

苔藓对水土保持益处初探

康东阳^{1,2,3}, 孙雨龙^{1,2,3}, 贺磊磊^{1,2,3}, 田景琦^{1,2,3}, 付江涛^{1,2,3*}

¹陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西 汉中

²陕西理工大学人居环境科研学社, 陕西 汉中

³陕西理工大学秦巴山地岩土环境与灾害防治研究中心, 陕西 汉中

收稿日期: 2025年5月8日; 录用日期: 2025年6月23日; 发布日期: 2025年7月7日

摘要

苔藓植物作为陆地生态系统中最古老的类群之一, 虽个体微小, 却在水土保持中发挥着不可忽视的作用。本文从苔藓的生物学特性出发, 系统梳理其在固土、保水、改善微生境等方面的核心机制, 结合不同生态系统(如森林、喀斯特、红壤区等)的研究案例, 探讨苔藓与其他植物的协同效应及人工修复中的应用潜力。研究表明, 苔藓通过地表覆盖、根系(假根)固着、水分截留与调节等方式, 显著减少土壤侵蚀、增强土壤持水能力, 尤其在脆弱生态区具有独特优势。未来需进一步关注苔藓群落动态、气候变化响应及规模化应用技术, 为水土保持与生态修复提供新思路。

关键词

苔藓, 水土流失, 生态修复

Preliminary Study on the Benefits of Moss for Soil and Water Conservation

Dongyang Kang^{1,2,3}, Yulong Sun^{1,2,3}, Leilei He^{1,2,3}, Jingqi Tian^{1,2,3}, Jiangtao Fu^{1,2,3*}

¹School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi

²Human Settlement Environment Research Society, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi

³Research Center of Geotechnical Environment of Qinba Mountain and Disaster Prevention and Control, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi

Received: May 8th, 2025; accepted: Jun. 23rd, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

As one of the oldest groups in the terrestrial ecosystem, bryophytes, despite their small size, play a

*通讯作者。

non-negligible role in soil and water conservation. This paper starts from the biological characteristics of bryophytes, systematically combs its core mechanisms in soil fixation, water conservation, and micro-habitat improvement. Combining research cases in different ecosystems such as forests, karst areas, and red-soil regions, it explores the synergistic effects between bryophytes and other plants and their application potential in artificial restoration. Research shows that bryophytes significantly reduce soil erosion and enhance soil water-holding capacity through surface coverage, root (rhizoid) fixation, water interception, and regulation, especially having unique advantages in fragile ecological areas. In the future, more attention should be paid to bryophyte community dynamics, climate change response, and large-scale application technologies to provide new ideas for soil and water conservation and ecological restoration.

Keywords

Bryophytes, Soil Erosion, Ecological Restoration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水土流失作为全球头号生态危机,在我国呈现出强度大、影响广、危害深的显著特征。我国年均土壤流失量达 50.6 亿吨[1], 远超世界土壤侵蚀模数平均值(15 吨/公顷·年), 由此引发的连锁生态效应已成为制约可持续发展的核心瓶颈。同时, 水土流失的危害也从单一生态领域向经济社会系统传导[2]。据统计, 全国每年因水土流失造成的直接经济损失达 2347 亿元[3], 占总 GDP 的 0.35%。其中, 农业减产损失约占 42%, 水利设施维护成本约占 28%。据统计[4], 我国 76%的贫困县和 74%的贫困人口分布在水土流失区, 水土流失已成为区域发展与可持续发展的关键问题之一。

对水土流失开展治理是有效解决上述区域生态地质问题的关键。目前常采用的措施主要包括以人工硬质结构为主的传统工程措施(如梯田、挡土墙、淤地坝)等。这些措施对提高土体抗蚀性, 降低地表径流等具有较大优势, 但也存在不少问题, 如初期建设成本高昂且维护依赖性强等, 例如西南喀斯特地区修建 1 公里石质挡土墙成本达 12~15 万元, 相当于当地农户年均收入的 3~4 倍[5]; 黄土高原新建单座淤地坝平均投资超 200 万元, 且每 10 年需投入建设成本 15%~20%用于坝体加固[6]。同时也伴随着更严峻的是生态副作用: 混凝土护岸使河道生物膜面积减少 60%, 底栖动物多样性下降 45%, 水文连通性被割裂导致鱼类产卵场缩减 30% [7]。这类“工程化”治理会破坏原地形地貌、原有地表植物结构和分布格局以及土壤理化生特性, 由此导致出现人工景观与自然不协调的后果[8]。

