

地震对山地生态系统的影响 ——以 5.12 汶川大地震为例

吴 宁, 卢 涛, 罗 鹏, 朱 单

(中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)

摘要:地震是人类面临的主要自然灾害之一,其对于自然生态系统也有着巨大的影响。地震往往会导致生态系统发生退化,尤其自身比较脆弱的山地生态系统。以 5.12 汶川大地震为例,系统总结了山区地震的基本特点,综述了地震对于典型山地生态系统、生物多样性、山地景观以及区域生态安全的影响。地震对于山地生态系统可能会产生直接的影响(损毁动植物、破坏栖息地、改变水文过程),也可能产生间接的影响(污染环境、改变动植物习性、影响生物化学循环)。无论是直接还是间接影响,都是以地震对山地生态系统地形地貌的改变为主导。山区由于地震而引发的次生灾害对于山地生态系统的影响也非常显著。建议应该加强有关地震对山地生态系统影响方面的研究,并指出了围绕此次 5.12 汶川大地震,应该重点开展的几个研究方向。

关键词:地震;山地生态系统;生物多样性;景观;生态安全;影响

文章编号:1000-0933(2008)12-5810-10 中图分类号:Q149, S73112 文献标识码:A

A review of the impacts of earthquake on mountain ecosystems: taking 5.12 Wenchuan Earthquake as an example

WU Ning, LU Tao, LUO Peng, ZHU Dan

Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5810 ~ 5819.

Abstract: Earthquake is among major natural disasters faced by human being and may lead to extensive ecological degradation. Studying its impacts on natural ecosystems constitutes a significant challenge and published results on this respect are quite limited. By reviewing the literatures and using the 5.12 Wenchuan Earthquake as an example, we attempt to analyze the main characteristic effects of the earthquake on mountain areas and review the impacts of earthquake on mountain ecosystems, biodiversity, landscape and ecological security. Earthquakes may directly destroy vegetation and wildlife habitats and alter functions and hydrological processes of ecological systems. On the other hand, earthquakes may also result in indirect impacts on environment, i. e., environmental pollution, behavioral and physiological changes of animals and changes in biogeochemistry cycle. Although damages caused by earthquakes vary among different ecosystems, earthquakes affect mountain ecosystems mainly by reshaping landforms and land physiognomy on which all life rely. The numerous secondary geo-hazards, such as rock avalanches, rock flows, landslides and debris flows, may lead to serious

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40671181);中国科学院“西部之光”人才培养计划西部博士资助项目(2007);国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAC01A11, 2006BAC01A15)

收稿日期:2008-10-06; **修订日期:**2008-11-21

作者简介:吴宁(1964~),男,四川成都人,博士,研究员,主要从事高山亚高山植被生态学和退化生态系统的生态恢复研究. E-mail: wuning@cib.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40671181); West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (2007); Chinese Science & Technology Ministry (No. 2006BAC01A11, 2006BAC01A15)

Received date: 2008-10-06; **Accepted date:** 2008-11-21

Biography: WU Ning, Ph. D., Professor, mainly engaged in vegetation ecology of alpine and subalpine ecology, and ecological restoration of degraded ecosystem. E-mail: wuning@cib.ac.cn

damage to and/or loss of vegetation. However, due to the lack of detailed researches, the changes in the functions and process of the ecosystems following earthquakes are still not clearly understood. Thus, it is necessary to collect the in-situ data, monitor the long-term environmental changes, and probe into theories and approaches about ecological restoration in quake-hit areas. Several potential fields for future researches about the ecological effects of 5.12 Wenchuan Earthquake are suggested.

Key Words: 5.12 Wenchuan Earthquake; mountain ecosystems; biodiversity; landscape; ecological security; ecological impacts

地震是一种突发性的地壳构造运动,是岩石圈的某一有限区域内能量的突然释放所引起的震动,是地震灾害的主要致灾因子^[1,2]。到目前为止,由于地震的不可准确预测性,包括发生的时间、地点、程度等,决定了人类只能对地震的爆发做出滞后的、被动性响应^[3]。

地震在给人类的生命财产带来不同程度损失的同时,往往也会造成自然生态系统结构和功能部分或彻底的毁坏与瓦解。如果地震发生在山区,这种对生态系统的影响就更加明显^[4]。因为,山地生态系统的脆弱性强,抗干扰能力弱,严重退化后恢复困难^[5]。

山地是一个复杂的生态系统,具有特定的结构和功能,拥有丰富的生物多样性,往往是一个国家可持续发展的重要生物资源保障,对国家、民族和地区的经济和社会发展至关重要^[6,7]。我国是一个多山国家,山地面积约占国土总面积的 2/3,其中东西向和南北向以及东北-西南向和西北-东南向的巨大山系多达 15 条^[8,9]。这些巨型山系奠定了我国自然环境的基本格局,对我国生态与环境过程产生了深刻的影响^[7]。

我国也是个地震多发的国家。由于位于环太平洋和地中海-喜马拉雅两大地震带之间,地震断裂带十分发育,并且地震具有频率高、分布广、强度大、震源浅等特点,这些特征决定了我国地震破坏的严重性和广泛性^[10,11]。而我国的山地,尤其是西部山地更是地震的高发区,分布着许多大的断裂带,地震活动水平呈现频次高、强度亦高的特点^[12]。此次汶川 5.12 里氏 8.0 级大地震就发生在属于我国南北地震带的龙门山断裂带上。

