

“5.12”汶川地震极重灾区灾后 十年生态恢复状况评估

杨渺^{1,2} 江腊海¹ 侯鹏³ 翟俊³ 祝汉收³ 谭婷¹ 李波¹¹

(1. 四川省生态环境科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 中科院生态环境研究中心, 北京 100085;

3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100090)

【摘要】:汶川地震发生10年后,通过对极重灾区生态系统类型解译和地面植被样方调查,GPP、LAI反演,以及对土壤有机质、全氮、全磷、全钾和速效氮、速效磷、速效钾含量的测定与分析,综合评估了极重灾区植被和土壤恢复情况。结果表明:区域生态系统总体趋于稳定向好的恢复态势。2017年的裸露地面积虽高于震前(2007年),但相对于震后(2008年后)已有所减少。从生态系统质量上来看:GPP、LAI均值在2014年以后呈持续缓慢上升状态,反映了区域生态系统总体良好的恢复力。但是部分在地震中损坏的森林生态系统,仍未恢复到原来状态。成都平原区域部分农田转变为城镇建设用地。至2017年,地震破坏迹地植物种类明显增加。但仍以蔷薇科、菊科和禾本科等先锋物种为主,与2009年的调查结果相似。地震破坏迹地的群落结构已得到了较好的恢复。垂直分层方面,除干旱河谷区域群落结构仅草本或灌草结合1个层次外,其余区域的群落结构已经形成乔木-灌木-草本3个层次;土壤肥力状况总体上对照点优于受损点,受损点土壤肥力状况仍呈恶化状态。地震造成的土壤裸露,加速了矿化过程,短期内受损点速效营养元素含量的增加,长期来看将导致营养元素的流失,土壤肥力下降。在加强地质灾害监管,预防次生灾害的基础上,龙门山前华西雨屏一带,自然植被应坚持自然恢复为主。干旱河谷区域可以按照“因地制宜,适地适树”原则,采取适当人工恢复措施,同时注意改善土壤养分条件,促进植被恢复;城镇建设过程中应加强国土空间管控,保护基本农田。同时,应加强对生态保护红线,以及包括基本农田在内的各级各类保护地的监管。

【关键词】:汶川地震 生态系统结构 土壤元素 群落结构

【中图分类号】:X171.4 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2020)11-2541-10

2008年5月12日,四川省汶川发生了8.0级特大地震,对生态系统造成巨大破坏。汶川县、北川县、绵竹市、什邡市、青川县、茂县、安州区、都江堰市、平武县、彭州市等10个县市区,总面积约26410平方千米,是此次地震的极重灾区^[1],也是灾后恢复重建的重难点区域。由于地处龙门山断裂带上,地震时极重灾区受灾面积广大,基础设施损毁严重,震后地质灾害及次生灾害频发^[2~4],生态环境脆弱。

作者简介:杨渺(1976~),男,博士,研究员,主要研究方向为生态功能评估、区域规划与地理信息系统等。

E-mail:miaoy02@163.com; 侯鹏 E-mail:houpeng@163.com

基金项目:四川省重点研发项目(2017SZ0081, 2017SZYZF0007);四川省军民融合产业发展专项资金(zyf-2017-37);四川省环境保护科技计划项目(2018HB05)。

汶川地震极重灾区垂直地带变化明显,生态系统类型多样,是四川省生物多样性最丰富的区域之一。该区域有全省 27.5%的野生维管束植物物种数、全省 49.7%的野生脊椎动物物种数、全省 31.1%的国家重点保护野生植物物种数;全省 50.9%的国家重点保护野生动物物种数;全省中国特有种物种记录数的 30.1%也分布在这一区域。同时,汶川地震极重灾区水系发达,是许多重要河流的发源地和上游区域。

由于极重灾区在生物多样性保护和长江上游生态屏障中的重要地位。不少学者针对该区域生态环境的受损程度^[5~8]及震后一段时间的生态恢复情况^[9~12],进行了相关研究。作者也参与了震后极重灾区植被和土壤调查评估工作^[13]。地震 5 年后,从水土保持功能、水源涵养功能、生物多样性维持等生态服务功能恢复的角度,研究了极重灾区在的恢复情况^[1],认为北川、安县、绵竹、彭州、什邡一带的生态系统服务功能有可能进一步恶化。震后 10 年,极重灾区生态是否恢复,对其适时进行评估,也是履行生物多样性保护行动计划和筑牢长江上游生态屏障的重要举措。朱捷缘等使用 InVEST 模型评估了生态系统服务功能,结合 VOR 模型,从生态系统健康程度^[14]的角度,研究了极重灾区生态恢复状况。限于生态系统分类、生态参数等宏观尺度数据的灵敏性,评价结果较为宏观。是否有更好角度评价生态恢复状况,在展现宏观恢复格局情况下,又能评估恢复细节?