苔藓植物是一类由水生向陆生过渡, 种数上仅次于被子植物的植物类群。据统计, 全世界苔藓植物约有 23,000 种[9], 中国有 150 科 591 属 3021 种, 其中, 藓类有 86 科 431 属 1945 种, 苔类有 60 科 152 属 1050 种, 角苔类有 4 科 8 属 26 种[10], 是世界上苔藓植物多样性程度最高的国家之一。苔藓类植物具有的多种抗逆机制(耐寒、耐旱、耐低温)赋予了其顽强的生命力, 帮助其分布于不同环境中, 其基部分泌的化学物质可加速基岩的风化, 促进土壤的形成和植物群落的演替, 进而改变地貌和陆地碳循环。此外, 苔藓还具备在岩石、陡坡以及无土壤或低有机物区等极端生境中定殖的优势, 其覆盖层可通过物理拦截、生物固持等方式减少土壤流失, 成为微地形水土保持的重要生态因子。

目前, 关于苔藓在水土保持中的作用已开展了部分研究, 但鉴于苔藓由于其自身生物量较低、属种难以鉴定等因素的限制, 相关研究的广度和深度不足, 这极大地限制了苔藓在水土保持工程中的实际应

用。由此,本文综合国内外近 10 年研究成果,分别从苔藓的水文特性、固持土壤与增强抗侵蚀能力和生态协同互作效应探讨了近 10 年国内苔藓水土保持能力方面的进展,在此基础上进一步指出了目前的研究不足,并展望了未来的研究发展方向,以期在苔藓水土保持中的科学应用提供理论支撑。

2. 苔藓的水土保持功能及其研究进展

2.1. 苔藓水文特性

苔藓处于森林植被层与土壤层之间,是森林生态系统的重要组成部分,是林地水汽交换的重要界面。苔藓作为一种疏松多孔物质依靠其强大的表面能及其类似于海绵性状的弹性力特性不仅影响林地土壤的发育、水热通气状况、营养元素的循环及林地生物种群的类型及数量还具有明显的截持降水、消减动能、阻延径流、防止土壤强力冻结以及维系土壤结构的作用。本综述指的水文特性主要包括苔藓对水分的获取(截留、储存、持水)、排泄(蒸发、渗透、导水特性)和抗侵蚀性(削弱溅蚀能力)等。

在苔藓对水分获取能力(截留、储存、持水)方面。苔藓群落的立体结构具有强大的截留能力,单次降雨截留率可达 30%~80%(取决于盖度、厚度及物种特性),如泥炭藓(*Sphagnum*)的截留能力是裸地的 5~10 倍,可延缓雨水到达地表时间 30~60 分钟,显著降低雨滴击溅侵蚀。肖东和陵军成[11]在实验室条件下模拟测定了祁连山东段林区不同苔藓植物的最大蓄水率和晾晒后蓄水率的动态变化,发现该区共有苔藓植物 6 科、9 属、18 种,不同苔藓植物的厚度、贮量、最大蓄水率和晾晒后蓄水率动态变化不同,林下地表的苔藓厚度、贮量和最大蓄水率平均值均最高,树体表面的苔藓厚度、贮量和最大蓄水率平均值均居中,而生于岩石表面的苔藓厚度、贮量和最大蓄水率平均值均最低。赵海燕等[12]比较了不同植物(冰草、马尼拉草、耐旱苔藓)对黄土坡面的保护机制,发现苔藓水土保持能力优于其他植物,其原因在于:苔藓吸水能力远高于其他植物,其通过自身拦截和细胞吸水,储存大量水分,故能削弱雨滴溅蚀,保护土粒结构,且保护效果随覆盖度增大而增强,同时也能减缓土壤结皮形成速率,增加水分下渗量,从而起到对黄土坡面起到防护作用。陈甲瑞和王小兰[13]对色季拉山不同海拔高山松和急尖长苞冷杉群落林下苔藓的持水特性进行了研究,发现尖长苞冷杉林苔藓贮水量为 $13.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,最大持水率为 483.74%,最大持水量为 $67.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,均显著高于高山松林($P < 0.05$);其次,不同海拔高山松林苔藓层贮量和持水性能差异不显著($P > 0.05$),而不同海拔急尖长苞冷杉林苔藓层贮量和持水量差异显著($P < 0.05$),且随着海拔上升而逐渐下降;两种林型苔藓层的持水量随浸泡时间的变化规律基本一致,持水量与浸泡时间呈对数函数关系,而吸水速率与浸泡时间之间则按幂函数关系降。刘润等[14]对 4 种石漠化地区常见的苔藓美灰藓(*Eurohypnum leptothallum*)、小青藓(*Brachythecium perminusculum*)、双色真藓(*Bryum dichotomum*)和多疣细羽藓(*Cyrtohypnum pygmaeum*)的水土保持能力进行了对比,认为 4 种苔藓持水保水能力差异显著,其中,美灰藓的表现更为显著,其原因在于美灰藓生物量、饱和吸水率和抗冲刷能力均高于其他类苔藓,而蒸发速率则低于其他苔藓。王芝慧等[15]以川西亚高山针叶林区紫果云杉原始林、岷江冷杉原始林、方枝柏原始林等 8 种典型森林类型为研究对象,调查了木质残体及其附生苔藓持水能力,发现紫果云杉原始林木质残体附生苔藓饱和储水量最高,方枝柏原始林最低,木质残体饱和持水率和附生苔藓饱和储水量与腐解程度显著正相关;木质残体和附生苔藓的饱和储水量均随径级增大而升高,并认为林型和木质残体腐解程度及径级大小是决定亚高山针叶林区木质残体及其附生苔藓持水性能的关键因子。

