂函数模型, 表现出稳定的生长比例。 (3)总体上, 气候区和坡面不同区段及其交互作用对生物量和分层土壤密度均存在显著的影响($P < 0.05$), 但不同气候区坡面土壤密度空间变异不大, 表现为弱变异性。 (4)随0~5 cm土壤密度增大, 地上、地下生物量和总生物量均下降, 但根冠比无显著变化。【结论】本研究阐明了泥石流频发流域土壤密度、地下与地上生物量和根冠比沿环境梯度的空间分布格局, 系统分析其相互间的关系, 促进了环境因子对植被调控机制方面的认识, 对基于环境因子效应开展生态恢复研究具有重要意义。

关键词: 气候类型; 泥石流; 区段; 土壤密度; 生物量; 根冠比

中图分类号: S714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)03-0024-12

引文格式: 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.

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

Wu Jianzhao^{1,2,3} Sun Fan^{1,3} Cui Yu^{1,2,3} He Jingwen^{1,2,3}
Liu Ying^{1,2,3} Li Jian^{1,3} Lin Yongming^{1,2,3} Wang Daojie^{2,4}

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

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 640001, Sichuan, China;

收稿日期: 2019-01-25 修回日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790434), 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资助项目(2019), 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016), 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2017111、CXZX2017283)。

第一作者: 吴建召. 主要研究方向: 自然资源管理. Email: wjzhao168@163.com 地址: 350002 福建省福州市仓山区上下店路15号福建农林大学林学院。

责任作者: 林勇明, 博士, 教授. 主要研究方向: 区域资源优化、生态学. Email: monkey1422@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

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

4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of

Water Conservancy, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to investigate the characteristics and relationships between soil bulk density and biomass of unstable slopes in debris flows for different climate types, which is a prerequisite for ecological restoration based on local conditions and is very important for the accurate assessment of the stable development and changes of the ecosystem in this region. [Method] The temperate humid mountain ridge region (Dadi shady slope, Xiaojianfeng sunny slope), subtropical and warm temperate subhumid region (Duo Zhao Gully sunny slope), subtropical dry-hot valley region (Daaizi Gully shade slope, Chajing Gully sunny slope) for the Jiangjiagou Basin were selected as a study area. Taking the stable area, the unstable area and the accumulation area of the unstable slope of each climatic region as the sample plot, and conducting vegetation community surveys, plant and stratified soil sample (0–5 cm, 5–10 cm, 10–20 cm) collection, then soil bulk density, and the biomass of the aboveground and underground parts of the plants were determined. [Result] (1) The biomass of arbor in subtropical and warm temperate subhumid region was significantly higher than that in temperate humid mountain ridge region ($P < 0.05$). However, the biomass of litter was significantly higher in temperate humid mountain ridge region than in subtropical and warm temperate subhumid region ($P < 0.05$). In unstable slopes of subtropical dry-hot valley region without trees, aboveground biomass, underground biomass and total biomass showed stable area > unstable area > accumulation area ($P < 0.05$). (2) The relationship between aboveground biomass and underground biomass of herbaceous plants with unstable slopes in different climatic regions was in accordance with the allometric growth model of root and crown, showing a steady growth ratio. (3) In general, climatic factors and section factors and their interactions had significant effects on biomass and stratified soil bulk density ($P < 0.05$), however, in this study, the soil bulk density of unstable slopes in different climate regions had little spatial variability, showing weak variability. (4) With the increase of soil bulk density of 0–5 cm, the underground and aboveground biomass and total biomass all decreased, however, there was no significant change in the root shoot ratio. [Conclusion] This study elucidates the spatial distribution pattern of soil bulk density, underground biomass, aboveground biomass and root/canopy ratio along the environmental gradient in the watershed with frequent debris flow. The systematic analysis of the relationship between them will be conducive to the analysis of the regulation characteristics of environmental factors, and is of great significance for further ecological restoration research on the effects of environmental factors.

Key words: climate type; debris flow; section; soil bulk density; biomass; root shoot ratio

土壤密度是土壤重要的物理性质之一,它直接影响土壤孔隙度与其大小分配、土壤的穿透阻力及土壤水肥气热变化,进而决定植被生长状况^[1]。生物量是指一定时空范围内生物个体或生态系统所积累的有机质总量^[2],它直接反映了植被自身的生长状况以及自然环境的变化情况,并通过各组成部分的比例关系指示植物对立地环境的适应状况^[3-4],可为生态系统的物质循环及能量流动提供基础资料^[5]。土壤密度和生物量的差异是由多种因素综合作用导致的,其中气候与环境因子的差异可引起不同地区土壤特征、植被类型及地区植被生产力上的变化^[6]。除气候因素外,土壤密度还受土地利用、坡位与地形等因素影响^[7-8],与土壤紧实度密切相关。当土壤密度

超过某一阈值时,会限制植物根系生长^[9-10]。因此土壤根系密度和生物量、植物地上生物量、根冠比等与土壤密度呈负相关^[11-13]。然而,因研究区域、物种不同,部分研究人员得出相反的结论:即根冠比与土壤密度呈正相关关系^[14-15]。因此,急需开展各种气候条件、地形地貌因子、地质条件、土壤类型下植物生物量与土壤密度的关系研究,阐明植物生长对土壤紧密度的适应策略,进而为不同背景条件生态恢复的物种筛选提供技术支撑^[16]。

失稳性坡面通常是指完整坡体在一定范围内沿某一滑动面向下或向外移动而丧失其稳定性^[17],其通常由3部分组成:滑动面上沿保存尚好的稳定区、滑动面移动和铲刮作用形成的失稳区及滑动的松散

固体物质在坡脚淤积形成的堆积区。蒋家沟流域是我国西南地区典型的生态环境脆弱区,也是典型的泥石流频发流域,该区老构造错综复杂,新构造活动强烈,因此流域内存在着大量因滑坡、崩塌等造成的失稳性坡面,导致植被群落正常演替规律失常,功能结构复杂^[18]。在恶劣的自然条件和人类活动的双重作用下,水土流失加剧、环境退化、河道淤积等生态环境问题日益突出^[19]。生态恢复和重建林草植被,是蒋家沟流域生态环境建设的核心内容。近年来众多学者对蒋家沟流域生态环境开展了研究,主要侧重于土壤质量^[20-21]、植被群落特征^[18,22]、泥沙拦截^[23]等方面,对失稳性坡面植被恢复与土壤改良、水土保持效应、抑灾减灾功能等的关系具有一定的认识,促进了当地生态恢复与水土流失治理工作。然而,该流域因气候因素的差异导致土壤密度和植被生物量分布特征及其关系复杂,同时区内大量分布的失稳性坡面易发生滑坡、崩塌和水土流失,致使土壤结构破坏,植被生长基质面积减少,植被覆盖率和群落生物量降低,长期处于先锋群落阶段。因此,阐明不同气候区和失稳性坡面对土壤密度与生物量的分布特征及其关系,是泥石流频发流域各气候区不同生态系统因地制宜进行生态恢复的先决条件,对促进泥石流频发流域生态系统稳定发展及其变化的准确评估极为重要。