受损生态系统恢复包括生态系统结构和功能的恢复。生态系统结构是生态系统物质循环和能量流动的基础。因此,生态系统结构恢复是生态系统服务功能恢复的基础。生态系统结构恢复主要体现在植被覆盖度、生物量和物种多样性的恢复。可以说植被恢复是受损生态系统恢复的重要表现指标^[15]。土壤和植被互为环境因子^[16],土壤养分是影响植物群落组成和群落动态的关键因素,制约生态系统的演替^[17],对土壤养分状况的分析,有助于加深植被生长动态的理解。地震对滑坡体土壤有明显的破坏作用。滑坡迹地上土壤质地、有机质和矿质元素含量等表征土壤质量的指标总体呈现下降趋势^[18],必将影响植被的恢复进程。

本研究从植被类型、群落结构和土壤养分等方面,对震后 10 年汶川地震极重灾区生态恢复状况进行评估。评估结果对于政府决策者回顾生态修复成效,制定中长期生态恢复和生物多样性保护规划,科学管理灾区生态环境,具有极其重要的现实意义。

1 数据来源与分析统计

1.1 数据获取

1.1.1 土地覆盖解译及生态参数反演

获取 2007、2008、2017 年 Landsat TM 数据、高分辨率遥感影像,基于人机交互解译方法,解译获得 2007、2008 和 2017 年共 3 个时期土地覆盖数据。解译分类体系为一级 6 类(耕地、林地、草地、水域、城镇、其它),其它类型主要包括裸地、冰川及裸岩。数据空间分辨率 30m。基于谷歌地球开展土地覆盖解译结果抽检,每种类型手动随机抽取 5 个点位,进行目视对比,判断解译精度。本次验证共比对了 90 个点位,比对后准确的点位合计 85 个,一级土地覆盖类型分类准确率为 94.4%;获取 2000~2017 年共 18 年的 MODIS 影像数据,通过数据预处理后,合成逐月植被参数总初级生产力(GPP)、叶面积指数(LAI)产品。

1.1.2 样方调查与土壤监测

在每个极重县区选择了典型的受损点位和对照点位进行植被样方调查,记录现场环境状况及物种名录。样方调查点位同位进行土壤采样。每个点位随机取 3 个土样,充分混合后作为一个备测样品,由四川省农业科学院土壤肥料研究所进行土壤养分测定,点位情况见表 1。测定的土壤营养元素包括土壤有机质、全量元素(全氮、全磷、全钾)和速效养分(速效氮、速效磷、速效钾)。

1.2 数据分析

1.2.1 生态参数统计分析

分类统计各植被类型的面积、比例。基于 2000~2017 年近 20 年的 GPP、LAI 逐月植被参数,通过月值累积及最大值合成,生成逐年 GPP、LAI 数据。采用一元线性回归方法定量分析 2000~2008 年(2008 年 5 月前,震前)、2008~2017(2008 年 6 月后,震后)和 2000~2017,3 个时间段 GPP、LAI 植被参数的年际变化程度。计算公式如下所示:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i - \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n m_i * \sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n m_i^2 - \frac{1}{n} * (\sum_{i=1}^n m_i)^2} \tag{1}$$

式中: X_i 表示第 i 年的植被参数值, $i=1,2,3,\dots,n$; m_i 表示年份序列, $m_1=1,m_2=2,m_3=3,\cdots,m_n=n$ 。

1.2.2 土壤参数分析

对研究区内(极重灾区 10 个县市)各采样点 3 年的土壤养分数据,按表 1 进行组织。利用 Matlab2018 主成分分析^[19],分别计算全量元素(全氮、全磷、全钾)和速效养分(速效氮、速效磷、速效钾)综合主成分得分。根据综合得分对比分析对受损点和对照点的全量元素、速效养分在时间上的变化趋势和各市县之间的空间差异。

表 1 植被样方及土壤采样点位

编号	经度	纬度	县市	位置	受损类型	震前状态	恢复方式
1	31.29	103.85	彭州	谢家店	滑坡	河谷村庄	人工核桃林
2	31.31	103.87	彭州	龙门山谢家店	对照	森林砍伐迹地	—
3	31.39	103.98	什邡	九顶山自然保护区	滑坡	山体	自然恢复
4	31.39	103.98	什邡	九顶山自然保护区	对照	人工林	—
5	31.37	104.08	绵竹	玄郎沟	滑坡	山体	自然封育
6	31.37	104.09	绵竹	玄郎沟	对照	林地	—
7	31.50	104.23	安州区	雎水海绵礁保护区	崩塌滑坡	山体	人工柳杉、人工种草、自然恢复
8	31.50	104.23	安州区	雎水海绵礁保护区	对照	山体	—
9	31.84	104.43	北川	唐家山堰塞湖	滑坡、堰塞湖	山体、河流	自然恢复
10	31.84	104.43	北川	唐家山堰塞湖	对照	林地	—
11	32.18	104.82	平武	南坝镇羊龙岩	滑坡	坡耕地	自然恢复
12	32.18	104.82	平武	南坝镇羊龙岩	对照	山坡	—
13	32.41	105.12	青川	东河口	滑坡	耕地	人工复垦、自然
14	32.41	105.12	青川	东河口	对照	林地	—