此外,在温带和亚热带森林中,苔藓覆盖度通常达 40%~70%,尤其在针叶林(如冷杉林)和常绿阔叶林下层发育良好[16]。研究显示[17],苔藓植物在持水作用方面比枯落物贡献更大,其重量所占比重远大于枯落物的重量,是枯落物重量的 4 倍多,并且苔藓自身的吸水能力是枯落物近 2.7 倍。此外苔藓对森林水文循环的影响具有季节差异:雨季增强截留,减少洪峰;旱季释放储存水分,维持土壤湿度[18]。苔

藓群落的截留能力与其盖度、厚度密切相关[17]。例如,在温带森林中,地衣苔藓层可截留 15%~25%的年降水量,其中 60%~70%通过蒸发返回大气,30%~40%缓慢下渗至土壤[19]。喀斯特石漠化区坡地出露基岩间真藓属(*Bryum*)、美灰藓属(*Eurohypnum*)和羽藓属(*Thuidium*)3种优势苔藓属植物为研究对象,以裸土为参照对象,采用模拟降雨实验方法。实验得出,随着雨强增大,出露基岩间入渗率增加。总体上不同土层的入渗率大小依次为地表 > 壤中 > 地下。苔藓植物也具有抑制产流作用,坡度与产流呈负相关关系,而雨强则是面产流的主导因子[20]。在干旱区,苔藓结皮(如墙藓 *Tortula muralis* 群落)使表层土壤含水量提高 10%~15%,为种子萌发和幼苗生长提供微湿润环境[11]。

在苔藓对土壤水分排泄能力(渗透、蒸发、导水)影响方面。王莉等[21]探究了研究了结皮(地衣结皮和苔藓结皮)未受干扰和移除处理下的土壤水分入渗、蒸发及含水量状况,发现两种结皮均对土壤水分入渗具有抑制作用,移除两种结皮后土壤水分初渗速率、稳渗速率以及累积入渗量均显著增大($P < 0.05$),苔藓结皮对土壤日蒸发量的影响在前期表现为抑制,后期表现为促进,但对总蒸发量的影响不显著($P > 0.05$);蒋娟等[22]通过原状土冲刷试验研究发现,苔藓覆盖对喀斯特山地土壤剥蚀具有双重效应,5°坡地苔藓覆盖使饱和土壤剥蚀率较田间含水率土壤提升 33.9%,但在高含水条件下较裸土显著抑制剥蚀,低坡度效果更突出。苔藓盖度每增 1%,田间含水土壤剥蚀率线性降 0.5% ($R^2 > 0.995$)。5°坡面苔藓显著改变水流特征,可降低流速 20.6%、弗劳德数 28.6%,提升径流深 27.8%和阻力系数 117%,而 20°坡面参数无显著变化。郭迎香等[23]研究了冻融循环对生物结皮土壤饱和导水率(K_s)的影响,发现苔藓结皮与混合结皮(藻+苔藓)在冻融后均降低 K_s ,但苔藓结皮 K_s 显著高于混合结皮;相同冻融次数下,两种结皮 K_s 随初始含水率(8%,12%,16%)增加呈先增后减趋势;同一含水率下, K_s 随冻融次数(0,3,7次)递增。冻融 7 次后,初始含水率 8%时苔藓结皮 K_s 达混合结皮的 2.3 倍。冻融通过改变结皮层容重、厚度及下层土壤有机质和 >0.25 mm 团聚体含量调控 K_s : 冻融次数对结皮厚度、有机质影响极显著($P < 0.01$),对容重显著($P < 0.05$);初始含水率显著调控团聚体含量($P < 0.01$)。 K_s 与冻融次数呈极显著正相关($P < 0.01$),与容重呈极显著负相关,表明冻融通过结构重塑增强透水性,且苔藓结皮抗冻融结构稳定性优于混合结皮。

