

岷江干旱河谷-山地森林交错带震后生态恢复 的关键科学技术问题

刘 彬, 吴福忠, 张 健, 杨万勤*

(四川农业大学林学院, 四川 雅安 625014)

摘要:作为典型的生态过渡区,岷江干旱河谷-山地森林交错带不仅是藏羌居民生活的重要区域,而且在抑制干旱河谷上延和延伸亚高山森林生态系统的功能等方面具有十分重要的作用。但这种脆弱生态系统极易受到人类活动干扰和自然灾害的损害,使其成为“5.12”汶川大地震中受损程度较高、灾后生态恢复与重建的重点区域之一。基于岷江干旱河谷-山地森林交错带受汶川大地震破坏的特点以及该区的生态重要性和本身的脆弱性,损毁生态系统的快速评估与生态重建规划、生产与生态双赢共建关键技术、震后残存植被保育、水源涵养地植被保护与恢复、震毁植被恢复与重建、耕地生产恢复与重建、边坡综合治理、低效薪炭林改良以及居民聚居点风景林营造等被认为是震后生态恢复的关键科学技术问题。震毁生态系统的生态恢复过程监测与评估、干旱河谷-山地森林交错带生态系统的脆弱性机制及生态学过程、震后生态系统对变化环境的响应与适应机制等可能是未来的重点研究领域。

关键词:干旱河谷-山地森林交错带;汶川地震;震毁生态系统;生态恢复;科学技术问题

文章编号:1000-0933(2008)12-5892-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Key issues in restoration on earthquake-damaged ecosystem at the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River

LIU Bin, WU Fu-Zhong, ZHANG Jian, YANG Wan-Qin*

Faculty of Forestry & Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5892 ~ 5898.

Abstract: As a typical ecological transition zone between dry valley and subalpine forest in the upper reaches of Minjiang River, the ecotone between Minjiang dry valley and montane forest (EDM) is an important residential area for Zang and Qiang minorities as well as plays an important role in inhibiting the dry valley expansion and in extending the ecological function of the subalpine forest. Nevertheless, the structure and function of the EDM ecosystem is greatly vulnerable to damage from human activity and natural disaster such as earthquake, landslide, collapse and long-term drought, despite of its important status in keeping regional stability and local resident development. Due to the inherent geologic instability and sensitivity as well as fragile property, the EDM was one of the most serious areas damaged by “5.12” Wenchuan Earthquake, as the consequence of which the earthquake-damaged ecosystem restoration or reconstruction, and the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30771702, 30471378); 国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0592); 国家“十一五”重大科技支撑计划资助项目(2006BAC01A11); 四川省杰出青年学科带头人培养基金资助(07ZQ026-022)

收稿日期:2008-08-20; **修订日期:**2008-11-10

作者简介:刘彬(1985~), 男, 四川绵阳人, 硕士, 主要从事恢复生态学研究. E-mail: liub_ecology_2007@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com; ywq918@yahoo.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30771702, 30471378), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-07-0592), National Key Technologies R & D Program of China (No. 2006BAC01A11), and Sichuan Excellent Youth Science and Technology Foundation (No. 07ZQ026-022)

Received date:2008-08-20; **Accepted date:**2008-11-10

Biography: LIU Bin, Master, mainly engaged in restoration ecology. E-mail: liub_ecology_2007@126.com

hometown rebuilding are the current crucial tasks after the earthquake. Judged by the characteristics of earthquake-damaged ecosystem in combination with the fragile characteristics and the ecological importance of the EDM, therefore, it is suggested that the urgent and key scientific & technical issues include the rapid assessment on the characteristics of earthquake-destroyed ecosystem, the plan on detailed ecological restoration or reconstruction, the key techniques of beneficial “win-win” construction in both ecological restoration and economic development, the conservation of the survival vegetation in the earthquake, the reconstruction on the earthquake-damaged vegetation, the production restoration of earthquake-damaged farmland, comprehensive treatment on unstable slope, the improvement of low-benefit fuelwood forest, and the construction of scenic forest around the human settlement. Moreover, future researches include the monitoring and evaluation on the restoration process of the earthquake-damaged ecosystem, the fragile mechanism and ecological process of the EDM ecosystem, and the responsive and adaptive mechanisms of ecosystems to the changed environment after earthquake, should be strengthened to sustainable development of local society and regional ecology.