因此,科学地分析和评估地震对于山地生态系统的影响,有着非常重要的意义。然而,截至目前,多数有关地震灾害的研究往往更加关注于地震的发生机理以及对于直观的人员伤亡和建筑物破坏的影响,而涉及地震对自然生态系统影响的研究还不多。具体来说,地震活动对自然生态系统结构与功能的影响以及震后生态过程变化的研究比较缺乏,灾后生态演变的途径、速率、机理以及特点都还不清楚^[13]。

本文在前人研究的基础上,综述了地震对于山地生态系统的影响,并以此次汶川大地震为例,系统分析了受灾山区生态系统可能受到的影响,以期为进一步认识地震的生态成灾机理与发展规律,为灾区山地生态系统恢复与重建提供科学依据和理论基础。

1 山区地震的基本特点

山地是一个以地形地貌为主导的复杂生态系统。UNEP-WCMC(2002)对山地做了严格的定义,按照其标准,同时满足海拔在 2500m 以下、没有坡度或相对高度小于 300m 这 3 个条件的地区不属于山地^[14]。因此,地形地貌是形成各种山地生态现象和过程的最基本要素,其他要素则由此衍生而成^[7]。由于这一特点,使得地震对于山地生态系统的影响表现出明显的空间异质性,即生态系统的受损程度与地形地貌的改造程度密切相关。地形地貌改造强烈、隆升过程明显的区域,往往自然生态系统受损也最为严重。

山地最显著的特征是拥有高能量的斜坡环境,斜坡环境的梯度变化决定了山地系统物流、能流具有输出为主的特点,由此形成山地系统具有脆弱性特性,表现为对外力作用的敏感性和山地特有灾害的易发性^[15]。一般来说,山地系统的脆弱性与高度和坡度有关,山地越高,坡度越陡,系统越不稳定^[16,17]。

因此,山地生态系统以地形地貌为主导的特征及其自身的脆弱性,决定了相比其它生态系统来说,其受地震的影响更为显著。韩东银和魏英祖将生态系统震害总结为具有连发性、群发性、长程关联性和影响长期性

4 个特征^[18]。同样,山区地震也具有这些特点。山区地震较其它生态系统不同的一个显著特点是,容易引发严重的次生地质灾害。这主要是因为对于山地生态系统来说,地震的最显著影响表现在对于地形地貌的改造作用,而山区由于地质构造复杂、系统本身脆弱,震后往往会发生滑坡、泥石流、塌方甚至山崩等地貌过程。魏丽等的研究表明,同等地质环境条件下,植被覆盖率低,滑坡较易发生,但当外力作用达到诱发滑坡灾害发生的临界值时,植被对滑坡体的重力作用反而更加重了滑坡的发生^[19]。这也直接导致了山区常常会因为小震而酿成大害的情况。

此外,由于地震活动对生态系统的间歇性干扰时间较长,干扰具有明显的累加与放大效应,如果叠加暴雨和冰雪等气象要素,则对山地生态系统的破坏性具有更加明显的累积与放大作用^[20]。这也是山区地震灾害的另一个显著特点。

2 地震对典型山地生态系统的影响

2.1 森林

地震对山地森林生态系统的影响主要通过其对于地形地貌的改变来实现。地形地貌明显体现了对生境条件的综合性指示能力,并显著影响着森林景观格局和生态过程^[21~24]。当地震对于地形地貌的改造作用十分强烈时,甚至可能会在大范围内将森林完全移除^[25~27]。例如,美国阿拉斯加 1964 年的地震由于其对于地表的抬升和降低作用,使得沿海岸带地区森林变为海藻;而距今 7000a 前左右,我国深沪湾发生的强古地震,使生长古森林的低凹洼地或槽地沉没海底,形成了泻湖环境^[28]。当地震对于地形地貌的改变作用较轻时,山地森林同样会受到影响。例如,森林可能在小范围内被地震造成的山体滑坡所掩埋,致使连片的森林成为斑块状。而滑坡是一个非常复杂的过程,对山地森林植被和土壤有很大影响,其不仅导致森林植被的局部发生变化,也可使原有的森林土壤理化性质发生改变^[29~32]。

地震形成的地表裂缝及土层的松动,可能直接导致森林植被损毁或倾斜、折断、倒塌^[33]。地震也会由于山体石头的滚落而在几平方米的小范围内对树木造成直接损伤^[34],或造成同一片林分中某些树木的倒塌,形成林窗,进而导致森林出现镶嵌式的演替格局,深刻影响一系列森林生态学过程。一般来说,高生物量的森林和个体体量大的树木更易受到地震的影响。而当坡度不断增加时,林地比草地更容易受到严重的损坏。对于一个具体种群来说,较多的树木在同一时间内死亡,对于群落的年龄结构组成及更新也将产生重要影响,由此可能造成林分结构的更加不稳定。但对于成、过熟林来说,新的林窗形成后是否反而有利于森林整体的更新还需要进一步的研究。受害树木伤口的形成则增加了病虫害侵袭的危险,甚至可能促进森林病虫害的暴发。

地震还可能对山地森林生态系统的地球化学循环造成影响。Liu 和 Sheu 对于 1999 年台湾南投县集集 9.21 地震前后的定点研究表明,在地震发生前,地温将增加^[35]。而已有研究表明,森林土壤温度的微小变动会显著影响碳、氮的矿化比率^[36,37],影响地上地下的碳氮比,甚至还可能会影响森林生态系统究竟成为碳源还是碳汇^[38]。

