

山地灾害治理中生物工程存在的问题

王道杰¹, 陈吕容², 周 麟¹, 崔 鹏¹, 朱 波¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 生物工程在山地灾害治理中具有悠久的历史 and 重要的作用, 然而由于多种原因, 其理论研究和应用技术却远落后于工程实践。根据生物工程的原理及其特点, 对其在山地灾害治理中的应用和研究现状进行了剖析, 存在的主要问题为: 生物工程在山地灾害治理中的应用范围不确定, 工程设计和效益评估的标准不完善, 植物根系研究的手段和设备有待改进, 植物根系的“定向培育”开展的研究工作很少, 植物枯枝落叶层的防灾、减灾作用研究不全面等。提出了生物工程在山地灾害治理中的主要研究方向, 以期完善和发展生物工程在山地灾害治理中的理论研究和应用技术服务。

关键词: 生物工程; 山地灾害; 治理; 主要问题

中图分类号: X43, X171. 4

文献标识码: A

山地灾害是山地环境在演化过程中伴生的, 或人类不合理经济活动激发的, 给人类生产生活带来不利影响的自然、人为事件的总称^[1]。我国山地面积占国土总面积 2/3 以上, 每年发生不同程度的山地灾害, 不仅对山区各项建设和人们的生产、生活带来极大的经济损失和惨重的人员伤亡, 而且促进生态环境进一步恶化, 形成恶性循环。据初步统计^[2], 我国每年丧生于泥石流、滑坡和山洪达 800~ 1 500 人, 经济损失约为 20~ 30 亿元。

近几十年, 我国在山区开展了大量的泥石流、滑坡和水土流失的综合治理, 积累了较为丰富的山地灾害治理经验, 并取得了巨大的社会、经济、生态效益。山地灾害治理工程可分为土木工程及生物工程两大类, 两类工程相辅相成、扬长避短, 共同构成山地灾害综合治理体系, 实现山地灾害治理的近期及长期目标。可见, 生物工程是山地灾害综合治理重要措施之一, 然而, 就基础理论和应用技术研究而论, 其认识深度和受重视程度远没达到应有的高度, 造成理论认识远远落后于社会需求的被动局面。

1 生物工程的原理及其特点

世界著名生物工程学家雨果·希斯特 (Hugo Schiechl) 1980 年对生物工程作了如下定义: “生物工程就是用植物作为工程材料”^[3]。这里所说的植物既包括活的植物、又包括死的植物。这一定义过于抽象、泛化, 其一, 若没有生命的植物材料工程属生物工程范畴, 则有悖于生物工程具有生长、更新和永续利用这一特点, 因此, 应属土木工程的范围; 其二, 生物工程的作用、目的不够明确。1996 年, 乔治 (George R. W.) 对生物工程概念做出了新发展, 定义为“用活的植物、单独用植物或者植物与土木工程和非生命的植物材料相结合, 以减轻坡面的不稳定性 and 侵蚀”^[4]。该定义对生物工程的表达较为具体、精确, 将生物工程的结构、内容和目的都概括作了说明。

随着对生物工程的进一步研究和认识, 部分学者将其定义简明地表达为“利用生物与其环境相互作用的特性达到抑制、消除灾害, 促使环境可持续发

收稿日期 (Received date): 2004- 01- 11; 改回日期 (Accepted): 2004- 04- 11。

基金项目 (Foundation item): (基金项目 (Foundation item): 本研究得到中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-330)、(KSCX-07-01-04) 及国家自然科学基金重点项目 (项目编号: 49831010) 的共同资助。[Supported by the knowledge innovation project of Chinese Academy of Science (ID: KZCX2-SW-319, ID: KSCX-07-01-04) and national natural science foundation key project (ID: 49831010).]

作者简介 (Biography): 王道杰 (1968-), 男 (汉族), 四川成都人, 硕士, 助研。主要从事土壤生态、植被恢复等研究工作。[WANG Daojie (1968-), male (Han), born in Chengdu, Sichuan Province, assistant Prof. Mainly study on soil ecology and vegetation restoration.]