Key Words: ecotone between dry valley and montane forest; Wenchuan Earthquake; earthquake-damaged ecosystem; ecological restoration; scientific & technical issues

岷江干旱河谷($N31^{\circ}15' \sim 32^{\circ}32'$, $E103^{\circ}10' \sim 103^{\circ}54'$)是指四川省阿坝州松潘县镇江关以下、汶川县绵虬以上的一段降水量小、蒸发量大、季节性干湿交替明显、植被覆盖率低、土壤干旱贫瘠和环境极度恶化的岷江正河谷及支流,面积约 170 km^2 ,以汶川、理县、茂县、黑水、松潘县为核心区^[1~6]。岷江干旱河谷-山地森林交错带(ecotone between Minjiang dry valley and montane forest, EDM)是指干旱河谷与亚高山森林之间的过渡地带,以中生性耐旱植物形成的灌丛、草丛、亚高山森林衍生过程中形成的次生林以及人工林为主^[7~9],具有物种多样性相对较高、环境较为敏感等特点^[9, 10]。由于 EDM 上缘的亚高山森林所具有的水源涵养、水土保持、区域气候调节和生物多样性保育等生态庇护功能使 EDM 具有相对较好的植被、土壤和水分条件,因而是藏、羌民族的重要聚居地,也是高山峡谷区人口密度最大的区域之一^[2, 4]。同时,作为环境变化的缓冲带,EDM 不仅能延伸亚高山森林生态系统在水源涵养、水土保持和小气候调节等方面的生态功能^[9, 11~13],而且有助于抑制干旱区上延。

然而,EDM 处于地质活动频繁的地中海-喜马拉雅龙门山地震带。有记载以来,该地震带曾发生过 10 次 8.0 级以上地震,78 次 7.0 ~ 7.9 级地震^①。由于地震的突发性、广泛性和强破坏性及其次生灾害和伴生自然环境问题的连发性、群发性、影响长期性和关联性^[14~16],使地处高山峡谷地带的 EDM 受地震及其次生灾害的影响非常严重,主要表现为地质结构疏松、景观破碎化程度高、土壤与植被发育受阻、生态系统稳定性差、对环境变化非常敏感等特点,严重影响当地藏羌居民的生产、生活和生存环境。因此,探讨 EDM 震后生产与生态恢复的关键科学技术问题是该区灾后生产与生态恢复重建的基础。

1 “5.12”汶川大地震对 EDM 的生态影响

1.1 植被和土壤的直接震毁严重

“5.12”汶川大地震是时间序列最近和建国以来震级第 2 的强地震,面波震级 8.0Ms,烈度 11 度(<http://earthquake.usgs.gov>)。由于 EDM 地处高山峡谷地带,距离汶川大地震震中的距离约 20 ~ 300km,其植被和土壤均受到不同程度的震毁。首先,地震直接震毁了 EDM 的天然和人工植被(森林、灌丛和草地)生态系统结构,并震毁了地上植被赖以生存的土体结构。初步估计,EDM 内的植被覆盖率降低了 20% ~ 90%,其震毁程度与地形和震中距离有关。其次,地震引起的山体位移、地表扭曲、地裂、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害不仅直接破坏了 EDM 的植被和土壤,而且阻碍了 EDM 植被和土壤发育,影响了植被演替和物种组成的过渡性和连续性,导致景观的破碎化。此外,震毁植被系统使珍稀和濒危乡土动植物丧失了赖以生存的环境,从而导致

① 张晓东. 中国大陆强震的成因活动特征及发生机制研究. 博士论文, 2004.

