

文章编号: 1008-2786-(2019)1-009-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000394

震区植被恢复初期土壤理化性质与土壤呼吸间的关系

崔羽^{1,2}, 严思维^{1,2}, 吴建召^{1,2}, 林勇明^{1,2*}, 王道杰³

(1. 福建农林大学林学院 福建 福州 350002; 2. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室 福建 福州 350002;

3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 640001)

摘 要: 为了解地震灾区不同恢复方式下土壤理化性质和土壤呼吸间的关系,选取 2 种典型气候区(干旱河谷气候区与亚热带季风气候区)为研究区,设置人工恢复、未受损、自然恢复 3 种恢复方式的固定样地,定期测定土壤呼吸与土壤理化性质(有机碳、全氮、全磷、速效氮、有效磷、容重、孔隙度、电导率和 pH 值),并分析各因子间的相关关系。结果表明:气候类型显著影响土壤全氮、容重、孔隙度、电导率以及土壤呼吸,表现为干旱河谷气候区显著优于亚热带季风气候区;恢复方式显著影响土壤呼吸速率、有机碳、全氮、全磷、速效氮、有效磷含量、C:P、N:P、容重、孔隙度和电导率,基本表现为未受损样地优于人工恢复样地优于自然恢复样地;二者交互作用显著影响土壤呼吸、土壤物理性质和除全磷、有效磷外主要土壤养分的流失。两种气候区土壤呼吸的影响因子不同,干旱河谷气候区主要为土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、pH 值、容重和孔隙度,亚热带季风气候区主要为土壤有机质、全氮、速效氮、容重和孔隙度。本研究为评价和优化西南地区灾后恢复治理措施提供一定科学依据,对其生态安全维护和生态屏障建设提供帮助。

关键词: 汶川地震;生态恢复;土壤呼吸;理化性质

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

汶川地震活动是典型的主次型地震,干扰频率与强度大、持续时间长,由于地震发生于生态过渡山区,造成灾区生态系统受到间歇性的干扰时间延长,干扰具有明显的累加和放大效应,能量释放强烈,对山地系统的破坏性极强,严重影响了灾区森林、草地与农田生态系统,根据王文杰等^[1]人研究,仅绵竹、安县、汶川和什邡 4 个县市就有超过 11% 的森林生态系统和超过 14% 的草地生态系统受到破坏,其中汶川农田受损面积占农田生态系统的 12.83%。地震灾区的表层系统普遍受到地震影响,岩石土体失

稳后形成大面积滑坡、崩塌,极易堵塞河道产生堰塞湖,频繁发生的地质灾害严重破坏土壤、植被和生物多样性,形成极端退化、中度退化和轻度退化等多种生态退化类型^[2],对于严重受损的生态系统而言,自然恢复难度大,时间长,因此采取人工干预措施进行生态恢复工作十分必要。自 2010 年起,日本国际协力机构(Japan International Cooperation Agency)以汶川县、绵阳市、绵竹市和彭州市为示范点,开展为期五年的四川省地震灾后森林植被恢复项目,实施以工程措施和生物措施为主的林业治山工程^[3],首

收稿日期(Received date): 2018-10-06; **改回日期**(Accepted date): 2019-02-27

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41790434);福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016);福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2017111 和 CXZX2017283)。[National Natural Science Foundation of China (41790434); the Outstanding Young Scientific Research Project of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq2017016); the Scientific and Technological Innovation Foundation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2017111 and CXZX2017283)]

作者简介(Biography): 崔羽(1995-),女,山东莱芜人,硕士研究生,主要研究方向:自然地理学。[CUI Yu (1995-), female, born in Laiwu, Shandong province, M. Sc. candidate, research on physical geography] E-mail: 1510209913@qq.com

* **通讯作者**(Corresponding author): 林勇明(1982-),男,福建福安人,博士,教授,主要研究方向:恢复生态学。[LIN Yongming (1982-), male, born in Fu'an, Fujian province, professor, research on restoration ecology] E-mail: monkey1422@163.com

先以挡土墙工程、排水沟工程等措施实现坡面物理性稳固,后通过栅栏工程、水平阶工程改善植物生长基础条件,最后结合生物措施恢复森林植被,并通过植被根系的固土作用稳定坡面。然而,植被恢复生态工程结束后,生态恢复效果评价的研究并不多见,如孙丽文等^[4]研究了灾区不同治理模式下植被的恢复情况;王宇等^[5]分析人工植被恢复两年后的群落结构特征;吴聪等^[6]认为除地震引起的坡面土壤扰动在短期内对土壤理化性质产生影响外,气候类型的差异也将长期影响土壤性质的演变过程。