综上,本研究针对蒋家沟流域所代表的山地小流域这一特殊景观类型,选择温带湿润山岭区(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)、亚热带干热河谷区(大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡)3个主要气候区为研究区,在各气候区失稳性坡面的稳定区、失稳区、堆积区设置样地,于2017年7—8月进行植被群落调查、植物和土壤样品采集,测定植物生物量和土壤密度,通过实测数据准确认识泥石流频发流域的土壤密度、地下与地上生物量和根冠比沿环境梯度的空间分布格局及其相互间的关系,旨在为山地生态系统功能的分布特征研究提供理论基础,为合理安排植被布局与生态恢复提供科学依据,并对当地生态系统恢复区划提供基础数据和理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

蒋家沟流域属金沙江下游一级支流小江流域,位于小江大断裂带东侧的隆起地带,构造运动强烈,发生了多次间歇性抬升,在流水剥蚀沉积以及泥石流堆积作用下形成了阶梯状台地。该流域地处 $103^{\circ}06' \sim 103^{\circ}13' \text{E}$, $26^{\circ}13' \sim 26^{\circ}17' \text{N}$,发源于会泽

县大海乡,于下游东川区绿茂乡汇入小江,流域面积 48.6 km^2 ,境内沟壑纵横,分布有支沟200余条,山坡陡急,一般山坡坡度在 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$,规模较大的支沟有门前沟、多照沟、大凹子沟、查菁沟,海拔为 $1\,000 \sim 3\,300 \text{ m}$ 。受气候及地形因素影响,蒋家沟流域气候类型复杂,按海拔高程^[24]可分为亚热带干热河谷区、亚热带和暖温带半湿润区、温带湿润山岭区等气候区(表1)。

亚热带干热河谷区海拔低于 $1\,600 \text{ m}$,主要分布于流域中下游,基带土壤为山地燥红壤,多年平均气温 20°C 以上,最高气温 40.9°C ,最低气温 -6.2°C ;多年平均降水量为 693 mm ,平均蒸发量为 $3\,638 \text{ mm}$,蒸发量约是降水量的5倍,该区域水热条件垂直分异明显,长期为焚风效应主导,植被群落退化明显,以干热草坡为主,生态环境恶化、水土流失加剧,为典型的生态脆弱区;亚热带和暖温带半湿润区海拔为 $1\,600 \sim 2\,200 \text{ m}$,主要分布于流域中游,基带土壤为山地红壤,年降雨量 $700 \sim 850 \text{ mm}$,年均温 13°C ,年蒸发量 $1\,700 \text{ mm}$,是蒋家沟泥石流固体物质来源区;温带湿润山岭区海拔高于 $2\,200 \text{ m}$,主要分布于流域上游,基带土壤为山地棕黄壤和山地棕壤,年降雨量 $1\,200 \text{ mm}$,年均温 7°C ,年蒸发量 $1\,350 \text{ mm}$,是蒋家沟泥流水源汇流区,暴雨中心多出现在海拔 $2\,500 \sim 3\,000 \text{ m}$ 的地带^[19,24](图1)。本研究依托中科院东川泥石流观测研究站开展,该站1961年建设于云南省东北部昆明市东川区蒋家沟流域下游,1988年成为中科院首批5个野外开放站点并对外投入使用。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

根据流域实地情况和前期勘查,参考坡面整体是否失稳、失稳坡面上沿是否稳定、坡脚是否存在明显的堆积区及坡面不同区段面积是否超过森林群落调查的最小面积(500 m^2)等4项选择标准^[25-26],采用典型样地法,基于样地面积、植被覆盖度、坡度、坡向、人为干扰程度等环境因子基本相似的原则,在蒋家沟不同气候区共设置5块标准样地,样地均为沟道侵蚀引起坡面下滑后形成的失稳性坡面,形成历史约40年,具有一定典型性和代表性,分别位于大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡(亚热带干热河谷气候区)、多照沟阳坡(亚热带和暖温带半湿润区)、大地阴坡和小尖风阳坡(温带湿润山岭区),样地内部包含 $>500 \text{ m}^2$ 稳定区(实际面积均超过 $2\,500 \text{ m}^2$)、失稳区和堆积区,总体样地面积大小统一为 $50 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 。需要指出的是,由于亚热带和暖温带半湿润区山体稳定程度高于亚热带干热河谷气候区和温带

表 1 不同气候区样地基本概况

Tab. 1 Characteristics of study areas in different climate regions

气候类型 Climate type	样地 Sample plot	位置 Location	区段 Section	坡度 Slope degree/(°)	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	优势物种 Dominant species
亚热带干热河谷区 Subtropical dry-hot valley region	大凹子沟阴坡 Daaози Gully shady slope (I)	103°08'30" E, 26°14'38" N	稳定区 Stable area	16	92	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> 、拟金茅 <i>Eulaliopsis binata</i>
			失稳区 Unstable area	25	62	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>
			堆积区 Accumulation area	30	28	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>
	查菁沟阳坡 Chajing Gully sunny slope (II)	103°08'01" E, 26°15'06" N	稳定区 Stable area	25	92	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> 、黄背草 <i>Themeda triandra</i> 、田菁 <i>Sesbania cannabina</i>
			失稳区 Unstable area	30	63	田菁 <i>Sesbania cannabina</i> 、苳草 <i>Arthraxon hispidus</i> 、扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>
			堆积区 Accumulation area	40	32	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> 、苳草 <i>Arthraxon hispidus</i> 、铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>
亚热带和暖温带半 湿润区 Subtropical and warm temperate subhumid region	多照沟阳坡 Duo Zhao Gully sunny slope (III)	103°11'02" E, 26°14'29" N	稳定区 Stable area	20	70	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>
			失稳区 Unstable area	37	25	艾纳香 <i>Blumea balsamifera</i> 、茅 <i>Imperata cylindrica</i> 、艾 <i>Artemisia argyi</i>
			堆积区 Accumulation area	45	54	铁苋菜 <i>Acalypha australis</i> 、艾 <i>Artemisia argyi</i> 、菊叶香藜 <i>Chenopodium foetidum</i>
	大地阴坡 Dadi shady slope (IV)	103°11'49" E, 26°16'32" N	稳定区 Stable area	27	75	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserine</i> 、黄独 <i>Dioscorea bulbifera</i> 、画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>
			失稳区 Unstable area	35	57	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserine</i> 、香薷 <i>Elsholtzia ciliata</i> 、紫菀 <i>Aster tataricus</i>
			堆积区 Accumulation area	45	36	野棉花 <i>Anemone vitifolia</i> 、东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i> 、景天 <i>Androsace bulleyana</i>
温带湿润山岭区 Temperate humid mountain ridge region	小尖风阳坡Xiaojianfeng sunny slope (V)	103°10'55" E, 26°16'46" N	稳定区 Stable area	30	65	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i> 、老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> 、广布野豌豆 <i>Vicia cracca</i>
			失稳区 Unstable area	38	38	毛马唐 <i>Digitaria chrysoblephara</i> 、广布 野豌豆 <i>Vicia cracca</i> 、牛至 <i>Origanum vulgare</i>
			堆积区 Accumulation area	46	20	牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 、牛至 <i>Origanum vulgare</i> 、香薷 <i>Elsholtzia ciliata</i>