15	31.56	103.72	茂县	凤毛坪村(羊毛坪)	滑坡	园地	自然恢复
16	31.56	103.72	茂县	凤毛坪村(羊毛坪)	对照	园地	—
17			茂县	大沟	破坏	人工林	自然恢复
18			茂县	大沟	对照	松林	—
19	31.48	103.60	汶川	姜维城秉里村	滑坡	山体	自然恢复
20	31.48	103.60	汶川	姜维城秉里村	对照	山体	—
21	31.10	103.56	都江堰	龙池景区	滑坡泥石流	山体	自然恢复
22	31.10	103.56	都江堰	龙池景区	对照	山体	—

表 2 土壤营养元素测定表

县市	类型	年份	有机质	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷	速效钾
汶川	受损	2011	4.95	0.259	0.101	1.95	175	1.9	93
汶川	受损	2012	6.57	0.328	0.068	1.71	246	1	86
汶川	受损	2018	1.30	0.103	0.065	1.48	54	6.8	91
汶川	对照	2011	0.99	0.053	0.045	1.79	27	2.1	33
汶川	对照	2012	1.57	0.095	0.052	1.720	58	1.5	72
汶川	对照	2018	5.96	0.272	0.069	1.645	123	4.3	91
...	...	...		...	...	...	...	...	...

在计算之前,对表 2 每种土壤营养元素值分别进行正向归一化处理。计算公式如下所示:

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad (2)$$

1.2.3 样方数据分析

采用 Excel2010 分别统计受损和对照样方内物种的科属信息,分析植被演替趋势。

2 生态系统变化分析

2.1 生态系统结构

2.1.1 生态系统类型总体变化

极重灾区的生态系统类型以森林、农田、草地居多。森林和草地主要分布在西部山区。东南部平原地带以农田为主,城镇主要位于平原区。各类生态系统类型面积如表 3 所示。

2008 年地震导致植被受损,裸地等类型面积较 2007 年增加了 285.87km²,增加比例为 31.7%。经过十年生态修复,2017 年裸地面积较 2008 年减少了 10.67%,但仍比 2007 年多了 158.11km²,增加比例为 17.53%。在区域内冰川及其它类型原生裸地面积基本不变的情况下,认为由于地震或次生灾害等原因造成的地表裸露现象,仍然比震前严重。至 2017 年,森林面积仍未恢复到震前水平。而草地面积比震前所增加,可能有部分受损裸地,其上植被已经逐渐开始恢复。

表 3 不同生态系统类型面积统计表(单位:km²)

生态系统类型	2007 年		2008 年		2017 年	
	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)
森林	18743.92	71.92	18440.41	70.75	18468.75	70.86
草地	2051.35	7.87	2120.48	8.14	2177.93	8.83
湿地	156.54	0.60	206.13	0.79	207.42	0.80
农田	3968.55	15.23	3845.35	14.75	3749.90	14.39
城镇	240.99	0.92	263.12	1.01	399.24	1.53
其他	901.77	3.46	1187.63	4.56	1059.87	4.07

2.1.2 生态系统空间变化特征

从空间上看,龙门山一带植被恢复较好。可能与位于华西雨屏区,降水条件较好有关。植被恢复较好的区域主要集中于汶川县映秀镇、银杏乡,以及映秀镇、耿达镇交界处和彭州、什邡、茂县三县交界处。2008~2017 年,茂县 4 个乡镇(洼底乡、白溪乡、回龙乡、三龙乡)沿岷江河谷地带的植被状况有了较大提升。经实地调查,主要原因是部分裸地经土地整理成为农田。

2008~2017 年,成德绵城市群(东南部平原区都江堰-安县-北川一线的平原区域)的城镇面积增加了 136.12km²,增加比例达到 51.74%。增加的城镇面积主要来自农田。