土壤呼吸是植物根系和根际生物呼吸、土壤微生物对有机质的分解过程、土壤动物呼吸的综合结果^[7]。然而,各类干扰活动改变了土壤有机质含量、土壤孔隙度、微生物组成等理化性质,引起土壤呼吸速率的相应变化,在不同的气候类型、水热条件、植被或土地利用类型等的共同作用下影响土壤呼吸^[8]。学者研究发现退化生态系统的治理恢复措施与恢复年限可有效提高土壤固碳能力,促进土壤呼吸^[9-11]。因此,在一定程度上,土壤呼吸速率可以反映生态系统对胁迫的敏感性和响应模式,进而指示生态恢复进展^[12]。但关于地震灾区恢复过程中的土壤呼吸研究少见报道,不同恢复方式下土壤理化性质的变化是否影响震区退化生态系统的土壤呼吸、气候类型与恢复措施是否对土壤理化性质及土壤呼吸存在交互效应等问题,尚不明瞭,需要继续开展研究。

鉴于此,本研究以地震重灾区汶川和绵竹作为干旱河谷气候和亚热带季风气候的代表区,分别设置人工恢复、自然恢复与未受损样地,通过对土壤理化性质和土壤呼吸的定位观测,分析生态恢复过程中土壤呼吸与土壤理化性质的动态变化特征,探讨人工治理方式和自然恢复方式对于土壤理化性质、土壤呼吸变化的影响,以期为评价和优化灾后恢复治理措施、加快灾区生态恢复进程等提供科学依据,对于维系灾区生态安全、支撑西南地区生态屏障建设及社会经济发展具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样地概况

汶川地震发生在川滇地区的龙门山地震断裂带上,龙门山地震带位于 1900 年来大陆强震活动最强烈的巴颜喀拉块体的东边界,自 1997 年来曾发生 7.0~7.9 级地震 4 次,8.0~8.9 级地震 2 次^[13],是我国南北地震带的重要组成部分。本次研究区域选在汶川地震受灾极重地区汶川县威州镇和绵竹市汉旺镇(102°49′~105°38′E、30°45′~33°03′N),分别设置人工恢复、未受损和自然恢复样地,开展土壤呼吸和土壤理化性质的研究。具体样地概况见表 1。

汶川县威州镇位于岷江北部与杂谷脑河交汇处,是典型干旱河谷气候区,有明显干湿季节。雨季平均降雨量 425.2 mm,干季平均降雨量 90.5 mm,但由于蒸发量大(全年蒸发量高达 1869.3 mm),全

表 1 样地概况

Tab. 1 Sample characteristics

研究区 Research location	气候 Climate	处理 Treatment	经度 Longitude/°	纬度 Latitude/°	海拔 Altitude/m	平均盖度 Coverage /%
汶川县 威州镇	干旱河谷气候 Dry-hot valley climate	人工恢复 Destroyed and treated areas	104.159	31.463	722	52
		未受损 Undestroyed areas	104.161	31.462	729	79
		自然恢复 Natural recovery areas	104.107	31.542	892	12
绵竹市 汉旺镇	亚热带季风气候 Subtropical humid climate	人工恢复 Destroyed and treated areas	103.573	31.473	1377	55
		未受损 Undestroyed areas	103.470	31.321	1260	84
		自然恢复 Natural recovery areas	103.424	31.386	1265	23

年水分亏损。气温年较差小,日较差大,年平均气温 $11.2^{\circ}\text{C} \sim 12.9^{\circ}\text{C}$ 。基带土壤为棕壤和河谷褐土。在干旱河谷气候区地震滑坡体上,人工建筑了挡土墙、铁网石笼等治理措施,在此设置了人工恢复和自然恢复样地,并在附近设置了未受损样地,样地平均海拔为781 m,平均坡度 33° ,坡向为北向。未受损区地表植被以四川黄栌(*Cotinus szechuanensis*)、白刺花(*Sophora davidii*)和刺果蔷薇(*Rosa acicularis*)等多年生草本和低矮灌木为主,人工恢复区内滑坡形成后着生的先锋物种主要为草本植物狗尾草(*Setaria viridis*)、牛筋草(*Eleusine indica*)和川甘亚菊(*Ajania potaninii*),岩土工程措施完成后种植一年生洋槐(*Robinia pseudoacacia*)和岷江柏(*Cupressus chengiana*)等,自然恢复样地的砂石化程度较高,地表植被受损严重,仅有青蒿(*Artemisia carvifolia*)、狗尾草零星分布,未受损区、人工恢复区、自然恢复区的植被平均盖度分别为79%、52%和12%。