局部坍塌地及整个交错带生物多样性下降,对震后生态恢复与重建具有长久的影响。

1.2 植被和土壤的间接损毁和影响具有长期性

地震及其次生灾害对 EDM 的影响具有长期性、连发性、群发性和关联性。首先,EDM 是高山峡谷地带除河谷区之外人口最为稠密的区域,但地震及其次生灾害严重损毁了藏羌居民赖以生存的房屋和耕地,灾后恢复与重建对建筑材料(木材、沙石、泥土等)、耕地、薪炭、放牧场地等的大量需求不仅会破坏残存植被生态系统,而且将增加植被恢复与重建的难度。调查表明,阿坝州理县佳山地带的 EDM 的房屋几乎全部损毁,耕地损毁达 80%,而震后生产自救中的采食、伐薪、建筑、开垦、牲畜野放等损毁的残存植被面积达到 25% 以上。其次,地震及其次生灾害通过损毁地下隔水层、改变地质及水文过程、降低土壤水分涵养和水土保持功能,加剧了 EDM 局部地区的干旱化,增加本来就很困难的植被恢复重建难度。此外,地震及其次生灾害损毁了公共基础设施、交通运输及经济基础,增加了正在该区实施的生态恢复重建项目的难度和成本。

1.3 植被恢复与重建难度进一步增加

EDM 的生态重要性和脆弱性使其在灾前已成为植被恢复与重建的重点区域。缺水少肥被认为是该区植物生长困难的主要原因^[7],但汶川大地震及其次生灾害对植被和土壤的严重损毁、地下隔水层的破坏等将进一步降低土壤的水肥保蓄能力和水资源的利用效率,可能增加植物生理干旱度及区域干旱度,从而增加植被恢复重建的难度。掩埋植物残体的分解过程也将严重干扰土壤有机物质积聚和分解过程,干扰营养元素在植物群落演替、生理生长的中的迁移和交换、循环与分配过程^[17, 18]。可见,地震及其次生灾害造成植被附着层和原有植被层大面积消失或掩埋,形成大量次生裸地以及山体剖面集合体,改变了植被、土壤、水文等过程,使植物生长发育的附着基质和定居场所等进一步恶化,而景观破碎化程度的增加将阻碍物质循环、能量流动、信息传递等生态学过程,造成各子系统信息、物质、能量的传递和流动负载值偏高,进而威胁震后植被系统的稳定性及恢复进程。

2 震后生态恢复的关键科学技术问题

2.1 损毁生态系统的快速评估与生态重建规划

尽管国务院在汶川大地震后迅速制订了《汶川地震灾后恢复重建条例》,但这仅仅是指导性的文件,无法满足灾后生态恢复与重建的要求。震后生态系统的损毁程度、类型和分布等的快速评估是灾后生态恢复重建规划的基础。对于 EDM 震后生态恢复重建需要结合灾害类型、程度和分布的评估结果以及当地的自然经济状况和民风民俗等进行科学的生态恢复与重建的设计和规划。汶川大地震及其次生灾害已造成上万亿元的直接经济损失以及难以估量的间接损失和巨大的生态灾难。尽管人员伤亡和可核算的重大经济损失是评估地震等灾害损毁度的最主要指标^[19, 20],但有关生态系统损毁的评估技术仍然有待深入。例如,运用航空测量法可以在震后短时间内捕捉震区影像,快速评估灾后损失^[21],但受图像分辨率不高、图像质量和地形影响。王景来等将 GIS 与不同烈度等震线的长、短轴统计模型结合,优化了地震损失评估模型及工作效率^[22]。郑文锋等则遵循“开放式地理空间协会”提出的服务规范,提出一套基于 OpenGIS 的地震信息采集与震灾评估系统,并通过 WEB 服务器间的标准化接口、简易的数据整合与交互操作,可快速统计评估灾情^[23]。虽然这些方法应用于城市或重要生产经济区时效果理想,但如果运用于乡村地区或经济落后地区则具有很大的局限性,应用于高山峡谷地带的灾害评估则更加困难。为此,He & Song 提出将 EDMS (evaluation and damage data management system) 震后快速评估系统运用于农村地震灾害损失^[19],但该评估方法应用于高山峡谷地带生态系统的损毁程度、类型和分布的评估时仍然具有局限性。因此,震毁生态系统的快速评估仍然是 EDM 震后生态恢复与重建的关键科学技术问题。