展的目的”。其基本原理为: (1) 利用植物群落多物种多层次的整体效应对雨水层层截留, 植被枯枝落叶对土壤的保护和对雨水的吸收, 减少雨水对土壤的溅蚀, 延缓洪水汇集时间, 从而削减灾害的水动力条件; (2) 利用植物枯枝落叶及死亡根系分解形成的有机质改善土壤结构, 提高土壤的抗冲性及抗蚀性; (3) 利用植物根系在土壤中形成的网络结构固持松散土壤, 增强土壤的抗拉、抗剪能力。

生物工程的特点表现为: 具有自我修复和持久作用及低能耗、低物耗、费用-效益综合优势、环境兼容性等, 当生物工程与土木工程联合使用时, 两者能够相互加强、相互补充。最突出的特点是具有生物生态学属性, 其结构在土体不稳定时可以调整自身状况来适应土体的变化, 维持较高的控制能力, 持续发挥抗蚀护坡的工程潜能。

2 生物工程的应用和研究

山地灾害生物工程应用和研究是整个灾害学科研究的重要组成部分, 生物工程防治措施是抑制山地灾害发生、发展最重要的措施之一。事实上, 山地灾害生物工程措施的应用、研究是伴随着整个山地灾害学科的产生、发展而展开的。在山地灾害研究、防治早期阶段, 人们就已认识到了它的巨大作用, 并常与工程措施结合治理山地灾害。

2.1 应用现状

据资料^[5], 生物工程最早应用出现在我国。早在 1591 年, 柳属(*Salix*) 的两种植物已被用于河岸边坡的加固与保护; 17 世纪, 利用生物工程技术保护黄河河岸; 20 世纪 50 年代初^[6], 主要用于水土保持和防风固沙; 从 20 世纪 70 年代开始, 我国陆续开展了三北、长江中上游、太行山等生物工程防护体系; 近几年, 相继开展了“长治工程”、“天保工程”、“退耕还林还草工程”等生物工程, 为我国山地灾害治理和环境修复起到了重要的作用。

国外生物工程应用也很多。1989 年, 美国伊利诺斯州自然保护与规划部门在鸦河流域西段(Crow Creek West) 对河岸和附近山地构建多类型、多层次的植物群落^[7], 对频繁发生的滑坡和严重的土壤侵蚀起到了有效的治理作用。1992 年, 美国休斯敦市有关部门对 Buffalo 河湾施行了生物工程保护和加固工程^[8], 使 Buffalo 河湾建成一个稳定、自我维持和发育良好的乔灌木河岸保护系统。在英国约克郡戴尔斯国家公园三峰地区(Three Peaks)^[9], 20 世纪

80 年代以来, 到此游览的人越来越多, 从前与外界隔绝的林地草地不同程度地遭到破坏, 缓坡地带被行人践踏出许多裸地, 被车辆压出许多车辙和坑洼。当地自然保护部门采取了包括生物工程在内的治理措施, 使植被覆盖从治理前的 50% 增加到 95%, 完全控制住了正在发展的土壤侵蚀, 而且改善了环境, 美化了山林。加勒比地区圣拉西亚岛西海岸公路(West Coast Road)^[10] 由于严重的侵蚀现象, 公路频繁阻断, 沿途建筑受到破坏。从 1991 年开始, 西海岸公路管理部门会同英国自然资源研究院, 利用一批适合该生物工程项目的乔、灌、草植物种类, 通过活枝捆栽种、竹木扦插、乔木和草本植物种子直播等技术, 建立了公路沿线保护体系, 同时加强抚育天然植被, 辅以工程措施, 使西海岸公路的侵蚀得到控制。该项目为加勒比地区生物工程技术融入道路工程建设创造了良好的范例。