湿润山岭区, 且分布较多村落, 未受人为扰动的失稳性坡面少见, 故仅选取多照沟阳坡作为研究样地。

依据坡面地形特征和稳定程度将失稳性坡面划分为 3 个不同区段, 即分别位于失稳性坡面上沿的稳定区、位于失稳性坡面中部的失稳区及位于失稳性坡面下部的堆积区。失稳性坡面上沿(即稳定区)为暂未受滑坡影响的原生草丛或云南松(*Pinus yunnanensis*)人工林, 其位于泥石流沟两侧山坡上部, 植被覆盖率较高, 坡面侵蚀程度低; 失稳区位于滑坡整体移动且侵蚀强烈的失稳性坡面中部, 其位于稳定区下方, 分布有大面积裸露地表, 土壤结构松散, 为滑坡启动与铲刮作用的区域; 失稳性坡面下部为滑坡松散固体物质的堆积区, 其位于谷底, 为坡度平缓的扇状滑坡堆积体, 表面以粗砾堆积物为主, 细

粒堆积物主要分布于堆积体内部。用手持 GPS 和罗盘仪记录样地位置、坡度和坡向等信息。

1.2.2 土壤密度测定

本文将失稳性坡面不同区段进行 5 m × 5 m 的网格状分割, 对各区段的所有网格进行编号, 将号码写在号签上置于盒内摇匀后, 连续抽取 3 次, 获得不同区段的随机土壤采样点, 在网格中心处基于土壤结构稳定程度, 在不同区段采取以下原则确定采样点: (1) 稳定区土壤保持完好, 可在随机网格的中心采样; (2) 失稳区和堆积区的网格中心若存在因侵蚀出现的细沟, 则避开细沟区在中心附近(距离 30 cm) 选择具较稳定结构的采样点, 减少因样点土壤结构破坏造成的随机误差。随后设置样点内挖掘 0 ~ 20 cm 深土壤剖面, 根据剖面发生层次或机械分层, 选用环

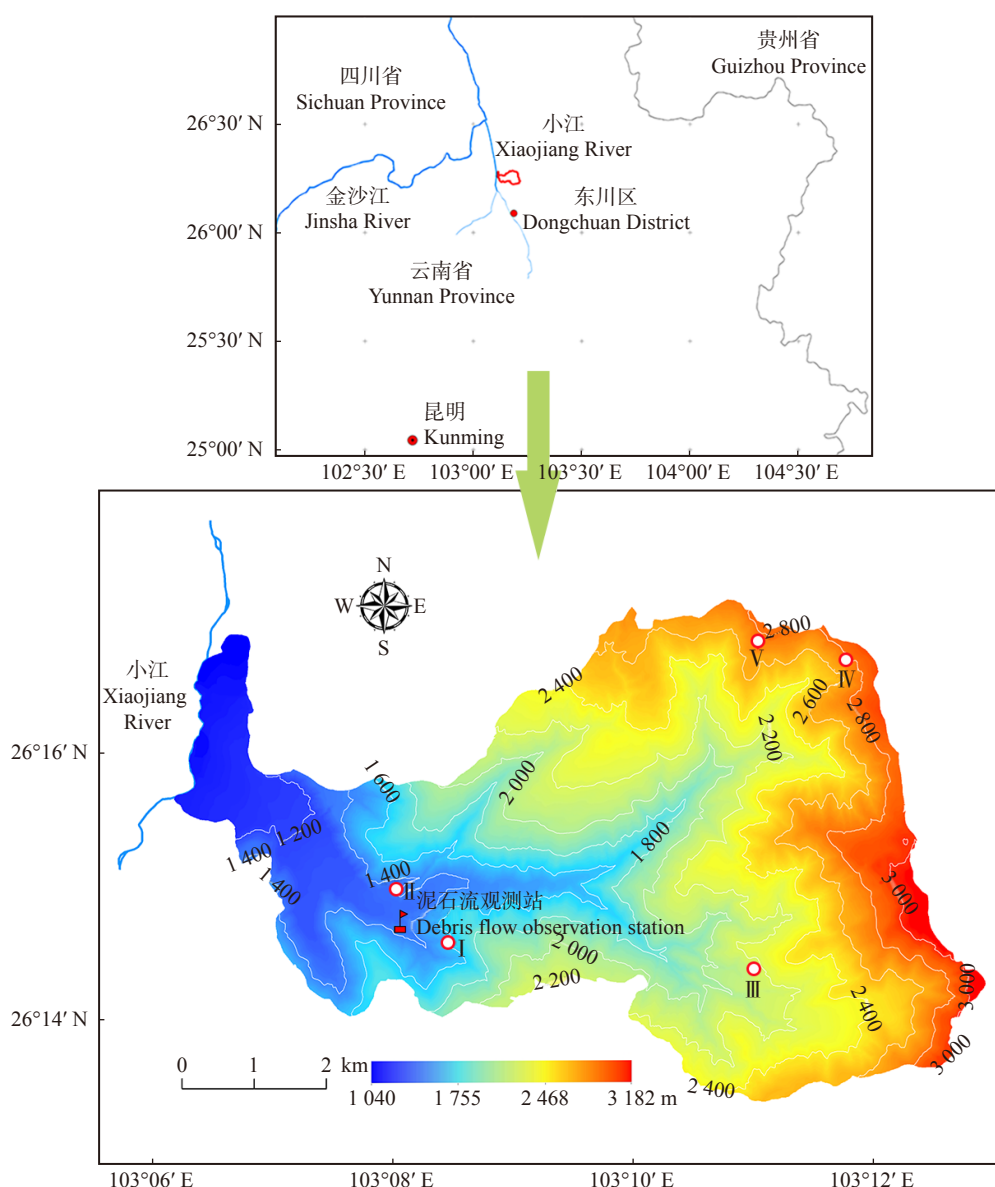


图1 研究区地理位置和样地分布示意图

Fig. 1 Location of study area and sample plot distribution

刀法^[27]测定土壤密度(soil bulk density, SBD)。取土壤环刀样时先去除地表腐殖质层和杂物,按0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm分层,每层土壤设置3个重复,分别将环刀(高度5 cm,体积100 cm³)平稳夯入土壤,保持环刀内土壤结构不受破坏,注意环刀内不要有石砾或粗根侵入,如果土壤过于紧实,可垫上灰刀用皮锤轻轻打入,为避免土样损失,环刀有网孔的下底盖装填圆形滤纸。待取出环刀后,用锋利的削刀切去环刀两端多余的土,使环刀内的土壤体积与环刀容积相等,放入自封袋并贴上标签,带回室内备用。将充满土样的环刀,放入烘箱中在(105±2)℃下烘至恒质量、称质量。在蒋家沟流域不同气候区失稳性坡面上共采集135个环刀样(5块标准样地×3个区段×3个分层×3个重复),采样完成后回填土壤并踩实,避免造成水土流失。