2.2 生产与生态双赢共建关键技术

EDM 是藏羌居民的重要生产生活区,灾后重建家园、生产恢复与重建对生产、生活和建筑资源的需求将增加生态脆弱区的承载压力。“5.12”汶川大地震导致 EDM 区 80% 的耕地资源被毁,复垦难度大,甚至无法复垦与耕作,这使长期存在于 EDM 内的“三农”问题、人地关系紧张等生态与生产问题更加突出。灾民为重

建家园和增加经济收入而进行陡坡耕作、毁林垦耕、采伐残存森林和放牧等活动可能影响已取得成效的退耕还林(草)、天然林资源保护、低效林改造等生态工程。这表明,重建家园、生产恢复和发展将可能成为 EDM 生态恢复与重建的重要制约因素,但良好的生态系统是区域经济社会可持续发展的基础。如何协调灾后重建与恢复过程中的生产与生态恢复重建关系,构建灾区生产与生态双赢共建的关键技术将是灾后重建的关键科技问题。

2.3 震后残存植被保育技术

震后残存植被是原有自然植被、人工植被受到地震及其次生灾害严重干扰后形成的次生植被类型,具有系统功能下降明显、抗干扰力及自我调节能力弱、易发生逆向演替等特点。地震烈度达到Ⅷ级时就能造成树木折断、翻倒和根系损伤^[15],震前震后的动物异常活动或迁移现象,震后圈舍破坏畜禽野放通过采食、践踏、迁移、定居等生物活动直接或间接植被覆盖度和自我恢复过程^[24, 25]。“5.12”汶川大地震烈度达Ⅺ级,几乎毁灭性地破坏了离震中较近的 EDM 区内自然/人工植被,显著降低了生物多样性以及物种组成的连续性和过渡性,但震后残存植被在维持 EDM 生态系统的稳定性、降低次生灾害程度、提供当地居民重建家园所必需的生产、生活资料等方面仍然具有重要作用。例如,四川农业大学目前正在理县佳山实施的“干旱河谷-山地森林交错带植被调控技术及示范”课题(国家科技支撑计划课题和四川省教育厅重大培育项目)建立的 65 hm² 试验示范基地中丰美的牧草为圈舍破坏后的野放家畜等提供了至少 1300 t 鲜食草料。而建立在毕棚沟的 160 hm²“亚高山/高山低效人工林调控技术及示范”基地因采用围栏封育和植被调控后,林下的禾草类草本植物生物生产力比对照样地增加了 10 倍左右,为震后周边藏族人民的牛羊提供了至少 3200 t 的鲜食草料。这些残存植被为周边居民减灾防灾和正在进行的灾后生产恢复和重建家园提供了保障。可见,残存植被的保护与恢复是震后生态恢复的基础和重点,如何在短期内构建和实施高效、可行、低耗的震后残存植被保育技术及模式是 EDM 灾后生产与生态恢复重建的关键科学技术问题之一。

在残存植被中,水源涵养林的恢复与重建特别重要。EDM 的上缘是重要的亚高山水源涵养植被以及水土保持植被带集中分布区,重点开展亚高山水源涵养植被的保护与生态恢复对当地居民生产和生活以及区域生态系统功能的发挥具有重要意义^[1, 4]。因此,根据水源涵养林的震后损毁程度、震毁类型和分布等,构建保护与恢复重建相结合的水源涵养地植被恢复重建技术与模式是 EDM 震后生态恢复重建的重要组成部分和关键科学技术。