2.2 研究现状

生物工程的研究伴随其应用而产生, 经历“应用→研究→再应用→再研究”的循环过程。在国内, 刘向东、吴钦孝等对森林植被的水文效应及减沙效益的作了研究^[11,12], 中国科学院成都山地灾害与环境研究所分析了黑沙河流域生物工程措施综合防治效益^[13], 刘文耀等对云南南涧县城后山泥石流生态工程治理及其效益^[14]、云南松林的枯枝落叶层持水效应^[15]及生物生态工程的环境适宜性与应用前景等方面作了研究^[16]; 周跃等研究了高山峡谷区云南松林土壤侵蚀控制的水文效应^[17]; 张信宝等对半干旱区植被恢复与岩土性质^[18]及微水造林建设攀枝花市视野区常绿森林植被等方面进行了研究^[19]; 张建辉等研究了云南元谋干热河谷造林区植被生长与土壤渗透性的关系^[20]; 周麟对云南元谋干热河谷植被恢复技术进行探索性研究^[21]; 杨忠对元谋干热河谷水土保持营造技术进行了总结^[22]。这些研究从不同的角度阐明了生物工程的治理效益和治理技术, 对丰富山地灾害生物工程治理的理论基础具有重要的作用, 但都存在不同层次的局限性。

国外, 原苏联在 19 世纪中、下叶对山地灾害生物工程研究中表明^[23], 森林土壤改良措施是一种基本而长期的坡地泥石流(有时亦是河床泥石流)防治措施, 它包括在山坡全部或部分造林、人工梯田造林和河床造林以及营造农田防护林。杰蒙兹(1891)在他的《山坡造林》著作中提出了泥石流防治的生物工程措施, 同期, . . 科罗利科夫和 . III. 劳涅尔对阿曼库坦河和阿克塔什河两个流域的山坡采取了先

梯田化后造林的措施,取得了良好的防治效果。1980年,世界著名生物工程学家雨果·希斯特(Hugo Schiechl)所著的《土地开发与保护的生物工程》^[3]是世界上有关生物工程的第一部专著,成为欧洲生物工程界的代表作;《斜坡保护的生物技术与侵蚀控制》是另一部有关美国应用方法的专著;《植物在土木和景观工程中的应用》一书标志着英国在该领域更新的发展^[24]。

3 生物工程应用、研究中存在的问题

生物工程虽已在山地灾害治理中得到了迅速的发展和广泛的应用,人们也从应用中总结出丰富的经验,但到目前为止,它还基本上处于定性的和经验的发展阶段^[25,26]。笔者认为生物工程在山地灾害治理中最大的问题是生物工程的设计与山地灾害的灾种特性联系性不强。换句话说,人们在滑坡、泥石流等突发性灾种的生物治理过程中,大多参照林业、牧业、农业等生物工程技术,没有形成对滑坡、泥石流等灾种的起动机制、力学性质进行针对性的生物工程设计技术、规范章程;其次,对山地灾害生物工程的治理效果不能用精确的科学理论依据进行定量评价,使生物工程的结果缺乏可测性和推广应用的可靠性,其具体问题可表述为以下几个方面:

3.1 在山地灾害治理中应用范围的不确定性

生物工程因其生物学特性在植被发育带之上的冰碛带、在无土层(基岩裸露)汇流区或坡度极陡的“光板地”等植物生存条件极差或几乎不能定居的区域,生物工程措施受到极大限制^[23],这一观点得到学术界的普遍认可。但在针对具体的灾种,如在滑坡体上种植植物,特别是种植高大的乔木树种,目前学术界存在着两种不同的观点^[2]。一种认为:乔木树种重量大,在滑坡体上栽植会加重滑坡体的重量,易促进滑坡体的活动,因此反对在滑坡体上种植乔木树种。另一种认为:乔木树种,尤其是深根性树种能穿过滑坡体的滑动层,起着固定滑坡体的良好作用,所以提倡在滑坡体上栽种乔木树种,尤其是深根性树种。部分学者^[2]为了折中这两种观点,简单地以浅层滑坡(滑动面在3~4 m以内)可种植深根性树种,而对于深层滑坡(滑动面在5 m以上)不宜种植为好。笔者认为,即使在深层滑坡体上,由于其可能存在不同深度的多个滑动面,深根性乔木一方面利用根系网络将不同深度滑动面的松散土层固定为一体,另一方面通过强大的根系向地表输送大量的