1.2.3 植被调查与生物量测定

根据与土壤样品相似的随机取样原则,在有乔木分布的区段内按照20 m×20 m、灌木分布及草本分布的区段按照5 m×5 m的网格状分割,对各区段的所有网格进行编号,将号码写在号签上置于盒内摇匀后备用。在仅有草本植物分布的大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡,各区段连续抽取9次,在9个5 m×5 m网格中沿对角线统一在右下角设置1 m×1 m的草本样方,每个区段各设置9个样方进行植被调查及取样,在有乔木分布或灌木分布的多照沟阳坡、大地阴坡和小尖风阳坡,继续将网格划分为1 m×1 m网格,随后每个区段对所有网格抽签随机设置3个1 m×1 m的草本样方进行植被调查及取样,5个样地共计81个草本样方。在分布有乔木的区段内部随机设置3块20 m×20 m调查样方,调查记录样方内

树种胸径(DBH)、树高及林下灌木草本类型、盖度、高度;无乔木分布但有灌木分布的区段随机设置3块5 m×5 m调查样方,调查记录灌木类型、盖度和高度。采用“全株收获法”对1 m×1 m的草本样方完全取样,装入含有变色硅胶的自封袋,做好标记,采样后回填土壤并踩实,避免造成水土流失。将采集的植物带回室内后去除表面泥土等杂物,依照地上部分和地下部分对植物进行分离,测定各自鲜质量并将植物样品装入写好标签的信封中,置于烘箱中(105±2)℃杀青10 min,然后80℃烘干至恒质量(约48 h),在干燥器中冷却后称其干质量。

考虑到研究区为典型生态脆弱区,灌木层生物量采取收获法可能对区域生态系统稳定性产生影响,故采用我国秦岭淮河以南灌木林平均生物量值19.76 t/hm²[28],凋落物层生物量的测定采用收获法,取样面积为1 m²。

温带湿润山岭区与亚热带和暖温带半湿润区乔木层主要是云南松。乔木生物量估算采用生物量转换因子法,调查样方内所出现的乔木树种,并对所有乔木进行每木检尺,测定胸径和树高,选择相同或者是相似树种的生物量方程计算生物量。参照前人[29-30]研究选用生物量转换因子法计算云南松生物量,公式如下:

$$B = aV + b$$

式中: B 为生物量, V 为林分蓄积量, a 、 b 为蓄积量与生物量转换模型参数, $a = 0.52$, $b = 0$ 。

1.2.4 数据处理与统计分析

运用Excel 2016进行数据整理,然后运用R(3.4.2版本)对数据进行单因素方差分析(变量间差异显著性水平为 $P < 0.05$ 时,进行LSD检验)和非参数检验(当样本不满足正态分布和方差齐性时,正态分布用Shapiro-Wilk检验,方差齐性用Bartlett检验)、Pearson相关性分析、回归分析等处理和图形绘制。试验称质量所用的精密天平型号为Mettler Toledo公司生产的PL303,实际分度值为0.001 g,检定分度值为0.01 g,根据仪表精度、数据修约规则、数据显示的一致性和测量方法引起的误差,确定数据的有效数位为小数点后两位数; F 检验统计值和Pearson相关性值则以分析软件的生成值为准,保留3位小数。

2 结果与分析

2.1 不同气候区失稳性坡面植被生物量和含水率

作为植被恢复的重要指标之一,植物的生物量能够表征区域植被恢复程度(表2)。乔木生物量以多照沟阳坡最高(4 973.01 g/m²),大地阴坡次之

(2 508.95 g/m²),小尖风阳坡最低(1 896.72 g/m²)。大地阴坡、小尖风阳坡凋落物生物量显著高于多照沟阳坡($P < 0.05$)。对草本层生物量进行分析发现,温带湿润山岭区总生物量和地上生物量均以大地阴坡堆积区最高,大地阴坡稳定区最低,而地下生物量以大地阴坡失稳区最高,大地阴坡稳定区最低;亚热带和暖温带半湿润区地上生物量、地下生物量和总生物量均表现为失稳区>堆积区>稳定区;亚热带干热河谷区地上生物量、地下生物量和总生物量总体上均表现为稳定区>失稳区>堆积区,且差异显著($P < 0.05$);亚热带干热河谷区地上生物量、地下生物量和总生物量在稳定区和失稳区均为阴坡显著大于阳坡($P < 0.05$),但在堆积区为阳坡显著大于阴坡($P < 0.05$)。

根冠比指地下生物量和地上生物量之比,本研究结果表明,小尖风阳坡失稳区最高(1.95),查菁沟阳坡稳定区最低(0.21);根冠比在稳定区和失稳区均表现为大地阴坡>小尖风阳坡>多照沟阳坡>大凹子沟阴坡>查菁沟阳坡,但在堆积区表现为小尖风阳坡>多照沟阳坡>查菁沟阳坡>大地阴坡>大凹子沟阴坡;同一气候区各样地不同区段间根冠比,仅在查菁沟阳坡稳定区显著低于失稳区和堆积区($P < 0.05$)及小尖风阳坡失稳区显著高于稳定区和堆积区($P < 0.05$),其余均无显著差异。

植物地上和地下生物量的关系是植物对周围环境适应状况的重要指示,本研究对不同气候区失稳性坡面的所有81个草本样方的地上生物量和地下生物量数据进行非线性回归拟合,得到异速生长模型为 $y = 2.167x^{0.684}$,决定系数为0.576(图2)。由图2可以得出,在不同气候失稳性坡面条件下,草本植物地上生物量与地下生物量变化保持显著的指数模型关系,表现出稳定的生长比例,表明草本植物可以通过调节自身的生物量分配比例来适应外界环境条件的变化,以提高其生存能力。

由表3可知,不同气候区失稳性坡面植被含水率介于0.30~0.73之间;不同气候植被含水率在稳定区和失稳区总体表现为温带湿润山岭区和亚热带和暖温带半湿润区显著大于亚热带干热河谷区($P < 0.05$),但在堆积区没有显著差异;亚热带干热河谷区阳坡植被含水率在稳定区和失稳区总体高于阴坡,但在温带湿润山岭区不明显;不同气候区失稳性坡面地上植被含水率均高于地下植被含水率。