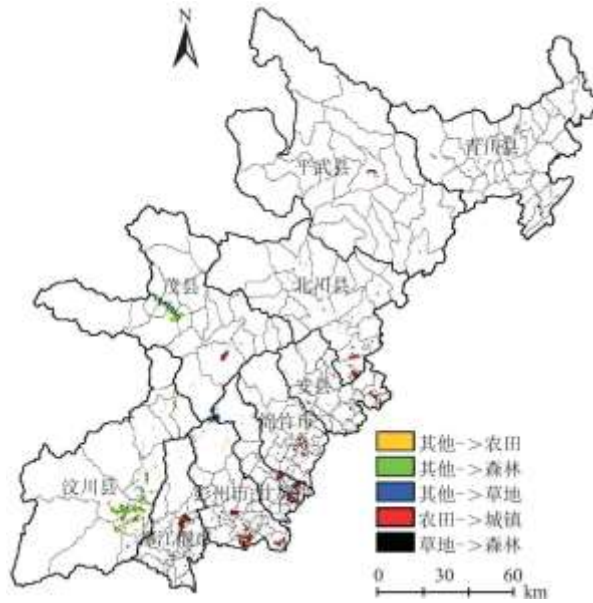


图 1 2008~2017 年植被类型及建设用地变化

2.2 生态系统质量变化

利用 2000~2017 历年的 GPP、LAI 年值, 获取极重灾区总体的历年 GPP、LAI 年值区域(求平均)并进行统计分析, 结果显示, GPP、LAI 年值变化趋势极为一致。

2.2.1 GPP、LAI 时间变化

GPP、LAI 在时间上呈增加趋势, 变化大体分为 3 个阶段(2000~2008 年稳定上升段、2008~2010 迅速下降段和 2010~2017 年波动上升段)。在前后两个时间段, 两者年均值整体都呈增加趋势。但是前半段增加趋势较小, 后半段增加趋势相比于前半段较大, 显示了区域极强的生态恢复力。后半段又以 2014 年为分界点, 2014 年以前两者处于剧烈波动上升段, 2014 年以后两者持续缓慢上升。2008~2010 年两者均连续较大幅度下降, 地震对植被损害效应持续两年之久。

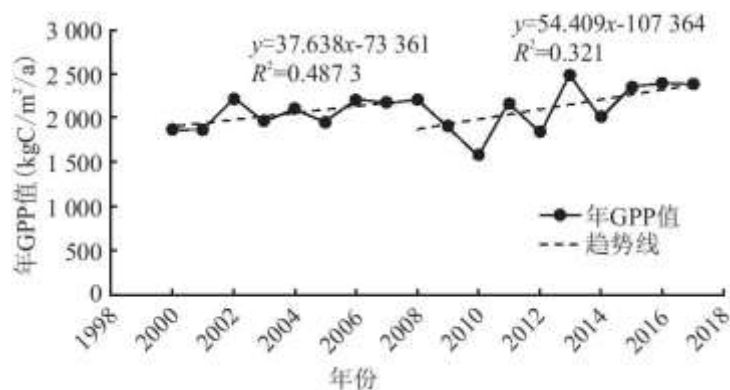


图 2 2000~2017 年极重灾区 GPP 年值变化

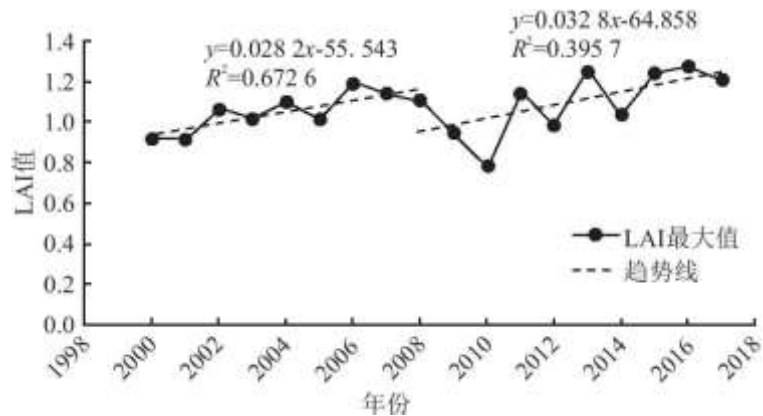


图 3 2000~2017 年极重灾区 LAI 年值变化

2.2.2 各区县 GPP、LAI 对比

分别统计 2000~2008 年(震前)、2008~2017 年(震后)和 2000~2017 年 3 个阶段汶川地震极重灾区 10 个县区年 GPP、LAI 斜率均值,结果显示,3 时间段每个县区的斜率均值均是正数,说明各县区内植被质量总体上均呈增加趋势。除北川县、平武县、茂县之外,区域 7 个县市其余几个县市 GPP、LAI 增长的斜率均高于震前,说明 7 县市植被恢复潜力较好。都江堰市、彭州市、绵竹市、什邡市等 4 个县市,震后 GPP、LAI 斜率远高于震前,说明在同等受损程度下,生态系统恢复力更高。