总之,地震对于山地森林生态系统的影响是广泛存在的^[25, 26, 39~43]。此次汶川大地震由于主要发生在山区,大地震引发的崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害造成了受灾地区林地垮塌、林木倒伏、林木毁损的情况十分严重。据国家林业局发布的数据,仅四川省林地毁损就高达 25.3 万 hm^2 。

山地森林虽然受地震的影响较大,但如果条件适宜的话,恢复还是比较快。根据 Lin 等对于台湾南投县集集地区 9.21 地震后的山地植被恢复研究表明,地震一年后,滑坡体的植被自然演替恢复速率就可达到 47.1%^[44]。而 Lin 等的研究则表明,2 年后,覆盖率能达到 58.93%^[45]。但 5.12 地震核心灾区的山地植被恢复将会主要呈现出两种明显不同的速率。由于龙门山脉的东西两侧自然条件差异较大,东侧受东南季风的影响,并且与“华西雨屏”带的北段重叠,气候温暖湿润,原有植被条件较好^[46]。因此可以预计,龙门山脉东侧的山区森林植被将可以较快的速度自然恢复。而西侧属于青藏高原东缘的高山峡谷区,由于焚风效应的作用,气候总体上干凉,河谷底部存在着大量的干旱河谷植被^[5]。因此,在龙门山脉西侧,除自然条件稍好的中山带(1800~2500m)外,河谷和亚高山地区植被的自然恢复速率都将很低,甚至在某些地段,如果没有辅以工

程措施,植被在短时间内将很难恢复。

2.2 草地

由于草地植被的植株具有体量小、生物量低的特点,相比于森林生态系统而言,受地震的影响较小。地震对于山地草地生态系统的影响同森林一样,也主要是通过对地形地貌的改变和重新塑造来实现的。滑坡、坍塌、泥石流等山地次生灾害同样是草地的最大威胁,可能造成草地的局部消亡或受损。此外,虽然目前还缺乏有关地震对草地生态系统生物地球化学循环影响方面的研究。但可以预见,地震对土壤温度以及地下水文的影响,都将深刻影响草地的碳、氮循环和水循环。

根据“国家汶川地震灾后恢复重建总体规划公开征求意见稿”中的数据,此次汶川地震后,受灾地区需要修复的草地面积高达 15.53 万 hm^2 。应该注意的是,除少量海拔在 3000m 以上的高山、亚高山草甸和龙门山脉西侧的干旱河谷灌草丛外,龙门山断裂带上的草地多为森林退化后形成的次生性草山草坡,处于植被演替的初期,只要给予一定的保护,自然恢复是比较容易实现的。

2.3 农田

农田是我国山区非常重要的一类生态系统。地震对于该系统的影响也非常显著。例如,山体的滑坡或泥石流可能掩埋农田,或冲毁农田表土层,而农田土壤的流失可能造成土壤有机质的损失,进而影响土地质量。此外,地震还可能会对山区已建成的农田基础设施造成严重损毁。

据国家汶川地震灾后重建规划组发布的数据,此次汶川地震的受损农田面积高达 10 多万 hm^2 。由于水田多分布在河谷平坝地区,因此此次地震受损的农田多为旱田,特别是在龙门山的西侧,坡耕地受损的情况十分严重。同时,地震还造成了山区大量在田夏收作物无法收获,严重破坏了相当一部分的坡面蓄排水设施和田间灌溉渠。总之,地震对农田生态系统的破坏加剧了原本人地矛盾就比较紧张的山区农业发展与灾后生产恢复的困难性,使山区的环境承载力降低,生态保护与经济矛盾的矛盾变得更加突出^[13]。

2.4 河流

地震对河流生态系统最为直接的影响主要表现在由于地震引发的山地次生灾害,泥沙与砾石大量输入,造成河道淤塞,河床抬高,破坏了水体容量,削弱了区域防洪能力;也可能由于地震对地质环境的改变,致使河流改道,改变水资源的时空分布;甚至在某些地段可能形成堰塞湖,严重威胁下游安全。许炯心的研究表明,黄土高原地震的频发期往往也是下游河道决溢的频发期,二者变化具有明显的同步性^[47]。这主要是因为地震过程中常常触发一系列的滑坡和崩塌,使大量泥沙直接进入沟道和各级河道,使河流泥沙在短时间内急剧增多,当到达一定程度后,造成了下游河道的决溢。

地震活动及次生地质灾害还可能破坏河床与河岸带植被,影响水流量及流速,改变水环境与河流生态系统结构,并在一定程度上恶化区域水质。例如,此次汶川地震中,地震使大量泥沙、石块等物质进入水体,造成水体中悬浮物大量增加;唐家山堰塞湖泄流时绵阳监测断面水质浊度曾达到 700 以上,严重影响了水体质量;而青川、平武等地矿坑、矿井的积水外溢,造成了嘉陵江部分河段长达 2 个月以上的污染,严重影响了沿岸的生产和生活用水。

地震还会影响河流水体的理化性质。据 Liu 和 Sheu 对于 1999 年台湾 9.21 地震前后河流水体的化学性质变化研究发现,地震前 14 个月,水体中 K 和 Ca 的含量降低,而同期 NH_4 的含量却增加,这被认为是与地震有关^[35]。实际上,目前普遍认同的观点是,由于地震前应力的变化,往往会导致相当长一段时期内水位循环的混乱,进而造成水体化学性质的改变^[48, 49]。同时,地震也能通过影响水温,进而影响许多河流生态过程的速率来影响流域生态功能^[50, 51]。