2.2 不同气候区失稳性坡面土壤密度

表4表明,不同气候区失稳性坡面0~20 cm平均土壤密度介于1.30~1.76 g/cm³之间;温带湿润山岭区和亚热带干热河谷区土壤密度在不同区段均表

表 2 不同气候区失稳性坡面植被生物量

Tab. 2 Vegetation biomass for unstable slope of different climate regions		g/m ²				
生物量 Biomass	区段 Section	大凹子沟阴坡 Daaози Gully shady slope (I , n = 9)	查菁沟阳坡 Chajing Gully sunny slope (II , n = 9)	多照沟阳坡 Duo Zhao Gully sunny slope (III , n = 3)	大地阴坡 Dadi shady slope (IV , n = 3)	小尖风阳坡 Xiaojianfeng sunny slope (V , n = 3)
乔木生物量 Tree biomass	稳定区 Stable area			4 973.01 ± 212.12a	2 508.95 ± 134.37b	1 896.72 ± 130.14c
灌木生物量 Shrub biomass	稳定区 Stable area			1 976	1 976	1 976
凋落物生物量 Litter biomass	稳定区 Stable area			244.75 ± 55.61b	554.20 ± 77.37a	521.40 ± 136.45a
草地上生物量 Herbaceous aboveground biomass	稳定区 Stable area	444.76 ± 39.50 Aa	276.13 ± 48.91Ab	48.87 ± 1.03Ac	21.20 ± 8.41Bc	38.55 ± 8.72Ac
	失稳区 Unstable area	259.18 ± 31.82Ba	96.03 ± 8.87Bb	110.60 ± 25.16Ab	86.17 ± 7.28ABb	39.97 ± 6.65Ab
	堆积区 Accumulation area	38.11 ± 5.64Cc	53.29 ± 6.49Cb	103.72 ± 24.64Aa	165.47 ± 41.61Aa	46.57 ± 9.28Ab
草地下生物量 Herbaceous underground biomass	稳定区 Stable area	161.11 ± 20.71Aa	55.82 ± 10.16Ab	31.83 ± 1.53Bb	22.93 ± 13.00Ab	29.29 ± 7.16Ab
	失稳区 Unstable area	102.36 ± 12.22Ba	34.79 ± 6.43Bb	107.68 ± 10.56Aa	106.17 ± 26.22Aa	79.03 ± 16.63Aab
	堆积区 Accumulation area	10.94 ± 2.51Cc	23.68 ± 4.58Cb	60.25 ± 16.70ABa	55.53 ± 16.13Aa	34.97 ± 9.01Aab
草本总生物量 Herbaceous total biomass	稳定区 Stable area	605.87 ± 57.15Aa	331.95 ± 57.36Ab	80.70 ± 1.46Bb	44.13 ± 21.13Bb	67.84 ± 15.67Ab
	失稳区 Unstable area	361.53 ± 35.77Ba	130.82 ± 13.41Bb	218.28 ± 35.67Aab	192.33 ± 31.30ABb	119.00 ± 23.27Ab
	堆积区 Accumulation area	49.05 ± 7.64Cc	76.97 ± 10.26Cb	163.97 ± 22.08ABa	221.00 ± 57.39Aa	81.53 ± 11.59Ab
草根冠比 Herbaceous root shoot ratio	稳定区 Stable area	0.36 ± 0.04Abc	0.21 ± 0.02Ac	0.65 ± 0.04Aa	1.01 ± 0.29Aa	0.76 ± 0.05Aa
	失稳区 Unstable area	0.46 ± 0.09Ac	0.36 ± 0.06Ac	1.03 ± 0.13Ab	1.22 ± 0.25Ab	1.95 ± 0.08Aa
	堆积区 Accumulation area	0.28 ± 0.05Ab	0.42 ± 0.06Aab	0.74 ± 0.37Aab	0.33 ± 0.03Bab	0.82 ± 0.23Aa

注: 数据为均值 ± 标准误; 同列不同大写字母表示同一气候区各样地不同区段间差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同小写字母表示不同样地差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Notes: data are mean ± standard error; different capital letters in the same column indicate significant differences between different sections of the same climate region ($P < 0.05$); different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different sample plots ($P < 0.05$). Same as below.

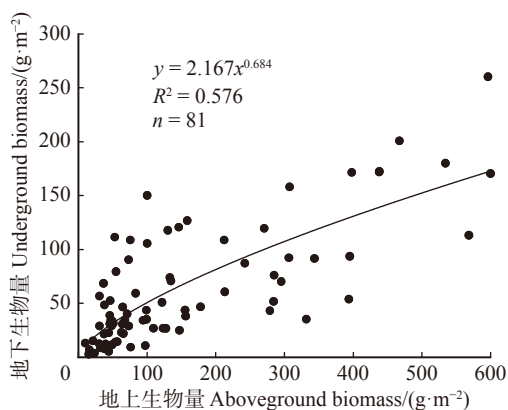


图 2 根冠异速生长模型
Fig. 2 Allometric growth model of root and crown

现为阳坡高于阴坡; 亚热带干热河谷区土壤密度均表现为失稳区 > 堆积区 > 稳定区, 且差异显著 ($P < 0.05$), 而温带湿润山岭区土壤密度均表现为堆积区 > 稳定区 > 失稳区, 且差异显著 ($P < 0.05$), 但在亚热带和暖温带半湿润区土壤密度表现为堆积区显

著高于稳定区和失稳区 ($P < 0.05$), 稳定区和失稳区间没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3 气候类型和失稳性坡面区段对土壤密度、生物量和植被含水率的影响

表 5 显示, 气候因素对地上生物量、总生物量、根冠比、植被地上含水率、植被地下含水率影响极显著 ($P < 0.01$), 但对地下生物量和 0 ~ 20 cm 深平均土壤密度无显著影响; 区段因素对地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比、植被地上含水率、植被地下含水率和 0 ~ 20 cm 深平均土壤密度的影响极显著 ($P < 0.01$); 气候因素和区段因素的交互作用, 除植被地下含水率外, 对其余指标均存在极显著影响 ($P < 0.01$)。

2.4 不同气候区失稳性坡面土壤密度与生物量的关系

0 ~ 5 cm 深土壤密度与地上生物量、总生物量极显著负相关 (表 6), 与地下生物量显著负相关, 与植被地下含水率显著正相关, 但与根冠比和植被地上

表 3 不同气候区失稳性坡面植被含水率

Tab. 3 Vegetation water content for unstable slope of different climate regions						
植被含水率 Vegetation water content	区段 Section	大四子沟阴坡 Daaози Gully shady slope (I)	查菁沟阳坡 Chajing Gully sunny slope (II)	多照沟阳坡 Duozhao Gully sunny slope (III)	大地阴坡 Dadi shady slope (IV)	小尖风阳坡 Xiaojianfeng sunny slope (V)
地上部分 Aboveground part	稳定区 Stable area	0.39 ± 0.02Bd	0.48 ± 0.02Bc	0.66 ± 0.03Ab	0.80 ± 0.02Aa	0.73 ± 0.04Aab
	失稳区 Unstable area	0.33 ± 0.03Bb	0.60 ± 0.03Aa	0.61 ± 0.02Aa	0.69 ± 0.03Aa	0.61 ± 0.03Ba
	堆积区 Accumulation area	0.66 ± 0.06Aa	0.64 ± 0.02Aa	0.71 ± 0.04Aa	0.72 ± 0.03Aa	0.64 ± 0.03ABa
地下部分 Underground part	稳定区 Stable area	0.38 ± 0.02ABb	0.36 ± 0.01Ab	0.62 ± 0.02Aa	0.69 ± 0.02Aa	0.63 ± 0.01Aa
	失稳区 Unstable area	0.30 ± 0.02Bb	0.45 ± 0.04Ab	0.50 ± 0.02Aa	0.63 ± 0.03Aa	0.52 ± 0.02Ba
	堆积区 Accumulation area	0.48 ± 0.04Abc	0.45 ± 0.02Ac	0.62 ± 0.05Aab	0.65 ± 0.01Aa	0.54 ± 0.02Babc