2.4 震毁植被恢复与重建

震毁植被是指原有自然植被、人工植被受到地震及其次生灾害造成的活体掩埋、无附着基质、机械折损而失去自我恢复调节能力的植被体,易形成大面积次生裸地及山体创面迹地。尽管震毁植被在生态系统自然复原过程中已经失去调节和辅助功能,但是其形成的次生裸地、山体创面及震毁遗留植物体仍然可以为震后生态恢复提供种质资源和场地,为防灾减灾和灾后重建提供了基础条件。因此,亟待根据灾害评估结果确定 EDM 区内震毁森林、灌草丛的恢复、重建或重构技术与模式,从不同的震毁程度、功能分区制定具有针对性的恢复策略。对轻度震毁的自然植被,以封育型植被调控为主;退耕还林地带的植被,则以林、草、畜相结合的生态恢复或重建模式,并纳入残存植被恢复与重建进程;而针对中度震毁的植被,因土壤尚存,需要进行快速恢复地表植被、加固土体、补肥补水等造林或工程措施;对完全震毁的植被,需要根据土壤母岩和母质的性质,遵循适时适地、宜草宜林的原则重构 EDM 的林、草植被。

2.5 耕地生产恢复与重建

耕地是农民最基本的生产资料和当地居民赖以生存的基础,因此,EDM 灾后耕地复垦成为关乎民生的重要问题,也是进行植被恢复与重建的前提。可根据现有的农耕地受损评估结果,划分复垦方式,如地震造成的裂缝、塌陷、倾斜等轻度受损农耕地集中人力短期内复垦,同时改变原有生产周期较长的耕作模式,调整为生产周期较短的粮食作物和蔬菜,尽快满足灾后基本生活。对于塌方、泥石流、滑坡等造成的重度受损农耕地采取适时播散草种,逐步恢复地表植被,根据恢复情况采取宜林宜地措施。针对震后区域耕地总量减少的现状,

可采取适当的生态移民,调整居民生存方式,并积极推广“以工代赈”的人力资源利用模式,生产和复垦与恢复土地生产力相结合,引进优质品种和先进的生产工艺与技术,注重农业用地产业升级。

2.6 边坡综合治理

EDM 地处地质疏松的高山峡谷区,具有沟谷深切、地形地貌复杂、景观破碎、边坡地数量多、坡度大、水土流失严重、山地灾害频繁等显著特点,即使在不发生地震的情况下,该区也经常发生滑坡、飞石、塌方等地质灾害,造成重大生命、财产损失,并破坏公路及其沿线,严重影响正常的生态系统功能及生产、生活秩序,延误突发事件的信息传递、物资运输与救援工作^[26],而震后植被受损加剧边坡灾害发生频率及治理难度。因此,开展 EDM 内的自然边坡、道路边坡、坡耕地边坡集中区的综合治理是震后生态恢复重建的关键科学技术问题。

在边坡治理过程中,应根据震毁程度、类型、分布和立地条件,采用以植被恢复为主导,生物措施与工程措施相结合的生态工程治理技术,划分交错带内边坡类型及土质边坡、岩石边坡工程措施^[27]。虽然树木的根系可以增加土体强度^[28],但其腐烂过程则会降低土壤强度,在治理过程中首先应及时清除震后无法成活的受损植物及根系^[29]。根据 EDM 的脆弱性及季节性干湿交替明显的气候特点,植被恢复过程中应遵循适时适地适树、乡土为先的原则,也可慎重引进一些业已证明的具有良好根系、适生性强和不具生物入侵特点的优质树种^[30~32]。注重已有先进新工艺、新方法以及经济型生物治理边坡绿化技术的运用。在 EDM 边坡中,与居民生产生活密切相关的坡耕地边坡占有很大面积,可采取必要的工程措施,如坡改梯、厚层基材喷射护坡等^[27],加固边坡土质,维持其生产功能,促进生态恢复与生产的协调。