此外,地震造成的污染物输入会严重影响水体质量,造成水体富营养化,加剧河流污染。根据地震后土耳其 Izmit 海湾的调查发现,由于沿岸石油精炼厂地震后发生燃烧,相当一部分原油泄漏到海水中,并持续了几天之久,从而导致海湾表面沉积物中多环芳烃的含量明显增多,而溶解氧的含量急剧降低,海水受污染严重^[52~55]。

此次汶川地震对河流生态系统造成了严重影响。首先,由于受灾地区河流多处在流域的上游位置,其水体质量对中、下游地区影响很大。而由地震引发的滑坡、塌方、泥石流明显造成了水体中悬浮物的急剧增加;河流沿岸由于地震产生的污染物(主要包括生活垃圾、生活污水、腐烂动物尸体、泄露的化学物质以及防疫过程中使用的大量消毒剂、灭菌剂等)也随着降水过程,以面源污染的方式进入到水体中,加剧了河流污染。据初步统计,此次地震后有关部门在灾区共计派发了近 1000t 的消杀药品。其次,在上游主震区,形成了多达 34 处的大型堰塞湖,且多数成串珠状分布,具有级联效应,严重危害着下游沿岸城镇、村庄和其它基础设施的安全^[56]。

3 地震对山地生物多样性的影响

山地由于具有浓缩的环境梯度和高度异质化的生境、相对较低的人类干扰强度,以及在地质历史上常成为大量物种的避难所和新兴植物区系分化繁衍的摇篮,因此发育和保存着较高的生物多样性^[7, 57~60]。

地震可能会直接造成山地野生动植物的死亡、受损,或造成栖息地质量衰退,威胁物种的生存。地震也可能改变部分珍稀动物的食物结构和生活习性,直接导致其数量的减少。更为重要的是,由于地震对于原有地形地貌的改变,可能会使原有的廊道区域受到阻碍,从而割裂种群的连通性,形成严重的生境隔离,而生境隔离是造成生物多样性丧失的最重要原因^[61, 62]。另一方面,正如 Losey 所指出的,地震对于自然生态系统来说无疑是干扰的一种方式,因而在某些地区也可能促使生物多样性的增加^[63, 64]。

5.12 汶川大地震的重灾区位于岷山-横断山生物多样性保护的关键地区,是大熊猫、川金丝猴、四川红杉等多种国家珍稀动植物的重要生境区域,是“天府之国”甚至长江上游重要的生态屏障^[5]。龙门山断裂带上生物多样性的重要特征在于其特有现象十分明显。据不完全统计,该区至少分布着维管束植物 4 600 种,苔藓植物 400 多种,脊椎动物 252 种^[13]。据地震前一年对龙门山脉主峰-九顶山西坡 2000 ~ 4200m 样带的调查,共有种子植物 94 科、333 属、687 种。特别值得注意的是,这些物种中,有 367 种为中国特有种,占物种总数的 53.42%;其中又有半数以上的物种属于中国西南特有种或横断山区特有种^[65]。而由于龙门山东坡属于温暖湿润的森林区气候,物种丰富程度要远高于西坡^[66]。另外,在本区内的中国特有哺乳类动物占我国特有哺乳类动物的 40%,中国特有鸟类占全国特有鸟类的 43%^[46]。

5.12 汶川大地震造成了灾区山地植被的大量破坏,致使景观破碎程度显著增加,并形成大量面积变小的“孤岛”。由于景观斑块之间的连通性降低,就增加了生物个体的死亡率,种群获取食物的可能性也随之降低。这种隔离对于受灾地区的野生动物是很大的潜在威胁。此外,地震后在河流上游形成的堰塞湖也会造成下游河流干涸,湿地生态系统萎缩,原有的鱼类、两栖类动物甚至水生植物将会大量致死;而地震造成的河流、沟渠改道,又使得一些野生动物的迁徙成了问题。

4 地震对山地景观的影响

山区由于气候和土壤的垂直地带性,往往形成排列有序的生物垂直带谱;另一方面,山区常见的滑坡、泥石流、山崩等地貌过程又常常导致局部生境发生变化,从而形成局部地区植被景观的高度异质性^[23, 67]。因此,异质生境和地貌过程形成的山地垂直带和镶嵌的山地景观,是山地的主要特征之一。

地震对山地景观能否产生显著的影响,取决于地震产生的扰动有没有超过原有景观的反应阈值。当扰动的规模和强度高于阈值时,原有景观及其格局才会发生质的变化,从而导致景观中各类资源的改变和景观结构的重组^[68, 69]。

地震可能会造成山地森林大面积或局部的破坏,造成林相破碎,原有景观受损。地震引发的滑坡、坍塌、泥石流等次生灾害,可能严重破坏原有地表植被和地貌形态,甚至形成新的创面,彻底改变原有景观。此外,地震造成的原有景观的破碎化加剧,低质量景观斑块数量显著增加。张俊斌等的研究表明,台湾 9.21 地震对森林集水区土地利用的空间格局产生了重大影响,造成了整体土地利用/覆盖类型呈现较大的破碎化^[70]。

5.12 汶川大地震,由于主要发生在岷江上游高山峡谷、四川盆地周边山地以及秦巴山地,地质构造复杂,属于滑坡和泥石流等山地灾害的多发区^[56],因此地震对原有山地景观的破坏十分明显。