表 4 不同气候区失稳性坡面平均土壤密度

Tab. 4 Average soil bulk density for unstable slope of different climate regions						g/cm ³
区段 Section	大四子沟阴坡 Daaози Gully shady slope (I)	查菁沟阳坡 Chajing Gully sunny slope (II)	多照沟阳坡 Duozhao Gully sunny slope (III)	大地阴坡 Dadi shady slope (IV)	小尖风阳坡 Xiaojianfeng sunny slope (V)	
稳定区 Stable area	1.45 ± 0.00Cc	1.55 ± 0.02Cb	1.59 ± 0.00Bab	1.46 ± 0.01Bc	1.67 ± 0.03Ba	
失稳区 Unstable area	1.62 ± 0.00Aa	1.64 ± 0.03Aa	1.58 ± 0.01Ba	1.30 ± 0.02Cb	1.60 ± 0.09Ca	
堆积区 Accumulation area	1.53 ± 0.00Bc	1.61 ± 0.02Bb	1.67 ± 0.02Aab	1.72 ± 0.03Aa	1.76 ± 0.01Aa	

注: 数据为均值 ± 标准误; 同列不同大写字母表示同一气候区各样地不同区段间土壤密度差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同小写字母表示不同样地土壤密度差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: data are mean ± standard error; different capital letters in the same column indicate significant differences in soil bulk density between different sections of the same climate region ($P < 0.05$); different lowercase letters in the same row indicate significant differences in soil bulk density between different sample plots ($P < 0.05$).

表 5 气候类型和失稳性坡面区段对土壤密度、生物量和植被含水率的影响及其交互作用

Tab. 5 Effects of climate type and instability slope sections on soil bulk density, biomass and vegetation water content and their interactions						
指标 Index	气候类型 Climate type		区段 Section		气候类型 × 区段 Climate type × section	
	df	F	df	F	df	F
B_A	2	14.514***	2	25.826***	4	12.208***
B_U	2	0.399	2	12.529***	4	6.478***
B_T	2	8.576***	2	22.433***	4	11.130***
$B_{U/A}$	2	48.032***	2	10.778***	4	7.533***
W_A	2	19.174***	2	11.749***	4	3.976**
W_U	2	49.013***	2	5.840**	4	2.448
SBD	2	1.134	2	9.830***	4	12.453***

注: B_A , 地上生物量; B_U , 地下生物量; B_T , 总生物量; $B_{U/A}$, 根冠比; W_A , 植被地上含水率; W_U , 植被地下含水率; SBD, 0 ~ 20 cm 深平均土壤密度。*表示在 $P < 0.05$ 水平上影响显著; **表示在 $P < 0.01$ 水平上影响显著; ***表示在 $P < 0.001$ 水平上影响显著。下同。Notes: B_A , aboveground biomass; B_U , underground biomass; B_T , total biomass; $B_{U/A}$, root shoot ratio; W_A , aboveground vegetation water content; W_U , underground vegetation water content; SBD, 0–20 cm deep average soil bulk density. * means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$; *** means $P < 0.001$. Same as below.

含水率均无显著相关性; 5 ~ 10 cm 深土壤密度仅与地下生物量显著负相关; 但 10 ~ 20 cm 深土壤密度与各生物量指标均无显著相关性。另外, 地上生物量、地下生物量、总生物量与植被地上、地下含水率均呈现极显著负相关性。

3 讨论与结论

植被和土壤是泥石流频发区脆弱山地生态系统最受关注的两种资源, 复杂的地形条件和气候类型, 导致土壤环境和植被群落结构的空间异质性较强,

表 6 不同气候区失稳性坡面土壤密度与生物量的相关性

Tab. 6 Correlation between soil bulk density and biomass for unstable slope of different climate regions

项目 Item	SBD _{0~5}	SBD _{5~10}	SBD _{10~20}	B _A	B _U	B _T	B _{U/A}	W _A	W _U
SBD _{0~5}	1								
SBD _{5~10}	0.547**	1							
SBD _{10~20}	0.476**	0.538**	1						
B _A	-0.287**	-0.122	-0.151	1					
B _U	-0.260*	-0.251*	-0.194	0.764**	1				
B _T	-0.294**	-0.164	-0.170	0.984**	0.867**	1			
B _{U/A}	0.048	-0.054	-0.162	-0.331**	0.195	-0.202	1		
W _A	0.191	0.005	-0.104	-0.656**	-0.523**	-0.652**	0.236*	1	
W _U	0.220*	0.020	-0.180	-0.502**	-0.304**	-0.472**	0.337**	0.807**	1

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。SBD_{0~5}, 0~5 cm 深土壤密度; SBD_{5~10}, 5~10 cm 深土壤密度; SBD_{10~20}, 10~20 cm 深土壤密度。Notes: * means significantly correlated at the 0.05 level (two-tailed), ** means significantly correlated at the 0.01 level (two-tailed). SBD_{0~5}, 0~5 cm deep soil bulk density; SBD_{5~10}, 5~10 cm deep soil bulk density; SBD_{10~20}, 10~20 cm deep soil bulk density.

从而降低了生态系统的稳定性,增加了生态恢复的难度^[31-32]。生物量反映了生态系统获取能量和利用养分元素的效率,是研究生态系统的物质循环、能量流、信息流及生产力的基础^[13,33]。亚热带和暖温带半湿润区乔木生物量显著高于温带湿润山岭区,但温带湿润山岭区凋落物生物量显著高于亚热带和暖温带半湿润区,这主要是因为温带湿润山岭区海拔高,温度较低,枯落物分解速率较慢。亚热带干热河谷区各样地地上与地下生物量表现规律一致,均为稳定区 > 失稳区 > 堆积区,造成这一现象主要是由土壤结构性质、植被覆盖率、群落组成及温度等差异的共同作用所导致^[22]。

查菁沟阳坡的生物量低于大巴子沟阴坡,这主要是坡向对微环境因子作用的结果^[22,34]:第一,坡向通过改变局部气候条件制约植被类型的形成,进而影响植被生产力;第二,坡向也会影响植物生长的主要限制条件(土壤温度和土壤水分)。

亚热带和暖温带半湿润区及温带湿润山岭区失稳性坡面草本生物量随坡面稳定程度下降而提高,并且草本植物地上与地下生物量无显著差异,引起这种差异的原因是由于各气候区自然条件、植被群落组成以及人类活动干扰强度不同。蒋家沟流域中上游为主要的聚居区,毁林开荒、伐薪烧炭、刈割、放牧践踏等均会造成草本地地上生物量减少,并且导致土壤板结,导致植被层有机质加速向土壤转移^[35-37],而中上游稳定区均存在乔木群落,虽然在维持生态系统碳素存储方面做出巨大贡献,但林冠层不仅能够影响林下植被群落对光能的利用效率,而且乔木产生较多的凋落物能够阻碍草本植物种子萌发并且抑制草本生物量增长^[38],因此稳定区草本生物量较低。

植物为适应环境条件的变化,达到资源优化配置,可能会形成不同的根冠比^[39]。当植物生长的地下环境不利时,光合作用产物则会较多的分配到地下,促使根系优先生长,提高对养分和水分的吸收,从而提高植物对外界环境变化的适应力^[40-41]。本研究中,在不同样地间,查菁沟阳坡和大巴子阴坡根冠比在稳定区和失稳区均显著低于其余样地,这是由于该区位于海拔较低的干热河谷气候区,虽然光照充足,植物光合作用增强,但因水分缺乏,根系吸收的水分无法满足地上与地下部分的共同需求,植物体含水率较低(表 3),造成植物光合产物输送至根部的难度加大,影响根系生物量的积累。在不同区段间,仅大巴阴坡堆积区显著低于失稳区和稳定区,这是因为大巴阴坡堆积区形成时间长,虽然土壤为粗骨化、肥力低的初育土,但因堆积区与沟谷河道接近,水分供应状况良好^[22],植被地上部分生长空间优于失稳区和稳定区,故堆积区根冠比更低。