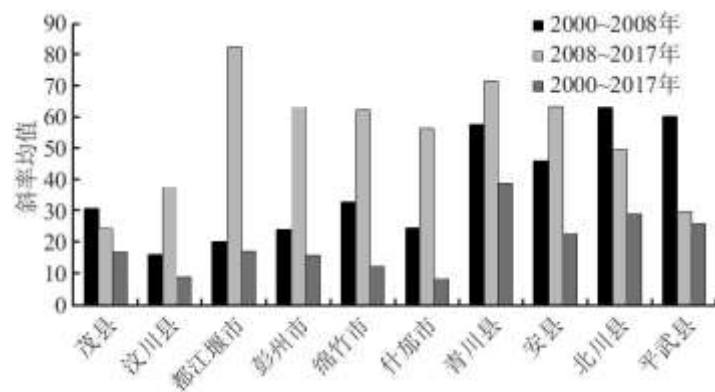


图 4 三个时期各县市 GPP 斜率均值

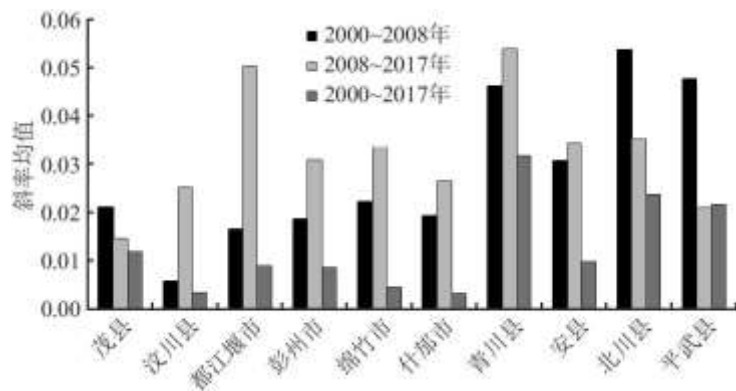


图 5 三个时期 LAI 斜率均值统计柱状图

3 植物群落结构与物种多样性

3.1 群落结构

经过 10 年恢复,地震破坏迹地上植被盖度有了较大提高。2009 年,虽然破坏迹地已有部分植物生长,但植被盖度极低;2018 年调查期间,除部分砾石堆积区和陡坡地带植被盖度较低(20%左右)外,绝大多数区域的植被盖度已在 40%以上。调查区域群落组成以灌丛和灌草丛最为丰富。群系数量达 14 个,阔叶林群系有 4 个,针叶林仅 1 个且为人工幼林。群落结构方面,除干旱河谷区域群落仅草本或灌草结合 1 个层次外,其余区域植物群落已经形成明显乔木-灌木-草本 3 个层次的结构。这表明,地震破坏迹地植物群落经过 10 年的时间已得到了较好的恢复。

3.2 物种多样性

2018 年,10 个县 24 个调查点初步记录到 112 科 436 种,而 2009 年在 51 个调查样点共记录维管植物 102 科 305 种(含走访记录物种)。经过 10 年的恢复后,受灾区域植物种类明显增加。从植物科属组成来看,地震破坏迹地以蔷薇科、菊科和禾本科植物先锋物种为主,这与 2009 年在地震灾区的调查结果相似。

4 土壤营养元素分析

4.1 受损点与对照点土壤营养元素差异分析

根据对各县土壤营养元素全氮、全磷、全钾、有机质综合状况分析,对照点土壤营养元素综合肥力状况大多优于受损点,北川、青川两县样点表现尤为明显。但位于干旱河谷的汶川样点,受损点土壤肥力状况优于对照点,与其他县市表现不同。平武受损点和对照点土壤肥力状况差别不大。