5 地震对山地区域生态安全的影响

山地生态系统由于自然环境脆弱,稍有不慎,就会造成对山区及其下游地区环境的破坏^[7]。5.12 汶川大地震受损严重的生态重灾区位于岷江、沱江、嘉陵江、涪江的发源地,是重要的水源涵养地和水土保持区,具有重要的生态服务功能,也是长江上游生态屏障的重要组成部分。因此,即便是主震区位于山区的地震,其影响也不仅仅局限在山地,同时也会因特有的下游效应(down-stream effect)对其它地区产生直接或间接的影响^[71]。

地震可能会加剧区域的水土流失。地震活动对原有的地质构造起着迭加和破坏作用,并加速山体失稳和岩石性质的破坏,同时为干燥剥蚀和机械风化作用提供了更有利的条件,促使不良地质现象发育,从而为流域产沙和河道输沙提供更多的物质条件。此外,地震活动还直接破坏自然边坡的稳定,导致岸坡坍塌。这些都严重威胁着下游地区的安全。而在地震山区的恢复重建过程中,把土石推进了山涧、河谷也是非常普遍的现象,这些都将严重威胁自然河道,增加河流的输沙量。

地震可能会影响下游的水源供给。例如,长江上游的重要支流岷江、涪江和沱江的水源区正好位于此次汶川特大地震的极重灾区,地震导致的地质结构改变有可能引发地表水和地下水的关系出现新的变化,从而改变河流对下游的水供给水平。此外,由于在地震灾害的发生、救灾以及恢复重建的过程中不同程度地增加了新的污染源,再加上水文情势的变化,也很可能会导致流域水环境的污染,从而减少有效引水量。

地震还会损害原有山地生态系统的功能。由于地震而导致的植物群落、植被景观的退化,以及引发的原有系统空间格局的演变,将造成区域生态系统服务功能的衰退。而这之中,主体功能(水源涵养、水土保持、生物多样性保护以及旅游景观服务功能等)的丧失和受损对于区域生态安全的影响最大。例如,汶川 5.12 大地震,27 000 多次余震(截止 8 月 28 日)构成了比较强烈而持续的干扰过程,区域景观结构与功能受到强烈扰动,造成山地植被的严重破坏,进而降低了山地生态系统的碳汇储备能力和水源涵养功能。由于区域生态环境质量的下降,还对该区域的生态旅游业造成了直接的影响。据初步统计,震后仅四川省的旅游业直接经济损失高达 800 亿元以上。

6 结语

目前已有的关于地震对山地生态系统的研究表明,地震造成的山地生态系统退化实际上是地质活动与山地表生过程综合驱动的结果^[13]。山地生态系统受地震影响的程度除了与地震强度、频率直接相关外,也明显与原有的地质构造以及自然生态系统状况紧密相关。一般来说,在山区原有地质构造是成灾程度的首要因素,山区生态系统退化与景观破坏最为严重的区域往往与地质灾害发生强度大、频率高的区域一致。

我国是个多山国家,而这些山地尤其是西部山地往往也是地震多发的区域。但目前有关地震对山地生态系统影响的相关研究还十分匮乏,至今仍有许多具体的生态学过程和机理尚不清楚。建议,围绕 5.12 汶川大地震,可以重点开展多方面的研究。

6.1 地震对典型山地生态系统的影响

加强山地森林、草地、河流等典型生态系统的研究,重点开展震前震后生态系统结构与功能变化,生物多样性的维持、演变和丧失以及地震引发的地貌过程与群落演替协同性研究,并针对植物群落和关键环境因子就地开展相应的长期监测工作。值得注意的是,此次地震主灾区的自然生态环境区域性特点非常明显。如地震灾区东南部是著名的华西雨屏带,雨泽充沛,自然条件优越;西北部气候干燥,属于典型的干旱河谷生态脆弱区。因此,研究的重点应该集中在龙门山山脉的西部区域。

6.2 地震对生物地球化学循环的影响

针对山地森林和草地生态系统,开展地震前后碳蓄积和碳循环过程的变化研究;针对河流水体,分析关键物质的化学迁移和转化过程;针对地下水资源,揭示震前震后水文循环过程的变化规律。重点研究植被受损对生态系统物质循环和能量流动的作用。

6.3 地震对关键物种的影响分析

针对地震灾区内关键保护物种,监测重点动植物物种和类群的物种丰富度、种群动态变化,分析地震对

于其物种迁徙、栖息地、食源等的影响,以及它们对于地震的响应策略、方式和途径。重点开展行为生态学研究,并围绕地震所造成的生境隔离开展廊道建设工作。例如,此次 5.12 地震灾区的龙门山西侧茂县土地岭一带是大熊猫岷山地区 A、B 种群汇聚的区域,地震不仅对现有的大熊猫交流廊道产生新的隔离障碍,而且对熊猫主食竹造成了不同程度的破坏。因此在这一区域围绕大熊猫种群开展研究和恢复重建工作,具有较高的科学价值和现实意义。

6.4 地震对典型生态系统服务功能的影响

在对灾区典型生态系统损害、地质环境状况及变化、土地资源存量及损失等的调查基础上,综合不同学科、不同尺度的研究和数据,明析不同类型生态系统受损的空间分布特征,并评估由地震造成的山地典型生态系统服务功能的损失及承载力的下降。重点研究地震受损地在水源涵养、水土保持、碳获取和其他服务功能方面与原生态系统的差异。