植物地上与地下部分的生长是相互依赖、相互制约的,根系在地下吸收水分和养分,冠层在地上进行光合作用,同时根系的生长又需要地上部分光合作用的同化产物^[3]。本研究中,草本植物在不同气候类型失稳性坡面条件下地上生物量和地下生物量呈现幂函数关系,表现出稳定的生长比例,符合生物体普遍的异速生长规律,说明该研究区草本植物能自我调节适应不同环境条件,这与宋香静等^[40]、王同顺等^[3]对不同土壤和水分条件下地上生物量和地下生物量关系研究结论相似。

本研究小流域尺度不同气候区失稳性坡面土壤密度空间变异不大,表现为弱变异性。总体上气候因素对 0~20 cm 土层平均土壤密度影响不显著,不同于王丽华等^[7]对四川草地研究发现气候因素对土

壤密度影响显著,这可能是本研究尺度较小的原因。在亚热带和暖温带半湿润区及温带湿润山岭区土壤密度表现为堆积区 > 稳定区 > 失稳区,气候因素(温度,降水,云量等)、植被群落组成差异以及稳定区人类活动干扰强的综合作用是造成这一现象的主要原因,但在亚热带干热河谷区土壤密度表现为失稳区 > 堆积区 > 稳定区,这主要因为失稳区受滑坡、崩塌及降水冲刷影响,土壤结构受到破坏,堆积区多大石砾,土壤结构发育不完整,生物作用时间较短。

植被可改善土壤结构,提高持水性能,降低土壤密度,增加土壤孔隙度,本研究结论与之相同。但关于土壤密度对植物地上部分生长影响的结论不一致,大部分学者认为影响显著^[12,14],一部分认为有影响但不显著^[42],或无影响^[43],甚至促进生长^[44]。本研究结果表明随土壤密度增加,地上生物量下降,这与周欣等^[45]、郑晓翀等^[46]研究发现类似。关于土壤密度影响植物地上部分生长的原因^[12]主要有:一是物理因素,高土壤密度导致高机械阻力,阻止根系的生长,无法吸收足够的水分和养分,从而减缓地上部分的生长;二是化学因素,不同土壤密度条件下根系分泌不同的激素种类和水平的结果。本研究认为土壤密度能够从多方面综合作用于植物地上部分生长,除上述提到的物理、化学因素,还应该充分考虑水分等生理因素如在亚热带干热河谷气候稳定区,根土界面阻力通常是限制根对土壤吸收的主要阻力,增加土壤密度可以大大提高土壤的非饱和导水率和降低根土界面阻力,有利于根系的吸水,而疏松土壤中根土界面阻力大,反而不利于根系吸水^[12,47],进而影响植物生长;但在温带湿润山岭气候稳定区,土壤较湿润,土壤密度增大导致的机械阻力增幅小于干旱条件下的增幅,导致孔隙度降低,透气性变差,影响根系的生理活性和激素合成,减缓植物生长速度,进而影响植被生物量。

在0~5 cm土壤,随密度增大,地上和地下生物量均下降,这与刘晚苟等^[12]研究结论相似,另外本研究还发现土壤密度对地上部分影响更大,但在5~10 cm和10~20 cm土层土壤密度对地上生物量均无显著影响,说明植物生长状况主要受表层土壤密度影响,这是因为该研究区草本植物多为一年生,根系主要生长表层土壤。对不同的研究对象和环境,前人对土壤密度影响根冠比的结论不一致,高土壤密度使根冠比下降^[12,48]或者升高^[14],但本研究发现土壤密度对根冠比没有显著影响,这与该研究区植物物种、土壤水分和土壤养分差异有关。

本研究采样时间集中于夏季,相较稳定区,失稳

区与堆积区受降水、滑坡、泥石流影响较大,可能造成土壤层序紊乱、植被受损、群落特征改变等问题,后续研究应开展季节及年际动态观测研究,深入了解地形、植被季节变化对生物量和土壤密度分布特征的影响。不同气候区生物量与土壤密度的差异是多种环境因子的综合作用导致的,精确设置室内盆栽试验以阐明多因素对生物量与土壤密度的影响效应,还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 李潮海,王群,郝四平. 土壤物理性质对土壤生物活性及作物生长的影响研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(1): 32-37.
Li C H, Wang Q, Hao S P. Advances of studies on the effect of soil physical properties on soil biological activity and crop growth[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2002, 36(1): 32-37.
- [2] 吴刚,冯宗炜. 中国主要五针松群落学特征及其生物量的研究[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 260-267.
Wu G, Feng Z W. The sociological characteristics and biomass of stone pine forests in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15(3): 260-267.
- [3] 王同顺,孙保平,冯磊,等. 不同水分处理对甘蒙柽柳幼苗根系生长特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 32(3): 591-596.
Wang T S, Sun B P, Feng L, et al. Effects of different soil moisture contents on root growth characteristics of *Tamarix austromongolica* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 591-596.
- [4] Troughton A. The rate of growth and partitioning of assimilates in young grass plants: a mathematical model[J]. Annals of Botany, 1977, 41(3): 553-565.
- [5] 李雪华,李晓兰,蒋德明,等. 科尔沁沙地70种草本植物个体和构件生物量比较研究[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 54-59.
Li X H, Li X L, Jiang D M, et al. A comparative study of the individual biomass and modular biomass of 70 herbaceous species found in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(2): 54-59.
- [6] Hanawalt R B, Whittaker R H. Altitudinally coordinated patterns of soils and vegetation in the San Jacinto Mountains, California[J]. Soil Science, 1976, 121(2): 114-124.
- [7] 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 L H, Xue J Y, Xie Y, 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.
- [8] 冯强,段宝玲,姜硕,等. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(1): 39-45.
Feng Q, Duan B L, Jiang S, et al. Spatial heterogeneity of bulk density and its influencing factors at small watershed scale[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science