同样,通过对土壤速效养分速效氮、速效磷、速效钾的分析发现,除汶川、茂县两个采样点外,对照点土壤速效养分的综合肥力状况优于受损点。

各县市受损点、对照点土壤有机质的差异与土壤速效养分综合评分结果类似,彭州、什邡、绵竹、青川、都江堰土壤有机质含量在受损点下降明显。

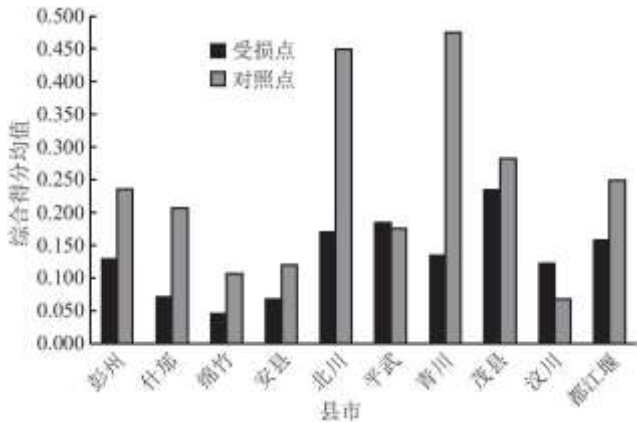


图 6 各县全量元素肥力状况综合得分图

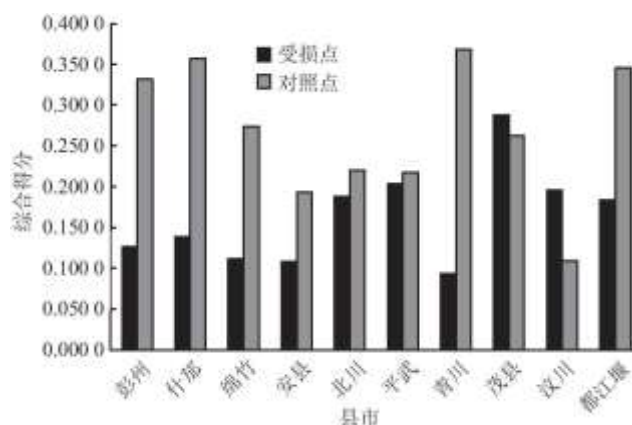


图 7 各县速效养分肥力状况综合得分图

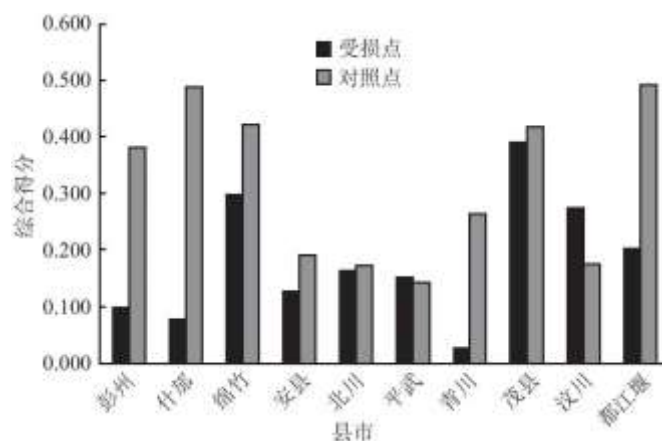


图 8 各县市土壤有机质肥力状况综合得分

4.2 受损点与对照点土壤营养元素年度变化

通过对极重灾区全量元素(全氮、全磷、全钾)和速效养分(速效氮、速效磷、速效钾)的综合分析发现。对照点土壤营养状况普遍优于受损点。

在震后整个生态恢复过程中(2011~2018 年),土壤全量元素变化分为两个阶段。2011~2012 年间,对照点含量总体下降,而受损点有所上升。2012~2018 年间,对照点与受损点的土壤全量元素变化趋势则相反,受损点总体下降,对照点则总体有所上升。

在震后整个生态恢复过程中(2011~2018 年),受损点的土壤速效养分整体状况呈现下降趋势,而对照点的土壤速效养分呈现总体上升趋势。在 2011 年,受损点速效养分整体状况要略高于对照点,可能由于植被损坏后造成的土壤裸露,加速了营养元素流失。