在苔藓对土壤抗侵蚀特性方面。苔藓的茎叶层如同柔性缓冲垫,可拦截 90%以上的降雨(尤其是小雨强事件),避免雨滴直接冲击土壤颗粒[24],如在亚热带红壤区,苔藓覆盖的坡地较裸露地溅蚀量减少 65%,径流含沙量降低 40%。对于暴雨事件,苔藓虽无法完全阻止径流,但能通过延缓径流速度(降低 20%~30%流速),促进泥沙沉积,减少沟蚀发生。

魏萧萧等[25]利用径流小区试验,采用聚丙烯酰胺(PAM)和苔藓为材料,分析在 3 种雨型下径流量与入渗量、含沙量与产沙量以及侵蚀泥沙机械组成的变化,发现 3 种雨型顺坡和梯田的径流量关系为对照 > PAM 与苔藓混合处理 > PAM 处理 > 苔藓处理,入渗量为苔藓处理的小区最大;PAM 处理的产沙量最少,顺坡长历时降雨条件下苔藓处理降低含沙量的效果更加明显;梅雨产沙主要以粘粒和粉粒为主,雷阵雨和台风雨产沙沙粒比例明显增加,PAM 与苔藓混合处理阻止园大颗粒土壤的流失最为有效。

2.2. 固持土壤与增强抗侵蚀能力

相较于苔藓的水文特性,关于苔藓固持土壤与增强抗侵蚀特性的研究相对较少。苔藓固持土壤与增强抗侵蚀能力的机理在于苔藓假根通过生长和发育作用与土壤颗粒形成网状空间结构,假根发挥其抗拉特性从而消耗一部分外荷载从而提高土壤强度和抗侵蚀性[12]。研究表明苔藓假根(或菌丝)深入土壤表层 0.5~2 cm,通过机械缠绕将土壤颗粒黏结成团聚体,使土壤抗剪强度提升 10%~30%。扫描电镜观察显示,砂质土壤中苔藓假根的固土效应可减少粒径 < 0.05 mm 颗粒的流失率达 50%。

赵海燕等[26]以兰州市榆中县夏官营古城的苔藓坡面为研究对象,通过直剪试验研究苔藓坡面的抗剪强度,发现苔藓覆盖度越大,其土样的内聚力显著增大,抗剪强度整体增大。此外,苔藓代谢活动分

泌的多糖、有机酸等物质可增强土壤颗粒间黏结力，同时促进微生物繁殖(如细菌数量增加 20%~30%)，使土壤有机质含量提升 20%~50%。

2.3. 生态协同：苔藓与其他植物的互作效应

苔藓与草本、灌木、乔木的互作机制呈现多层次资源竞争与功能协同的复杂性。在资源竞争维度，苔藓通过快速占据表层生态位形成物理屏障，显著降低草本种子接触土壤的概率，另一方面，在协同层面，苔藓层通过截持降水、调节地表蒸发及固持凋落物，改善表层土壤持水性与养分有效性，为草本和灌木根系提供稳定微生境[27]。其分泌物可促进菌根共生网络发育，增强乔木-灌木养分转运效率。乔木冠层遮荫则维持苔藓适宜湿度与光强阈值，而灌木枝干为附生苔藓提供物理支撑。总之，这种竞争-互惠关系通过水分-养分耦合循环机制[28]，共同维系群落生物地球化学过程的稳定性。