- Edition), 2016, 36(1): 39–45.
- [9] 罗汝英. 森林土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- Luo R Y. Forest soil science[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [10] Reichert J M, Suzuki L E A S, Reinert D J, et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(2): 242–254.
- [11] Parker M M, Van Lear D H. Soil heterogeneity and root distribution of mature loblolly pine stands in piedmont soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(6): 1920–1925.
- [12] 刘晚苟, 李良贤, 谢海容, 等. 土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 214–220.
- Liu W G, Li L X, Xie H R, et al. Effect of soil bulk density on root morphology and biomass of vetiver grass seedlings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(4): 214–220.
- [13] 张千千, 王彦辉, 缪丽萍, 等. 六盘山叠叠沟小流域草地上生物量的空间变化及其与环境因子的关系[J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 82–87.
- Zhang Q Q, Wang Y H, Miao L P, et al. Spatial variation of above-ground biomass of grasses and its relation with environmental factors in the small watershed of Diediegou of Liupan Mountains[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(4): 82–87.
- [14] Benigno S M, Dixon K W, Stevens J C. Soil physical strength rather than excess ethylene reduces root elongation of *Eucalyptus* seedlings in mechanically impeded sandy soils[J]. Plant Growth Regulation, 2012, 68(2): 261–270.
- [15] Twum E K A, Nii-Annang S. Impact of soil compaction on bulk density and root biomass of *Quercus petraea* L. at reclaimed post-lignite mining site in Lusatia, Germany[J/OL]. Applied and Environmental Soil Science, 2015 [2019-01-13]. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/504603>.
- [16] Walker L R, Moral R D. Lessons from primary succession for restoration of severely damaged habitats[J]. Applied Vegetation Science, 2009, 12(1): 55–67.
- [17] Pandit K, Sarkar S, Sharma M. Optimization techniques in slope stability analysis methods[M]// Pradhan S P, Vishal V, Singh T N. Landslides: theory, practice and modelling. Berlin: Springer, 2019: 227–264.
- [18] 罗清虎, 孙凡, 崔羽, 等. 蒋家沟泥石流频发流域失稳性坡面主要植物种间关联性分析[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 689–696.
- Luo Q H, Sun F, Cui Y, et al. Interspecific association among main plant species in the unstable slope with high-frequency debris flow[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(4): 689–696.
- [19] 张有富. 蒋家沟流域的森林植被与泥石流[J]. 山地学报, 1987, 5(4): 213–217.
- Zhang Y F. Vegetation destruction and debris flow disasters in the Jiangjia Ravine[J]. Mountain Research, 1987, 5(4): 213–217.
- [20] 张广帅, 俞伟, 邓浩俊, 等. 干热河谷泥石流流域不同分区土壤养分特征[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(1): 8–13.
- Zhang G S, Yu W, Deng H J, et al. The soil nutrition characteristics in different partitions of debris flow basin in dry-hot valley[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2014, 34(1): 8–13.
- [21] 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 A M, Deng H J, Yan S W, 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 and Environmental Biology, 2016, 22(2): 249–256.
- [22] 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 Q H, Sun F, Wu J Z, et al. Characterizing the vegetation community in the provenance slope with high-frequency debris flow[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(4): 681–688.
- [23] 吴建召, 陈爱民, 崔羽, 等. 干热河谷常见植物地表形态特征与泥沙拦截的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(6): 1236–1246.
- Wu J Z, Chen A M, Cui Y, et al. The relationship between near-surface morphological traits of familiar plants and their ability for sediment retention in a dry-hot valley[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(6): 1236–1246.
- [24] 郭晓军, 苏凤涓, 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.
- Guo X J, Su F H, Hong Y, 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.
- [25] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 549–580.
- Song Y C. Vegetation ecology[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001: 549–580.
- [26] McRoberts R E, Tomppo E O, Czaplewski R L. Sampling designs for national forest assessments[Z]. Rome: FAO, 2015: 23–40.
- [27] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 中华人民共和国林业行业标准(LY/T1219—1999)[S]. 北京: 标准出版社, 2000.
- Forest Soil Research Laboratory, Forestry Research Institute, Chinese Academy of Forestry. People's Republic of China forestry industry standard (LY/T1219—1999)[S]. Beijing: Standards Press, 2000.
- [28] 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 L, Ding J J, Ji Y H, et al. The dynamic carbon storage and economic value assessment of forest in Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 34(2): 1–5.
- [29] 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 H C, Wei A C, Huang T, et al. Dynamic analysis of biomass and carbon storage of *Pinus yunnanensis*[J]. Forest Resources Management, 2016(6): 37–43.
- [30] 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 J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(5): 497–508.
- [31] 於琨, 李克让, 陶波, 等. 植物地理分布对气候变化的适应性研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1326–1332.
- Yu L, Li K R, Tao B, et al. Simulating and assessing the adaptability of geographic distribution of vegetation to climate change in China[J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1326–1332.
- [32] 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 G S, Deng H J, Yu W, 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 and Environmental Biology, 2014, 20(4): 646–654.
- [33] 罗丹. 青藏高原东缘高寒草甸生物量动态及能量积累研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2007.
- Luo D. Study on seasonal dynamics of biomass and energy storage of alpine meadow in eastern Qinghai-Tibetan Plateau[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2007.
- [34] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 67–73.
- Zhou P, Liu G B, Hou X L. Biomass and species diversity of herbosa at different position and aspects of slope in the hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 67–73.
- [35] 张智袁, 李刚, 张宾宾, 等. 山西典型天然草地碳分布特征及碳储量估算[J]. 草地学报, 2017, 25(1): 69–75.
- Zhang Z Y, Li G, Zhang B B, et al. Estimation on carbon distribution and storage of typical natural grassland in Shanxi Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(1): 69–75.
- [36] 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 H Y, Dong Z, Guo J Y, 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.
- [37] 徐长林. 坡向对青藏高原东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 C L. 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.
- [38] 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 K W, He J, Wu N. Effect of forest litter on microenvironment conditions of forestland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 153–158.
- [39] Lloret F, Casanovas C, Peñuelas J. Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root: shoot ratio, seed size and water and nitrogen use[J]. Functional Ecology, 1999, 13(2): 210–216.
- [40] 宋香静, 李胜男, 韦玮, 等. 黄河三角洲柽柳根系分布特征及其影响因素[J]. 湿地科学, 2017, 15(5): 716–723.
- Song X J, Li S N, Wei W, et al. Distribution characteristics of root system of *Tamarix chinensis* in Yellow River Delta and its influence factors[J]. Wetland Science, 2017, 15(5): 716–723.
- [41] 刘莹, 盖钧镒, 吕慧能. 作物根系形态与非生物胁迫耐性关系的研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 265–269.
- Liu Y, Gai J Y, Lü H N. Advances of the relationship between crop root morphology and tolerance to antibiotic stress[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2003, 4(3): 265–269.
- [42] Goodman A M, Ennos A R. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize[J]. Annals of Botany, 1999, 83(3): 293–302.
- [43] Oussible M, Crookston R K, Larson W E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(1): 34–38.
- [44] Iijima M, Kono Y, Yamauchi A, et al. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems[J]. Environmental and Experimental Botany, 1991, 31(3): 333–342.
- [45] 周欣, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地沙丘固定过程中植物生物量及土壤特性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 81–89.
- Zhou X, Zuo X A, Zhao X Y, et al. Plant biomass and soil properties during the process of dune restoration in the Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 81–89.
- [46] 郑晓翻, 赵家明, 张玉刚, 等. 呼伦贝尔草原生物量变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 533–538.
- Zheng X X, Zhao J M, Zhang Y G, et al. Variation of grassland biomass and its relationships with environmental factors in Hulunbeier, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 533–538.
- [47] Arvidsson J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction[J]. Plant and soil, 1999, 208(1): 9–19.
- [48] Atwell B J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering[J]. New Phytologist, 1990, 115(1): 43–49.

(责任编辑 范娟
责任编委 余新晓)