6.5 震后典型山地生态系统恢复重建技术

针对地震造成的林地毁损、山体裸露、水源涵养功能下降、野生动植物栖息地破坏以及泥石流等次生灾害,开展以植被恢复为主的生态工程以及土壤恢复技术、生境恢复技术、污染控制技术等方面的研究。重点针对公路、农田、河道、村寨、旅游景点等关键地段开展攻关,并科学评估大范围的森林种植和新的保护地建设可能带来的环境收益。

References:

- [1] Yuan Y, Wang L, Bai H L. Seismic disaster and its diversity in China. *Journal of Natural Disasters*, 2001, 10 (1): 59—64.
- [2] Liu K, Liao S B, Zhang S. Spatial Distribution of Earthquake Frequency and Seismic Intensity in China. *Progress in Geography*, 2008, 27 (3): 13—18.
- [3] Hu A G. The period to combat extraordinarily earthquake calamities. *Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences)*, 2008, 23 (4): 5—14.
- [4] Halvorson S J, Hamilton J P. Vulnerability and the Erosion of Seismic Culture in Mountainous Central Asia. *Mountain Research and Development*, 2007, 27(4): 322—330.
- [5] Wu N. Restoration and Reconstruction of Degraded Mountain Ecosystem on the Upper Minjiang River. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2007.
- [6] Mountain Agenda. An Appeal for the Mountains. University of Bern, 1992.
- [7] Fang J Y, Shen Z H, Cui H T. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 2004, 12 (1): 10—19.
- [8] Ren M E. Outline of China's Physical Geography. Beijing: Business Press, 1982.
- [9] Editorial Committee for Physical Geography of China, CAS. Physical Geography of China: A General Summary. Beijing: Science Press, 1985.
- [10] Barazangi M, Dorman J. World seismicity map of ESSA coast and geodetic survey epicenter data for 1961—1967. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1969, 59: 369—380.
- [11] Li S B. Earthquakes in China. Beijing: Seismological Press, 1981.
- [12] Yan J Q, Chen J G, Hao Y Q. Comments on the seismicity in China. *Recent Developments in World Seismology*, 2000, 2: 1—4.
- [13] Bao W K. Ecological Degradation and Restoration and Reconstruction Countermeasures for Severe Calamity Regions in Wenchuan Earthquake in Sichuan. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2008, 23 (4): 324—329.
- [14] UNEP/WCMC (World Conservation Monitoring Centre). Mountains and Mountain Forests. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [15] Zhong X H. Study of protection and construction of mountain ecological security barrier in China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26 (1): 2—11.
- [16] White I D, Mottershead D N, Harison S J. Environmental system (second edition). London: Chapman & Hall, 1992.
- [17] Zhou J S. Fragility of mountain ecosystem and desertification. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12 (1): 10—16.
- [18] Han D Y, Wei Y Z. Earthquake disaster of ecosystem and its mechanism. *Recent Developments in World Seismology*, 2007, 1: 16—24.
- [19] Wei L, Shan J S, Zhu X Q. Preliminary analysis of the impact of forest cover on landslide triggered by torrential rainfall. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2006, 29 (1): 29—33.
- [20] Bao W K, Pang X Y. Ecological Degradation in the Wenchuan Earthquake Seriously Affected Region in Sichuan, China. *Chinese Journal of*