水分进行蒸腾以减轻滑坡体的重量。据张信宝^[27]的研究,深根性乔木的根系深度可达17 m以上,地下水层通过毛管水补给高度可达10 m,即根系可对地下27 m范围内的土壤水分进行吸收、利用和蒸腾。又如,黄桷树(*Ficus spp.*)的根系可达30 m以上^[2],即其根系至少可对地下40 m范围内的土壤水分进行吸收和蒸腾。因此,在滑坡体上能否种植植物及种植何种植物品种、群落结构,不能以抽象推论进行判断,应开展不同类型的对比试验以及对试验结果进行检验,以滑坡体的稳定系数是否提高及提高的程度作为依据。

3.2 在山地灾害治理中参考的理论依据不健全

在生物工程植物种类的选择中,除应遵循生物最基本的“适地适种”原则外,在灾害治理中另一重要原则就是“定向原则”,即应解决灾害中的核心问题。如植物根系对山地灾害治理具有重要的作用,因此物种选择时要求植物为深根性或根系发达,但目前对山地灾害治理中植物根系分布深度、范围及抗剪强度等方面的研究还很少。在物种配置及群落构建时,通常采用“乔、灌、草”不同层次的组合或“宜林则林,宜草则草”的原则,同样很少对这些组合类型、构建模式的利弊进行研究和评价。在植物株行距设计时,大多依据植物地上部分的生长状况而设计,没有参考植物根系的分布范围及治理的最佳效果。在植被带的走向设计时,主要依据地貌和主风方向而没有与滑坡、泥石流等灾害的起动机理和力学机制结合。

3.3 在山地灾害治理效益评估中存在的问题

山地灾害生物工程治理效益评估同其他生物工程效益评估一样,通常以植被覆盖率的提高、泥沙流失的减少、经济效益及社会效益的增加等作为评估依据。然而,山地灾害生物工程有其特殊的治理目的,因此其治理效果评估应有独自的特色。以生物工程对滑坡等不稳定土体的治理为例,生物工程的主要作用是利用树冠蒸腾滑坡体中大量的水分以降低滑动面土层的含水量和减轻不稳定土体的重量,同时利用强大的根系网络固定不稳定土体,其最终目的是提高不稳定土体的稳定性,因此,其治理效益评估中应突出其对不稳定土体水分蒸发量及固结力,以稳定系数的提高作为重要的评价指标。

3.4 在山地灾害治理研究中存在的问题

正如前面所述,人们对山地灾害治理中生物工程的理论研究,认识还远落后于其实践应用。主要原因是,其理论研究涉及到诸多学科,如灾害学、生

态学、植物学、林学、农学、草原学、水土保持学、水文学、气象学、土壤学、力学及化学等,这些相邻学科的发展进程制约着山地灾害生物工程理论研究的进展。目前,人们对山地灾害治理中生物工程作用的研究,特别是定量的研究,还不足以从理论上支持这一生物学途径,不能用严密的科学理论来定量描述生物工程的原理,研究中存在的主要问题可归纳为以下几个方面。