在震后整个生态恢复过程中(2011~2018 年),受损点、对照点土壤有机质变化趋势,以及两者关系,与土壤速效养分变化趋势较为一致。

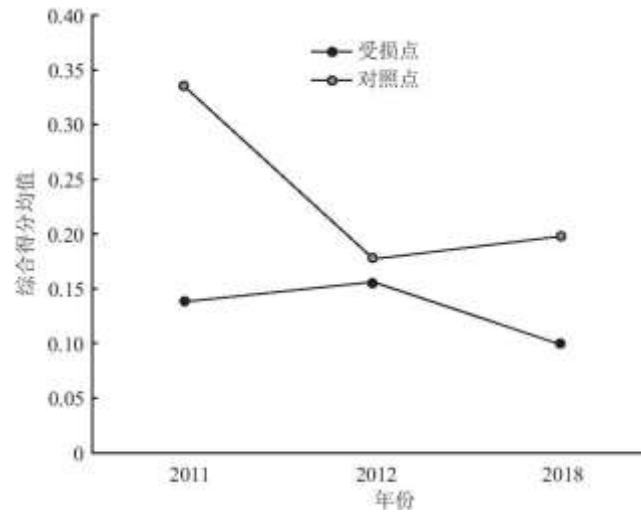


图9 全量元素整体状况年度变化图

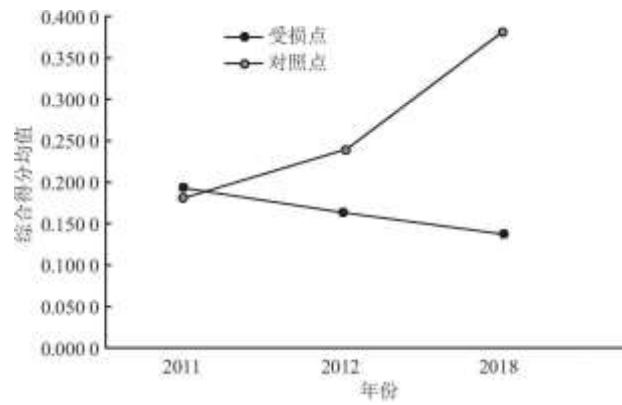


图10 速效养分综合得分年度变化图

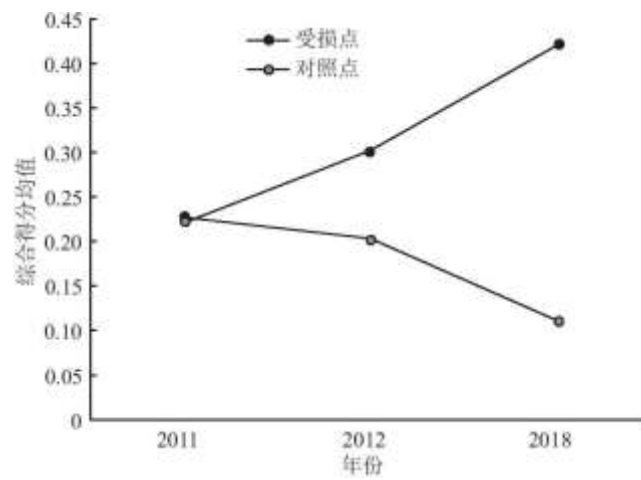


图11 土壤有机质状况年度变化图

5 结论与建议

本研究范围涵盖汶川地震极重灾区 10 个县市,时间上分 3 个阶段,前后跨度 10 年。利用遥感手段进行了生态系统结构、质量时空变化分析;利用地面调查的手段进行了植物样方调查和土壤养分测定及分析评价。根据研究结果,区域生态系统总体趋于稳定向好的恢复态势,但在生态恢复进程中,局部区域存在生态状况恶化压力。如 2019 年汶川“8·20”强降雨特大山洪泥石流灾害,导致汶川县水磨、漩口、三江、草坡等 12 个乡镇不同程度受灾。

受调查时间、天气、可达性等多种因素限制,现有学者对植被恢复过程长期观测较少^[20],且研究对象也多限于局地研究^[21,22]。本文研究区域较广,研究对象也涵盖植物恢复及土壤恢复,但也存在地面调查点位较少方面的不足。2018 年在 24 个调查点共记录到植物 112 科 436 种。如进一步考察,植物种类应该还有极大的增长空间。对不同立地条件下土壤养分恢复状况的认识也将更为深入。

5.1 生态系统及植被恢复情况

从生态系统类型上看:震后十年,地震及其次生灾害原因造成的裸露地表面积有所减少,但仍高于震前。部分在地震中损坏的森林群落,仍未恢复到森林群落状态。另外,灾区内城镇建设面积持续增加,农田面积在萎缩;从生态系统质量上来看:地震导致极重灾区的 GPP、LAI 均值在 2008~2010 两年间连续较大幅度下降。2010~2014 年,4 年间 GPP、LAI 均值呈现剧烈变化,但总体呈现上升态势,2014 年以后两者持续缓慢上升,既说明了地震对生态系统的巨大影响,又反映了区域生态系统总体良好的恢复力。从空间分布来看,龙门山一带山前区域植被恢复状况良好,华西雨屏充沛的降水为植被的恢复提供了良好条件。茂县黑水河沿岸则因采用了人工措施,植被也得到了很好恢复。

目前生态系统总体趋于稳定向好的恢复态势。从地震破坏迹地样方调查结果来看:经过 10 年时间,地震破坏迹地生态系统群落结构已得到了较好的恢复。除干旱河谷区域群落仅草本或灌草结合 1 个层次外,其余区域植物群落已经形成明显乔木-灌木-草本 3 个层次的结构。从植物科属组成来看,经过 10 年的恢复后,地震破坏迹地植物种类明显增加,但种类组成仍以蔷薇科、菊科和禾本科等先锋物种为主,与 2009 年的调查结果相似。

5.2 土壤恢复情况

根据对各县采样点土壤机质含量,以及土壤全量养分全氮、全磷、全钾综合状况;土壤速效养分速效氮、速效磷、速效钾综合状况分析,总体上对照点土壤肥力状况优于受损点,显示土壤肥力并未完全恢复。另外,通过对受损点全量元素(全氮、全磷、全钾)和速效养分(速效氮、速效磷、速效钾)的综合分析,以及土壤有机质含量分析,发现受损点土壤肥力状况仍呈持续恶化状态。

根据极重灾区 2011 年对照点和受损点速效养分的综合分析结果,地震造成的土壤裸露,加速了土壤元素释放,有可能会短期内增加土壤速效养分含量,导致营养元素加速流失。对于干旱河谷地带,矿化过程强烈的土壤来说,地震对地表的扰动,造成土壤裸露,会加速土壤矿化过程。短期内造成受损点营养元素含量的增加,但长期来看,加速的矿化过程将导致营养元素的流失,土壤肥力的下降。另外,地震对比表的扰动,导致植物残体与土壤的混合,可能是震后短期内土壤有机质增加的原因。