- Applied & Environmental Biology, 2008, 14 (4): 441—444.
- [21] Jongman R H G, Braak C J F, Tongeren O F R. Data analysis in community and landscape ecology. Wageningen: Pudoc, 1987.
- [22] Pinder J E, Kroh G C, White J D, Basham A M. The relationships between vegetation types and topography in Lassen Volcanic National Park. Plant Ecology, 1997, 131: 17—29.
- [23] Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. An analysis of the topographical patterns of the chief woody species at Dalaoling mountain in the three gorges region. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24 (5): 581—589.
- [24] Guo L, Yu S X, Xia B C, Xu Z R. Analysis of the multi-scale effect of topography on forest landscape pattern of mountains. Journal of Mountain Science, 2006, 24 (2): 150—155.
- [25] Veblen T T, Ashton D H. Catastrophic influences on the vegetation of the Valdivian Andes, Chile. Vegetatio, 1978, 36: 149—167.
- [26] Garwood N C, Janos D P, Brokaw N. Earthquake-caused landslides: a major disturbance to tropical forests. Science, 1979, 205: 997—999.
- [27] Johns R J. The instability of the tropical ecosystem in New Guinea. Blumea, 1986, 31: 341—371.
- [28] Xu Q H, Feng Y J, Shi J S. Research of paleo-earthquake that caused the subsidence of paleo-forest on the seafloor in Shenhuan Bay, Fujian Province. Seismology and Geology, 2001, 23 (3): 367—380.
- [29] Sidle R C, Pearce A J, O'Loughlin C L. Hillslope stability and land use. Washington: American Geophysical Union Water Resources, 1985.
- [30] Diez A G, Salas L, Teran J R D, Cendrero A. Late quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region, Spain. Geomorphology, 1996, 15: 291—309.
- [31] Glade T. Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand. Catena, 2003, 51: 297—314.
- [32] Restrepo C and Alvarez N. Landslides and Their Contribution to Land-cover Change in the Mountains of Mexico and Central America. Biotropica, 2006, 38(4): 446—457.
- [33] Allen R B, Bellingham P J, Wiser S K. Immediate damage by an earthquake to a temperate montane forest. Ecology, 1999, 80 (2): 708—714.
- [34] Kitzberger T, Veblen T T, Villalba R. Tectonic influences on tree growth in northern Patagonia, Argentina: the roles of substrate stability and climatic variation. Canadian Journal of Forest Research, 1995, 25: 1684—1696.
- [35] Liu C P, Sheu B H. Effects of the 921 earthquake on the water quality in the upper stream at the Guandaoshi experimental forest. Water Air and Soil Pollution, 2007, 179: 19—27.
- [36] Binkley D, Stottlemeyer R, Suarez F, Cortina J. Soil nitrogen availability in some arctic ecosystems in Northwest Alaska: Responses to temperature and moisture. Ecoscience, 1994, 1: 64—70.
- [37] Stottlemeyer R, Toczydlowski D. Seasonal relationships between precipitation, forest floor, and streamwater nitrogen, Isle Royale, Michigan. Soil Science Society of America, 1999, 63: 389—398.
- [38] Illeris L, Jonasson S. Soil and plant CO₂ emission in response to variations in soil moisture and temperature and to amendment with nitrogen, phosphorus, and carbon in Northern Scandinavia. Arctic and Alpine Research, 1999, 31: 264—271.
- [39] Pearce A J, O'Loughlin C L. Landsliding during a M7.7 earthquake: influence of geology and topography. Geology, 1985, 13: 855—858.
- [40] Jacoby G C, Sheppard P R, Sieh K E. Irregular recurrence of large earthquakes along the San Andreas fault: evidence from trees. Science, 1988, 241: 196—200.
- [41] Nakashizuka T, Iida S, Suzuki W, Tanimoto T. Seed dispersal and vegetation development on a debris avalanche on the Ontake volcano, Central Japan. Journal of Vegetation Science, 1993, 4: 537—542.
- [42] Pickett S T A, White P S. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. New York: Academic Press, 1985.
- [43] Merrens E J and Peart D R. Effects of hurricane damage on individual growth and stand structure in a hardwood forest in New Hampshire, USA. Journal of Ecology, 1992, 80: 787—795.
- [44] Lin C Y, Lo H M, Chou W C, Lin W T. Vegetation recovery assessment at the Jou-Jou Mountain landslide area caused by the 921 Earthquake in Central Taiwan. Ecological Modelling, 2004, 176: 75—81.
- [45] Lin W T, Chou W C, Lin C Y, Huang P H, Tsai J S. Vegetation recovery monitoring and assessment at landslides caused by earthquake in Central Taiwan. Forest Ecology and Management, 2005, 210: 55—66.
- [46] Zhuang P, Gao X M. The concept of the rainy zone of west China and its significance to the biodiversity conservation in China. Biodiversity Science, 2002, 10 (3): 339—344.
- [47] Xu J X. Historical sediment-related disasters in the lower Yellow River in relation with drainage basin factors (II): influence of human activities, earthquakes and landforms. Journal of Natural Disasters, 2001, 10 (3): 7—12.
- [48] Tsunogai U, Wakita H. Precursory chemical changes in groundwater: Kobe earthquake, Japan. Science, 1995, 269: 61—63.
- [49] Toutain J P, Munoz M, Poitrasson F, Lienard A C. Springwater chloride ion anomaly prior to ML=5.2 Pyrenean earthquake. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 149: 113—119.

- [50] Ward J, Stanford J A. Thermal responses in the evolutionary ecology of aquatic insects. *Annual Review of Entomology*, 1982, 27: 97—117.
- [51] White D S, Elzinga C H, Hendricks S P. Temperature patterns within the hypohetic zone of a northern Michigan river. *Journal of the North American Benthological Society*, 1987, 6: 85—91.
- [52] Okay O S, Tolun L, Telli-Karakoe F, Tufekci V, Tufekci H, Morkoc E. Izmit Bay ecosystem after Marmara earthquake and subsequent fire; the long-term data. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42: 361—369.
- [53] Okay O S, Tolun L, Telli-Karakoe F, Tufekci V, Tufekci H, Olgun A, Morkoc E. The changes of T-PAH levels and health status of mussels in Izmit bay (Turkey) after Marmara earthquake and subsequent refinery fire. *Environment International*, 2003, 965: 1—5.
- [54] Balkis N. The effect of Marmara (Izmit) Earthquake on the chemical oceanography of Izmit Bay, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46: 865—878.
- [55] Tolun L, Martens D, Okay O S, Schramm K W. Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in coastal sediments of the Izmit Bay (Marmara Sea): Case studies before and after the Izmit Earthquake. *Environment International*, 2006, 32: 758—765.
- [56] Cui P, Wei F Q, He S M, You Y, Chen X Q, Li Z L, Dang C, Yang C L. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26 (3): 280—282.
- [57] Messerli B, Ives J D. *Mountains of the World: A Global Priority*. New York: The Parthenon Publishing Group, 1997.
- [58] Kjmor C. Why are there global gradients in species richness? Mountains Might Hold the Answer. *TREE*, 2000, 15: 513—514.
- [59] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403: 853—858.
- [60] Ying T S. Species diversity and distribution pattern of seed plants in China. *Biodiversity Science*, 2001, 9 (4): 393—398.
- [61] Xiao Y, Ouyang Z Y, Zhu C Q, Zhao J Z, He G J, Wang X K. An assessment of giant panda habitat in Minshan, Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (7): 1373—1379.
- [62] Noss R F, Copperrider A Y. *Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring Biodiversity*. Washington D C: USA Island Press, 1994.
- [63] Losey R J. Earthquakes and tsunami as elements of environmental disturbance on the Northwest Coast of North America. *Journal of Anthropological Archaeology*, 2005, 24: 101—116.
- [64] Reice S R. *The Silver Lining: The Benefits of Natural Disasters*. Princeton: Princeton University Press, 2001.
- [65] Tu W G, Gao X F, Liu S H, Wu N. Floristics of vascular plants on the west slope of Mt. Jiuding in Wenchuan, Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14 (3): 298—302.
- [66] Liu S H, Gao X F, Tu W G, Fang Z Q, Hu D M, Li X G. α diversity of communities and their changes along altitude gradient in the Baishuihe National Nature Reserve on the Longmen Mountains, Sichuan. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14 (3): 303—307.
- [67] Swanson F J, Kratze T K, Caine N. Landform effects on ecosystem patterns and processes. *BioScience*, 1988, 38: 92—98.
- [68] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [69] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Wang Y L. *Principle and application of landscape ecology*. Beijing: Science Press, 2001.
- [70] Zhang J B, Liang D Q, Lin F Q, Huang Y R. Application of ecological quantitative methods to analyze landscape change in forest watershed. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13 (2): 81—83.
- [71] Li S C, Cui J W, Qiao S, Wang Y L. Impact of seismogeological disaster to the comprehensive development of rivers in Yunnan. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24 (2): 140—145.