3.4.1 植物根系防治机理研究的技术手段不高

由于植物根系分布在地下,常规的研究技术、手段很难对其作用机理进行准确的研究。李勇^[28]在“黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性”研究中,提出有效根密度是表征植物根系强化土壤抗冲性的重要指标。有效根密度是指土壤截面单位面积上 $\leq 1\text{ mm}$ 须根的个数,测定方法为大型挖掘剖面壁法^[29]。但须根很小且脆弱,用挖掘法会损失许多须根,最后估算的结果必然偏小^[30]。另一方面,对根系密度进行调查时,肉眼对细小的根很难识别,Fogel(1983)^[31]用辐射松(*Pinus radiata*)在7倍放大镜下手捡细根同湿筛法测定细根相比较,结果表明,湿筛法测得的细根比手捡多36%。可以推论,野外对细根密度调查具有很大误差,而不同品种的植物细根类型不一样,这种误差必然导致对不同品种植物提高土壤抗冲性能进行比较时产生错误的结论。刘跃明^[32]在云南松根系对土壤机械效应的测试研究中,利用自制测试系统测定根系对土壤机械效应。但该测试系统不能做到对侧根牵引效应实时分析,测试过程不能记录根系对土壤牵引效应的渐变过程;而且,由于野外测试受多种参数的影响,开展研究困难较大,对进一步描述根系与土壤相互作用的牵引效应带来一定的困难,在一定程度上制约了研究成果的应用。

目前,对根系的研究主要集中在表土层的水平根、侧根和须根,对于植物的主根,特别是深根系高大乔木的主根分布状况及对不稳定土体的锚固作用,国内外研究报道很少,更未见较理想的研究技术、手段。笔者认为,利用滑坡勘探方法中的物探来研究深根性主根的分布状况是较理想的方法。其基本原理是根据土、石、根系的弹性性质不同,通过人工激发产生的弹性波在土(岩)层内传播来探测根系的分布垂直深度、水平幅度。如果可能,利用物探原理,通过改进后的测试仪器直接测定根系对不稳定土体稳定系数的变化,从而使生物工程的防治机理以定量、科学、精确的描述。

3.4.2 生物工程植物根系“定向培育”研究少

植物根系“定向培育”是指通过人为措施使植物根系沿着有利于人类某种目的的方向生长。“定向培育”在农业措施中应用很广,如在果树的管理中,通过对树枝的修剪、整形,使果树达到高产、稳产的目的;又如种植红薯等块茎类作物时,通过摘藤等技术方法控制地上部分生长,从而促进地下根茎生长达到高产目的。而现实中,植物根系“定向培育”应用于灾害治理的研究未见报道。植物根系在山地灾害治理中具有重要的作用,但不同类型的根系及不同方向的根系在灾害治理中的作用不同。以滑坡等不稳定土体为例,植物的主根及不稳定土体滑动方向的水平根、侧根对提高土体稳定性的作用最大。笔者认为,可以通过对根系、树枝进行修剪,对树冠进行整形,施用生长素进行调节,在不同深度及方向的土层追施有利于根系生长的化肥等技术措施,促进植物主根及不稳定土体滑动方向的水平根、须根的“定向生长”,提高生物工程的治理效果。

3.4.3 枯枝落叶层的防灾、减灾作用研究不全面

植物枯枝落叶层在山地灾害治理中具有重要的作用。枯枝落叶层每年向土壤提供大量的有机质以改善土壤结构,提高土壤的抗冲性及抗蚀性。据研究,四川西部高山冷杉林(成熟林),每公顷年凋落物量为 $1.05\sim 3.01\text{ t}$ ^[33];滇中常绿阔叶林及云南松林枯落物营养元素含量及贮量也十分丰富^[34]。同时,枯枝落叶覆盖地表,不仅防止雨滴击蚀和地表结皮的形成,而且吸收、过滤径流和泥沙,具有很好的蓄水特性,减少了泥沙流失和地表径流。