2.7 藏、羌居民聚居点风景林营造

分布于聚居点的风景林不仅具有改善微气候、美化家园、增加植被覆盖率和居民收入等特点,而且合理的风景林能缓冲滑坡、塌方、泥石流等山地灾害对居民房屋的损坏,降低生命财产的损失。因此,以风景林的树根不影响构筑物安全为前提^[33],尊重当地民风民俗,合理选种经济价值和景观美学价值高的树种,优化、配套、立体开发并建立起一批具有显著景观特征、经济与艺术价值、生态价值的庭院风景林是灾后生态恢复重建的重要内容。

2.8 低效薪炭林改良与发展

薪炭林(fuelwood forest)是以生产薪炭材和提供燃料为目标的林木,是 EDM 内藏羌居民在水电、沼气等可替代能源未充分开发之前的主要薪材来源,同时具有生态效益、社会效益和经济效益的生物质能产出形式,在震后经济、生态恢复中起到重要作用。地震加大了居民为重建家园、伐薪、野放家畜等对原有薪炭林的过度利用,造成过伐、平茬期严重缩短、系统稳定性下降、经济效益及生态功能降低,使原本很低的能源利用率(低燃薪能、低薪炭林综合效率)^[34]进一步降低。尽管震前已有多项课题在进行 EDM 低效薪炭林的改造试验,并取得显著的成效,但此次地震及次生灾害严重减缓了这些工程的进展。因此,针对 EDM 脆弱的系统稳定性和恶劣的自然环境,加强优质薪炭林灌物种的引进与适生性研究^[35],构建乔灌结合、多木混交等集约型、经济型薪炭林经营模式,科学改造低效薪炭林是震后生态恢复与重建工作的重要内容。

3 研究展望

3.1 震毁生态系统的生态恢复过程监测与评估

由于生态系统是区域经济社会可持续发展的基础,因而 EDM 内震毁生态系统的恢复与重建将可能成为灾区生态环境建设的重点区域之一。因此,在 EDM 生态系统灾损评估的基础上,采用定位监测与“3S”技术相结合的研究手段,监测和评估震毁生态系统的生态恢复过程将可能是未来的重点研究领域之一。

3.2 EDM 生态系统的脆弱性机制及生态学过程研究

EDM 具有地形地貌复杂、季节性干湿交替和焚风效应明显、山地灾害频繁、土壤贫瘠、水肥保蓄能力较差等恶劣的自然条件及人类活动干扰强度大等特点,植被演替、土壤发育、物质循环和能量转换以及土壤与植被类型的组合等生态系统过程常受到自然和人类活动的干扰,从而使其成为研究生态系统脆弱性机制和生态学过程等的天然实验室。汶川大地震后,EDM 的生态脆弱性和生态学过程将发生什么样的变化?对该区经济、

生态和社会有何影响? 如何调控? 这需要深入研究 EDM 生态系统的脆弱性机制及其生态学过程。

3.3 震后生态系统对变化环境的响应与适应机制

“5.12”汶川大地震及其次生灾害不仅改变了 EDM 生态系统的结构、功能和生态过程,而且改变了区域自然和人文环境。现在的问题是,在全球气候变化背景下,震后生态系统如何响应和适应这些变化环境? 其对区域可持续发展有何影响? 人类如何适应这些变化环境? 这应该是未来的重点研究领域。

References:

- [1] Editorial board of Sichuan Vegetation. Sichuan Vegetation. Chengdu: Sichuan People Press, 1980.
- [2] Zhang R Z. Scientific investigation series of Hengduan Mountainous Areas in Tibetan Plateau — arid valley in Hengduan Mountainous Areas. Beijing: Science Press, 1992.
- [3] Li X B. Soil of Sichuan. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1997.
- [4] Committee of chorography of Mao-wen Qiang nationality autonomous county, Aba Zang and Qiang nationality autonomous district, Sichuan province. Chorography of Mao-wen Qiang nationality autonomous county. Chengdu: Sichuan Dictionary Press, 1997. 74 — 101.
- [5] Moseley R K, Tang Y. Vegetation dynamics in the dry valleys of Yunnan, China, during the last 150 years: implications for ecological restoration. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(5): 713 — 722.
- [6] Wang C M, Bao W K, Chen J Z, *et al.* Profile characteristics nutrients of dry cinnamon soils in dry valley of the upper Minjiang river. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(3): 230 — 234.
- [7] Liu G H, Ma K M, Fu B J, *et al.* Aboveground biomass of main shrubs in dry valley of Minjiang river. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1757 — 1764.
- [8] Ye M S, Guan W B, Bai Z X, *et al.* Ecological gradient of plant community in the dry valley of Minjiang River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 70 — 75.
- [9] Zhu F M, An S Q, Guan B H, *et al.* A review of ecotone: concepts, attributes, theories and research advances. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3032 — 3042.
- [10] Niu W Y. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ecotone. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(2): 97 — 105.
- [11] Woodall C W, Liknes G C. Relationships between forest fine and coarse woody debris carbon stocks across latitudinal gradients in the United States as an indicator of climate change effects. *Ecological Indicators*, 2007, 8(5): 686 — 690.
- [12] Dang H S, Jiang M X, Zhang Q F, *et al.* Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240: 143 — 150.
- [13] Mi F, Li J Y, Lu N. Research on evaluation of forest ecological benefit. *Chinese Forestry Science and Technology*, 2005, 4(3): 70 — 79.
- [14] Han D Y, Wei Y Z. Seismic disaster of ecological system in western region of china and basic defensive measures for it. *Northwestern Seismological Journal*, 2005, 27(4): 337 — 341.
- [15] Wu J B, Guo A H. Earthquake and environment and ecology. *Journal of Catastrophology*, 2001, 16(3): 87 — 91, 96.
- [16] Spence R, Bommer J, Re D D, *et al.* Comparing loss estimation with observed damage: A study of the 1999 kocaeli earthquake in Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2003, 1(1): 83 — 113.
- [17] Gallousi C, Koukouvelas I K. Quantifying geomorphic evolution of earthquake-triggered landslides and their relation to active normal faults: An example from the gulf of Corinth, Greece. *Tectonophysics*, 2007, 440: 85 — 104.
- [18] Dzwonko Z, Gawroński S. The role of woodland fragments, soil types, and dominant species in secondary succession on western Carpathian foothills. *Plant Ecology*, 1994, 111: 149 — 160.
- [19] He H L, Song X C. Development of earthquake damage evaluation and damage data management system (EDMS) — A case study on Lijiang earthquake damage. *Seismology and Geology*, 2005, 27(3): 397 — 411.
- [20] Shinozuka M, Chang S E, Eguchi R T, *et al.* Advances in earthquake loss estimation and application to Memphis, Tennessee. *Earthquake Spectra*, 1997, 13(4): 739 — 758.
- [21] Sun Z K, Gu J H. A new method for loss assessments of earthquake disasters-the aerial survey. *Recent Development in World Seismology*, 2000.
- [22] Wang J L, Song Z F. Model for fast seismic disaster assessment. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24(2): 162 — 167.
- [23] Zheng W F, Yin X T, Kan A K, *et al.* Seismic information collection and disaster evaluation system based on OpenGIS. *Journal of Seismological Research*, 2007, 20(2): 195 — 200.