5.3 建议

极重灾区范围内,大多数地震受损创面已经得到一定程度的恢复,但处于演替初级阶段,种类组成以先锋植物为主,多样性不足,群落结构简单,尚未恢复到森林群落。不过已处于较为稳定的正向演替过程,生态系统质量逐步提高。

华西雨屏区充沛的降水为植被的恢复提供了良好条件,龙门山一带山前区域植被恢复状况总体良好,但也有局部地点反复遭

受次生地质灾害的损毁。在加强地质灾害监管,预防次生灾害的基础上,区域植被可以自然恢复为主。

而对于干旱河谷区域的受损点来说,区域降水稀少,蒸发量大于降水量,不利于植被自然恢复。因此,岷江沿岸有条件的区域,可采取人工措施进行恢复。就土壤条件来看,震后受损点地表裸露加剧了土壤矿化,短期内可能改善了受损点土壤养分状况,但在相当长的一个时期来看,土壤肥力存在继续恶化的倾向。因此,在进行人工植被恢复时,可以采取一定措施,改善土壤养分条件,以促进植被恢复。“5.12”汶川地震后,阿坝州按照“因地制宜,适地适树”基本原则,在茂县岷江及黑水河沿岸重点地段以乡土生态林树种为主,适当考虑经济林树种,选择抗逆性强、耐干旱、耐瘠薄、病虫害少、速生的树种,开展了一系列的生态治理、植被恢复工程项目。另外,加强了管护措施,修建了灌溉措施,并根据情况进行补植。从本次恢复状况调查评估结果来看,取得了良好效果,经验值得后期推广。

在成德绵城市群城市发展较快,城镇建设过程中应结合国土空间规划,加强国土空间管控,保护基本农田。同时,开发过程中应加强对生态保护红线,以及包括基本农田在内的各级各类保护地的监管。确保区域生物多样性功能不受人类活动因素的影响。

参考文献:

- [1] 杨渺, 谢强, 方自力, 等. “5·12”汶川地震极重灾区生态服务功能恢复总体评估[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 685-694.
- [2] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501-509.
- [3] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 341-349.
- [4] 余斌, 马煜, 张健楠, 等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 738-746.
- [5] 申国珍, 谢宗强, 冯朝阳, 等. 汶川地震对大熊猫栖息地的影响与恢复对策[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1417-1425.
- [6] 欧阳志云, 徐卫华, 王学志, 等. 汶川大地震对生态系统的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5801-5809.
- [7] 崔书红. 汶川地震生态环境影响及对策[J]. 环境保护, 2008, 399(13): 37-38.
- [8] 王文杰, 潘英姿, 徐卫华, 等. 四川汶川地震对生态系统破坏及其生态影响分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 110-116.
- [9] 张钰, 陈晓清, 游勇, 等. 汶川地震后肖家沟泥石流活动特征与灾害防治[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 284-289.
- [10] 赵聪, 梁京涛, 谢忠胜, 等. 汶川地震强震区震后 10 年泥石流活动特征遥感动态分析——以平武县石坎河流域[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 222-227.
- [11] 廖峰, 郑江坤, 赵廷宁, 等. 柏木次生林震后滑坡迹地物种多样性变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(6): 1404-1410.
- [12] 程婷婷, 辜彬. “5.12”汶川地震中都江堰生态恢复[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2019, 56(3): 563-572.
- [13] 四川省环境保护厅生态处. 四川省环境保护科学研究院. “5.12”汶川大地震极重灾区生态破坏评估[M]. 成都: 四川科

学技术出版社, 2010.

- [14]朱捷缘, 卢慧婷, 王慧芳, 等. 汶川地震重灾区恢复期生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2018, 38(24):9001-9011.
- [15]孙丽文, 史常青, 赵廷宁, 等. 汶川地震滑坡治理区植被恢复效果研究[J], 中国水土保持科学, 2015, 13(5):86-92.
- [16]仲波, 孙庚, 程魏, 等. 汶川地震对森林土壤养分动态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5):773-779.
- [17]孙丽文, 史常青, 李丹雄, 等. 汶川地震滑坡迹地植物群落与环境的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(21):6794-6803.
- [18]吴聪, 王金牛, 卢涛, 等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(6):911-916.
- [19]谢中华. Matlab 统计分析与应用:40 个案例分析(第 2 版)[M]:北京:北京航空航天大学出版社. 2010.
- [20]吴世祥, 何聪, 杨丹, 等. 2009-2018 年谢家店震后滑坡体植被恢复研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6):235-248.
- [21]刘守江, 张斌, 杨清伟, 等. 汶川地震非规范滑坡体上植被的自然恢复能力研究——以彭州银厂沟谢家店子滑坡体为例[J]. 山地学报, 2010, 28(3):373-378.
- [22]李波, 张曼, 赵璐玲, 等. 汶川地震滑坡体自然植被恢复及影响因子:以龙溪—虹口自然保护区为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3):468-473.