笔者认为,植物枯枝落叶层在特定的环境中会出现“增加地表径流”的现象。这种特定的环境可能为:(1)当降雨强度较大时,枯枝落叶层迅速吸水达到饱和,瞬时出现“超渗产流”;(2)有些树种,如日本落叶松、栎类等,常常在根系外面共生菌根,这些菌根的遗体在枯枝落叶层下逐年积累,形成枯枝落叶、土壤菌丝网层,这种网层具有斥水性,妨碍雨水入渗,增大地表径流;(3)一些阔叶林叶片角质层厚,叶片硬而宽大,落叶层层紧密地堆积在地表,阻碍雨水下渗。迄今为止,有关枯枝落叶层“增加地表径流”的研究报道很少,许多学者易忽视这一现象,但这一现象对滑坡等不稳定土体的治理具有重要的作用,因为在雨季,特别是暴雨时,枯枝落叶层这种功能对减少雨水入渗、抑制不稳定土体重量增加及土壤液化、提高土体的稳定系数具有重要意义。

4 小结与讨论

山地灾害生物工程治理具有悠久的历史, 但其理论研究却较为“年青”, 相对土木工程治理而言, 无论其防灾、减灾的机理, 还是其工程设计、效益评估的理论依据都还很不完善, 作为灾害学的重要内容之一, 这对灾害学的全面发展和完善是一件令人遗憾的事。今后的研究工作应突出山地灾害生物工程治理的“定向原则”, 控制山地灾害发生的固体物质来源和水动力诱发因素, 主要开展以下研究内容:

1. 具有“特种生态功能”的植物引种试验, 研究其抗逆性, 根系分布范围、生长特性、固土性能及吸水能力, 叶片功能, 为生物工程的规划设计提供理论依据。
2. 林冠截留降水及蒸发、蒸腾效应研究, 以此为依据, 推论其对土体水分补给的正负效应, 研究土体重量变化规律。
3. 研究枯枝落叶层的持水性及向土壤的输水性能, 推论出现“超渗产流”所需的降雨强度, 研究其在暴雨条件下妨碍雨水入渗, 抑制土体液化, 提高土体的稳定性能。
4. 研究土体力学性质的变化规律, 为土体稳定性分析提供依据。

参考文献(References):