2.4. 脆弱生境的修复先锋

喀斯特地区土层浅薄、石漠化严重，苔藓能在岩石缝隙中生长，通过分泌有机酸溶解矿物质，促进土壤成土过程。贵州岩溶山区研究表明，苔藓覆盖的石旮旯地，土壤侵蚀量较裸露岩石减少 80%，且 0~10 cm 土层厚度每年增加 0.5~1 mm [29]。典型物种如紫萼藓(*Grimmia pulvinata*)和角苔(*Anthoceros* spp.)，其假根与岩石表面的生物膜共同形成抗侵蚀屏障。

亚热带红壤区降水集中、土壤黏重，易发生面蚀和沟蚀。苔藓(如金发藓 *Polytrichum commune*、地钱 *Marchantia polymorpha*)通过以下途径改善水土状况：(1) 覆盖地表减少雨滴击溅；(2) 分泌酸性物质溶解铁铝氧化物，促进土壤团聚体形成；(3) 增加表层土壤导水率，减少径流滞留时间。江西红壤丘陵试验显示，苔藓覆盖 3 年后，土壤侵蚀模数从 5000 t/(km²·a)降至 2000 t/(km²·a)，保水能力提高 18% [30]。

在荒漠和草原区，苔藓与地衣、蓝藻共同构成生物土壤结皮(biological soil crusts, BSCs)，占地表覆盖的 30%~70%。BSCs 中的苔藓(如齿肋赤藓 *Syntrichia caninervis*)通过机械固沙、水分截留，使风蚀量减少 40%~60%，同时提高表层土壤含水量 10%~20%，为草本植物(如针茅 *Stipa* spp.)提供生存微环境。在黄土高原地区，野外培育的生物结皮在无其他植被时可减少 26%的土壤侵蚀，与柠条混合时可减少 39%的土壤侵蚀[31]。

在公路、铁路边坡，苔藓(如砂藓 *Racomitrium canescens*)可通过喷播技术快速定植，形成致密覆盖层，减少人工植被建植初期的水土流失[32]。

3. 研究挑战与未来方向

3.1. 当前研究的不足

(1) 长期效应研究缺乏：多数研究集中于短期(1~3 年)观测，而苔藓群落演替对水土保持的长期影响(如 5~10 年)尚不明确，尤其在气候变化(降水格局改变、极端天气增多)下的响应机制需深入研究。

(2) 区域差异性认识不足：不同气候带(如热带、寒温带)、土壤类型(红壤、黑土、沙土)中苔藓的生态功能差异显著，现有研究多集中于亚热带和温带，对热带季风区、高海拔区的研究较少。

(3) 规模化应用技术瓶颈：苔藓人工繁殖难度大(孢子萌发率低、配子体生长缓慢)，且不同物种对基质、水分的需求差异大，制约了其在生态工程中的推广。

(4) 应用技术滞后：人工培育与规模化推广技术尚未成熟，限制了苔藓在工程实践中的应用

(5) 功能认知碎片化：多聚焦单一指标(成土量，吸水量，截留率等)，缺乏对“苔藓-土壤-水文”交互作用的系统解析。

(6) 区域适应性差异：湿润区与干旱区苔藓的水土保持效应差异显著，相关对比研究不足。

3.2. 未来研究方向

(1) 多尺度生态水文过程模拟：结合遥感、无人机和模型(如 SWAT、RUSLE)，量化苔藓覆盖度与流域产流、输沙的关系，为区域水土保持规划提供数据支持。

(2) 苔藓 - 微生物 - 植物互作机制：解析苔藓如何通过改变根际微环境(如 pH、养分、酶活性)影响土壤团聚体稳定性和水分传导，揭示其“生态工程师”的深层作用机理。

(3) 抗逆性物种筛选与繁殖技术：针对干旱、高侵蚀等恶劣环境，筛选耐旱、速生的苔藓物种(如砂藓、紫萼藓)，开发孢子悬浮液喷播、苔藓泥炭基质等高效繁殖技术，降低应用成本。

(4) 气候变化适应性研究：探究降水减少/增多、温度升高等情景下，苔藓群落结构变化对水土保持功能的影响，为气候变化应对提供科学依据。

4. 结论

苔藓植物虽看似微小，却在水土保持中扮演着“多功能调节器”的角色，通过固土、保水、改良微生境及促进植被协同，在自然生态系统和人工修复中展现出独特优势。尤其在脆弱生态区(如喀斯特、红壤、干旱区)，苔藓的先锋作用和生态效益不可替代。未来需加强基础研究与应用技术结合，推动苔藓从“被忽视的类群”转变为水土保持与生态修复的重要工具，为全球荒漠化防治、气候变化适应提供新路径。