参考文献:

- [1] 袁艺,王理,白海玲. 中国的地震灾情及其区域分异. *自然灾害学报*, 2001, 10(1): 59~64.
- [2] 刘凯,廖顺宝,张赛. 中国地震发生频率与烈度的空间分布. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 13~18.
- [3] 胡鞍钢. 特大地震灾害的应对周期. *清华大学学报(哲学社会科学版)*, 2008, 23(4): 5~14.
- [5] 吴宁. 山地退化生态系统的恢复重建——理论与岷江上游的实践. 成都: 四川科学技术出版社, 2007.
- [7] 方精云,沈泽昊,崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. *生物多样性*, 2004, 12(1): 10~19.
- [8] 任美镔. *中国自然地理纲要*. 北京: 商务印书馆, 1982.
- [9] 中国科学院《中国自然地理》编委会. *中国自然地理总论*. 北京: 科学出版社, 1985.
- [11] 李善邦. *中国地震*. 北京: 地震出版社, 1981.
- [12] 鄢家全,陈家庚,郝玉芹. 中国地震活动性述评. *国际地震动态*, 2000, 2: 1~4.
- [13] 包维楷. 汶川地震重灾区生态退化及其恢复重建对策. *中国科学院院刊*, 2008, 23(4): 324~329.
- [15] 钟祥浩. 中国山地生态安全屏障保护与建设. *山地学报*, 2008, 26 (1): 2~11.
- [17] 周劲松. 山地生态系统的脆弱性与荒漠化. *自然资源学报*, 1997, 12 (1): 10~16.

- [18] 韩东银,魏英祖. 生态系统地震灾害及其深层机制. 国际地震动态,2007,1:16~24.
- [19] 魏丽,单九生,朱星球. 植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析. 气象与减灾研究,2006,29(1):29~33.
- [20] 包维楷,庞学勇. 四川汶川大地震重灾区灾后生态退化及其基本特点. 应用与环境生物学报,2008,14(4):441~444.
- [23] 沈泽昊,张新时,金义兴. 三峡大老岭地区主要木本植物分布的地形格局. 植物生态学报,2000,24(5):581~589.
- [24] 郭砾,余世孝,夏北成,许佐荣. 地形对山地森林景观格局多尺度效应. 山地学报,2006,24(2):150~155.
- [28] 徐起浩,冯炎基,施建生. 导致古森林沉没于海的福建深沪湾古地震研究. 地震地质,2001,23(3):367~380.
- [46] 庄平,高贤明. 华西雨屏带及其对我国生物多样性保育的意义. 生物多样性,2002,10(3):339~344.
- [47] 许炯心. 黄河下游历史泥沙灾害的宏观特征及其与流域因素和人类活动的关系(II)——人类活动、历史地震及地形因子的影响. 自然灾害学报,2001,10(3):7~12.
- [56] 崔鹏,韦方强,何思明,游勇,陈晓清,李战鲁,党超,杨成林. 5.12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施. 山地学报,2008,26(3):280~282.
- [60] 应俊生. 中国种子植物物种多样性及其分布格局. 生物多样性,2001,9(4):393~398.
- [61] 肖赓,欧阳志云,朱春全,赵景柱,何国金,王效科. 岷山地区大熊猫生境评价与保护对策研究. 生态学报,2004,24(7):1373~1379.
- [65] 涂卫国,高信芬,刘士华,吴宁. 九顶山西坡汶川段维管植物区系研究. 应用与环境生物学报,2008,14(3):298~302.
- [66] 刘士华,高信芬,涂卫国,方志强,胡大明,李兴贵. 彭州白水河国家级自然保护区植物群落 α 多样性的海拔梯度变化. 应用与环境生物学报,2008,14(3):303~307.
- [69] 傅伯杰,陈立顶,马克明,王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京:科学出版社,2001.
- [70] 张俊斌,梁大庆,林法勤,黄忆汝. 应用生态计量方法分析森林集水区之景观变迁. 水土保持研究,2006,13(2):81~83.
- [71] 李世成,崔建文,乔森,王洋龙. 云南山地地震地质灾害对河流综合开发的影响. 地震研究,2001,24(2):140~145.