- [1] Zhong Dunlun, Wang Chenghua. Mountain hazards study in IMHE [J]. *Mountain research*, 1996, 14(2): 71~ 77. [钟敦伦, 王成华. 成都山地所山地灾害研究[J]. 山地研究(现山地学报), 1996, 14(2): 71~ 77.]
- [2] Wu Jishan, Wang Chenghua, Cheng Zhunlan, et al. The prevention engineering of mountain hazards in China [M]. Chengdu: Sichuan Science Technology Press, 1997, 1~ 210. [吴积善, 王成华, 程尊兰, 等. 中国山地灾害防治工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1997, 1~ 210.]
- [3] Hugo schiechl. Bioengineering for land reclamation and conservation [M]. The University of Alberta Press, 1980, 1~ 10.
- [4] George R. W. Bioengineering training programme for road engineers [M]. 1996, 7~ 12.
- [5] Lee, I. W. Y. A review of vegetative slope stabilization [J]. *Hong Kong Inst. of Engineer*, 1985, 13(7): 9~ 12.
- [6] Zhou Yue. Effects of the Yunnan Pine (*Pinus yunnanensis* French) on Soil Erosion Control and Soil reinforcement in the Hutiaoxia Gorge, Southwest China. Ph. D. thesis, University of Hull [D]. March 1997.
- [7] Sotir, R. B. Soil bioengineering experiences in North America [A]. In: Barker, D. H (1995) *Vegetation and Slopes Stabilization, protection and ecology* [C]. Thomas Telford. 1995. 190~ 201.
- [8] Collison, A. Impact of vegetation on slope stability in a humid tropical environment: a modeling approach [A]. In: Fullalove S. (ed.) *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Energy* [C]. Thomas Telford, London. 1995. 168~ 175.
- [9] Roes, S. J. C. The Three Peaks Project: tackling foot path erosion [A]. In: *Erosion Know No Boundaries*, International Erosion Control Association, Steamboat Springs, 1989. 371~ 379.
- [10] Brow, F. and Clark, J. The West Coast Road in St Lucia, an approach to slope stabilization [A]. In: Barker, D. H *Vegetation and Slopes Stabilization, protection and ecology* [C]. Thomas Telford, 1995. 172~ 183.
- [11] Liu Xiangdong. Studies on rainfall interception in canopy, litter and soil hydrological characteristics of forests in Liupanshan mountains [J]. *Scientia Silvae Ainnicae*, 1989, 25(3): 220~ 227. [刘向东. 六盘山林区森林树冠截留, 枯叶落叶层和土壤水文性质研究[J]. 林业科学, 1989, 25(3): 220~ 227.]
- [12] Wu Qinxiao. The direction and study on the water and soil conservation function of vegetation in the loess plateau [M]. Xian: Shanxi People Press, 1995. [吴钦孝. 黄土高原植被保持水土功能和机理研究及趋势. 见: 土壤侵蚀环境调控与农业持续发展 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 1995.]
- [13] Wu Jishan, Tian Lianquan, Kang Zhicheng. Synthetic prevention of debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1993. 257~ 258. [吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. 257~ 258.]
- [14] Liu Wenyao, Liu Lunhui, Qiu Xuezhong, et al. Bio-ecological engineering prevention and control of debris flow of Houshan by Nanjian County Town, Yunan [J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(2): 136~ 140. [刘文耀, 刘伦辉, 邱学忠, 等. 泥石流生物工程治理及其效益[J]. 山地学报, 1999, 17(2): 136~ 140.]
- [15] Liu Wenyao, Zheng Zheng. Preliminary study on the water and soil conservation function of the litter of the PINUS YUNNAN-ANNENSIS forest [J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1990, 14(2): 191~ 196. [刘文耀, 郑征. 云南松林的枯枝落叶层持水效应初探[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1990, 14(2): 191~ 196.]
- [16] Liu Wenyao, Liu Lunhui, Sheng Caiyu. Adaptability and application of bio-ecological engineering for controlling debris flow [J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(4): 358~ 362. [刘文耀, 刘伦辉, 盛才余. 生物生态工程的环境适宜性与应用前景[J]. 山地学报, 1999, 17(4): 358~ 362.]
- [17] Zhou Yue, David Watts. Hydrological effect of PINUS YUNNAN-ANNENSIS forest on soil erosion control in the alpine gorge region [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3): 31~ 38. [周跃, David Watts. 高山峡谷区云南松林土壤侵蚀控制的水文效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 31~ 38.]
- [18] Zhang Xinbao, An Zhisheng, Cheng Yude. Re-vegetation and lithological composition in semiarid regions [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53, Supplement: 134~ 140. [张信宝, 安芷生, 陈玉德. 半干旱区植被恢复与岩土性质[J]. 地理学报, 1998, 53, Supp.: 134~ 140.]
- [19] Zhang Xinbao, Yang Zhong, Wen Anbang. Micro-water harvesting technique to establish ever-green forests in the view area from Panzhihu city urban [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4). [张信宝, 杨忠, 文安邦. 微水造林, 建设攀