基金项目

省级大学生创新创业计划项目(项目编号：S202410720130)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023: 42.
- [2] 许文盛, 张文杰, 张志华, 等. 中国城市水土保持研究进展与发展趋势[J]. 中国水土保持科学, 2025(2): 1-8.
- [3] 陈芳, 朱高洪, 毛志锋. 我国水土流失的经济损失评估[J]. 中国水土保持, 2008(12): 11-13+72.
- [4] 袁水龙, 张扬, 陈田庆. 陕北地区县域水土流失经济损失价值研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2017, 2(11): 6-13.
- [5] 李海红. 浅议水土流失的治理模式[J]. 建筑工程技术与设计, 2019(7): 3867.
- [6] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [7] 季永兴, 刘水芹, 张勇. 城市河道整治中生态型护坡结构探讨[J]. 水土保持研究, 2001(4): 25-28.
- [8] 张可, 黄雪云. 深汕外国语学校护坡工程水土流失危害及治理措施分析[J]. 陕西水利, 2025(4): 104-107.
- [9] 朱瑞良, 马晓英, 曹畅, 等. 中国苔藓植物多样性研究进展[J]. 生物多样性, 2022, 30(7): 86-97.
- [10] 王春. 秦岭北麓石生苔藓结皮的发育特征及形成机制[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023
- [11] 肖东, 陵军成. 祁连山东段林区苔藓植物资源调查及蓄水能力模拟测定[J]. 林业科技通讯, 2021(2): 34-37.
- [12] 赵海燕, 谌文武, 殷坤龙, 等. 黄土高原耐旱苔藓护坡机制试验研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 162-168.
- [13] 陈甲瑞, 王小兰. 色季拉山东坡不同海拔两种针叶林下苔藓层持水特性[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(6): 593-600.
- [14] 刘润, 申家琛, 张朝晖. 4 种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 141-148.
- [15] 王芝慧, 黎静好, 白义, 等. 川西亚高山森林木质残体及其附生苔藓持水特性[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6552-6565.
- [16] 苏晓. 宝天曼温带落叶阔叶林树生苔藓植物多样性及其空间分布[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- [17] 叶吉, 郝占庆, 姜萍. 长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程[J]. 生态学报, 2004(12): 2859-2862.

- [18] 范金花, 谢汶天, 曹球铤, 等. 川西亚高山森林苔藓与枯落物持水特征[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 1-13.
- [19] 曹建华, 袁道先. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持水性及生态意义[J]. 地球化学, 1999(3): 248-256.
- [20] 涂娜. 苔藓植物对石漠化坡地出露基岩间产流的影响[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [21] 王莉, 秦树高, 张宇清, 等. 生物土壤结皮对毛乌素沙地油蒿群落土壤水分的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 48-56.
- [22] 蒋娟, 曾昊, 刘冬冬, 等. 苔藓覆盖对喀斯特林地碳酸盐岩红土剥蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 92-98+105.
- [23] 郭迎香, 马波, 曾建辉, 等. 冻融交替对不同生物结皮土壤饱和和导水率的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 324-332.
- [24] 秦宁强. 黄土丘陵区生物土壤结皮对降雨侵蚀力的响应及影响[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
- [25] 魏萧萧, 兰思仁, 黄炎和, 等. 聚丙烯酰胺与苔藓对幼龄锥栗园土壤侵蚀的影响[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(2): 97-102.
- [26] 赵海燕, 郭荣慧, 段宇涛, 等. 苔藓植物护坡及固土作用试验研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 364-368.
- [27] 杨学成. 粤东亚热带森林苔藓植物的生境关联与指示作用[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 201
- [28] 任青青. 喀斯特石生苔藓植物功能性状与其生境的互作机制[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2020
- [29] 余春娅. 贵州喀斯特石漠化区苔藓结皮斑块对下覆土壤性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2023.
- [30] 张啸天. 苔藓植物对酸性恶劣土壤环境的适应性研究[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(5): 18-19+109.
- [31] 苏春丽, 许文文, 刘屹泽, 等. 生物土壤结皮在沙区草本植物恢复中的作用综述[J]. 甘肃林业科技, 2025, 50(1): 1-9+31.
- [32] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 1-315.