- [24] Huang Z. Abnormal animal behaviors and earthquake warning. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(1): 29–35.
- [25] Huang Z. The history and future of the abnormal animal behaviors used as earthquake precursor. *Seismological Geomagnetic Observation and Research*, 2006, 27(4): 44–51.
- [26] Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(2): 261–272.
- [27] Fredlund D G. Slope stability hazard management systems. *Journal of Zhejiang University Science*, 2007, 8(11): 1695–1711.
- [28] Ye J J, Xu W N, Yan C Y, *et al.* Review and prospect of slope vegetative treatment. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 173–177.
- [29] Gray D H, Megahan W F. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith. *USDA Research Paper INT-271*, Ogden, UT, 1980, 23.
- [30] Bi H Q, Simpson J, Li R W, *et al.* Introduction of *Pinus radiata* for afforestation: a review with reference to Aba, China. *Journal of Forestry Research*, 2003, 14(4): 311–322.
- [31] Wu Z X, Liu Q L, Huang Q, *et al.* Experiments with the introduction and cultivation of *Pinus radiata* D. Don in the upper reaches of the Minjiang River, Sichuan Province, China. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2005, 26(3): 1–10.
- [32] Watson A J, O’loughlin C L. Structural root morphology and biomass of three age classes of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1990, 20(1): 97–100.
- [33] Gray D H. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization. New York: John Wiley&Sons, Inc, 1996.
- [34] He X X, Li W L, Zhang X N, *et al.* Rural household energy use and rural environment change: case study on fuel forest use in a village in depressed area. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1): 99–102.
- [35] Su C B, Jing C G. HD-1 Silk tree observation system for earthquake prediction. *Earthquake Research in Shanxi*, 2003, 4: 29–31.

参考文献:

- [1] 四川植被协作组. 四川植被. 成都: 四川人民出版社, 1980.
- [2] 张荣祖. 青藏高原横断山区科学考察丛书——横断山区干旱河谷. 北京: 科学出版社, 1992.
- [3] 李钦榜. 四川土壤. 成都: 四川科学技术出版社, 1997.
- [4] 茂汶羌族自治县地方志编纂委员会. 茂汶羌族自治县志. 成都: 四川辞书出版社, 1997.
- [6] 王春明, 包维楷, 陈建中, 等. 岷江上游干旱河谷区褐土不同亚类剖面及养分特征. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 230–234.
- [7] 刘国华, 马克明, 傅伯杰, 等. 岷江干旱河谷主要灌丛类型地上生物量研究. *生态学报*, 2003, 23(9): 1757–1764.
- [8] 冶民生, 关文彬, 白占雄, 等. 岷江干旱河谷植物群落生态梯度分析. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 70–75.
- [9] 朱芬萌, 安树青, 关保华, 等. 生态交错带及研究进展. *生态学报*, 2007, 27(7): 3032–3042.
- [10] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定. *生态学报*, 1989, 9(2): 97–105.
- [14] 韩东银, 魏英祖. 西部生态系统震害及其基本防御措施. *西北地震学报*, 2005, 27(4): 337–341.
- [15] 吴谨冰, 郭安红. 地震与环境生态. *灾害学*, 2001, 16(3): 87–91, 96.
- [19] 何宏林, 宋新初. 地震灾害评估和灾害数据管理系统(EDMS)的开发——以丽江地震为例. *地震地质*, 2005, 27(3): 397–411.
- [21] 孙振凯, 顾建华. 地震灾害损失评估的新方法——航空测量法. *国际地震动态*, 2000, 5: 18–19.
- [22] 王景来, 宋志峰. 地震灾害快速评估模型. *地震研究*, 2001, 24(2): 162–167.
- [23] 郑文锋, 银正彤, 阙爱珂, 王绪本. 基于 OpenGIS 的地震信息采集与震灾评估系统. *地震研究*, 2007, 20(2): 195–200.
- [24] 黄赞. 动物行为异常与地震灾害预警. *防灾减灾工程学报*, 2007, 27(1): 29–35.
- [25] 黄赞. 动物习性异常作为地震前兆研究的历史与未来. *地震地磁观测与研究*, 2006, 27(4): 44–51.
- [28] 叶建军, 许文年, 鄢朝勇, 等. 边坡生物治理回顾与展望. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 173–177.
- [31] 吴宗兴, 刘千里, 黄泉, 等. 岷江上游干旱河谷辐射松引种造林研究. *四川林业科技*, 2005, 26(3): 1–10.
- [34] 赫晓霞, 李文龙, 张晓楠, 等. 农户能源利用方式的选择与农村环境的变化: 某贫困山村薪炭林利用案例研究. *生态环境*, 2006, 15(1): 99–102.
- [35] 苏丛柏, 景呈国. HD-1 型合欢树地震观测系统. *山西地震*, 2003, 4: 29–31.