- 枝花市视野区常绿森林植被[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4):.]
- [20] Zhang Jianhau, Li Yong, Yang Zhong. Relationship of vegetation growth to soil infiltration in the Yuanmou dry-hot valley, Yunnan province[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(1): 25~28. [张建辉, 李勇, 杨忠. 云南元谋干热河谷造林区植被生长与土壤渗透性的关系[J]. 山地学报, 2001, 19(1): 25~28.]
- [21] Zhou Lin. Initial study on vegetation rehabilitation in Yuanmou dry-hot valley[J]. *Acta Bot. Boreal. Occident. Sin.*, 1998, 18(3): 450~456. [周麟. 云南元谋干热河谷植被恢复初探[J]. 西北植物学报, 1998, 18(3): 450~456.]
- [22] Yang Zhong, Zhuang Zei, Qin Dingyi. Afforestation techniques for water conservation in arid-hot valleys of Yuanmou county[J]. *BULLETIN OF SOIL AND WATER CONSERVATION*, 1999, 19(1): 38~42. [杨忠, 庄泽, 秦定懿, 等. 元谋干热河谷水土保持营造技术研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 38~42.]
- [23] C. M. feimnaH. Cem[M]. Beijing: Science Press, 1986. 267~276. [[苏] C. M. 弗莱施曼. 泥石流[M]. 姚德基译. 北京: 科学出版社, 1986. 267~276.]
- [24] Zhou Yue, David Watts. Slope eco-engineering and its current developing stat[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(5): 68~73. [周跃, David Watts. 坡面生态工程及其发展现状[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 68~73.]
- [25] Coppin, N. J., Richards I. G. Use of Vegetation in Civil Engineering[M]. CIRIA, Butterworths. 1990.
- [26] Morgan, R. P. C., Rickson, R. J. Slope Stabilization and Erosion Control ——Bioengineering Approach [M]. E and FNSPON, London, 1995.
- [27] Zhang Xinbao, An Zhisheng. Relationship between forests and loess thickness in the loess plateau region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(6): 1~4. [张信宝, 安芷生. 黄土高原地区森林与黄土厚度的关系[J]. 水土保持通报, 1994, 14(6): 1~4.]
- [28] Li Yong, Zhu Xianmo, Tian Jiyong. Effect of improved soil anti-scourability by vegetable roots in the loess plateau[J]. *Bulletin Science*, 1991, (12): 935~938. [李勇, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991, (12): 935~938.]
- [29] Bohm, W. Methods of studying root systems[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1979.
- [30] Shan Jianping, Tao Dali. Overseas researches on tree fine root[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1992, 11(4): 46~49. [单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态[J]. 生态学杂志, 1992, 11(4): 46~49.]
- [31] Fogel, R. Root turnover and productivity of coniferous forests[J]. *Plant and Soil*. 1983, 71, 75~85.
- [32] Liu Yueming, Zhang Yunwei, Zhou Yue. Design and realization of the test system on mechanical effect of Yunnan Pine root and soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 220(4): 476~479. [刘跃明, 张云伟, 周跃. 云南松根系对土壤牵引效应测试系统的设计与实现[J]. 山地学报, 2002, 220(4): 476~479.]
- [33] Wang Zhiguo, Zhang Yunnong, Liu Xishi *et al.* Forest ecological engineering[M]. Beijing: Chinese Forest Press, 2000, 54~57. [王治国, 张云龙, 刘徐师, 等. 林业生态工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000, 54~57.]
- [34] Liu Wenyao, Jing Guifei, Zheng Zheng. A preliminary study on the litter-fall in evergreen broad-leaved forest and Pinus Yunnanensis forest in the middle of Yunnan Province[J]. *Guihaia*, 1989, 9(4): 347~355. [刘文耀, 荆贵芬, 郑征. 滇中常绿阔叶林及云南松林枯落物的初步研究[J]. 广西植物, 1989, 9(4): 347~355.]

Problems of Bio-engineering in the Prevention of Mountain Hazards

WANG Daojie¹, CHEN Lurong², ZHOU Lin¹, CUI Peng¹, ZHU Bo¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences

& Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Panzhihua University, Panzhihua Sichuan 617000, China.)

Abstract: The bio-engineering has long history and important effects on the prevention of mountain hazards. But the theoretical research and application technology lagged behind. In this paper, some key problems are put forward based on principles and characteristics of bio-engineering: (1) the applied area of bio-engineering is not certain; (2) the criterions of design and evaluation of bio-engineering prevention are not perfect; (3) the measures and apparatuses of study on vegetable roots need to be improved; (4) the studies on directional growth of vegetable roots are very few; (5) the studies on effects of forest litter are limited. According to these problems, the corresponding research projects are put forward in order to develop the theory of bio-engineering in mountain hazards preventions.

Key words: bio-engineering; mountain hazards; prevention; key problems