绵竹市汉旺镇在威州镇以东55 km处,属山前冲洪积扇状平原区,亚热带季风性湿润气候区,年降雨量为1500~1700 mm,年平均气温 15°C 。基带土壤为黄壤及其亚类。在亚热带季风气候区地震引发的崩塌体上,主要治理措施为竹栅栏和石片叠梯,将其设置为人工恢复样地,在其附近设置了未受损样地和自然恢复样地,各样地海拔介于1300~1350 m,坡向均为北向,平均坡度约 31° 。未受损区地表植被以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小碎米莎草(*Cyperus microiria*)和人工种植扁桃(*Amygdalus communis*)为主,人工恢复区的竹栅栏与石片叠梯间均以1.5 m株间距人工种植了墨竹柳(*Salix maizhokungarensis*),现存优势种川滇盘果菊(*Prenanthes henryi*)、小飞蓬(*Conyza canadensis*)和墨竹柳等,自然恢复样地地表植被以青蒿和少量马桑(*Coriaria nepalensis*)为主,未受损区、人工恢复区、自然恢复区的植被平均盖度分别为84%、55%和23%。

1.2 样品采集和测定

在2015年5月,根据实地考察,设置6种处理方式:(1)D-ud,干旱河谷区未受损样地;(2)D-dt,干旱河谷区人工恢复样地;(3)D-nr,干旱河谷区自然恢复样地;(4)S-ud,亚热带季风气候区未受损样地;(5)S-dt,亚热带季风气候区人工恢复样地;(6)S-nr,亚热带季风气候区自然恢复样地。

在每类样地内设置3块面积 $10\text{ m} \times 100\text{ m}$ 、间隔15 m、处于同一等高线上的样带,每个样带内划分2个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 样方。

土壤理化性质测定^[14]:在2015年9月、12月,2016年3月、6月以及9月5个月份月上旬,采用“3点取样法”对样地进行取样,将土壤样品自然风干后过2 mm筛称重,过0.149 mm筛用于土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、速效氮(AN)的测定。对过2 mm筛的土壤样品,用电极法测电导率(SC),用纯水浸提(2.5:1水土混合)后,使用pH计Starter 3100测定土壤pH。SOC采用硫酸-重铬酸钾外加热法。TN采用硫酸-半微量凯氏定氮法(ATN-300全自动定氮仪)。TP采用碱熔-钼锑抗比色法。AP采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,AN采用碱解扩散法。土壤孔隙度(SP)采用鲜土烘干法,容重(ρ_b)采用环刀法。

土壤呼吸测定^[15]:于2015年5月在每个样方对角线附近随机嵌入深度5 cm的PVC土壤环($\Phi 20\text{ cm} \times H 10\text{ cm}$),每块样地共嵌入6个,测定前将PVC环嵌入土壤的一端削尖以减少对土壤的下压力,试验期间不再移动,对PVC环内植物、凋落物等定期进行清理。在2015年9月—2016年9月分五个时间段,选取天气晴好时采用LI-8100开路式土壤碳通量测定系统(LICOR Inc., Lincoln, USA),连接20 cm短期腔室进行土壤呼吸速率测定,测定时间为每天10:00,11:00,13:00,15:00,17:00,18:00,每个土壤环在相同时间段内进行3次重复观测,取日均值作为土壤呼吸速率。

1.3 数据分析

运用Excel 2003进行数据处理及图形绘制。气候区、处理方式和时间对土壤呼吸及土壤理化性质的影响运用SPSS 19.0中的单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)配合T检验在显著性水平($\alpha = 0.05$)进行;采用多因素方差分析(Multivariate analysis of variance),在显著性水平($\alpha = 0.05$),与检验统计量的相伴概率P值作比较,分析气候区、处理方式和时间差异3个因子的交互影响效应;运用双变量相关分析中的Pearson相关分析进行土壤呼吸不同处理方式和各因子间相关性分析。土壤养分恢复率=变化量(损失或增加量)/未受损样地测定值。表格中数据均为平均值 \pm 标准误。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸变化特征

表 2 显示,时间对土壤呼吸存在显著影响,表现为土壤呼吸呈现明显季节变化特征,在 2015 年秋季和 2016 年夏季显著大于其他时段,2015 年冬季为最低值。另外,不同处理方式、气候类型对土壤呼吸影响显著,干旱河谷气候区土壤呼吸显著大于亚热带季风气候区;未受损样地显著大于人工恢复样地,大于自然恢复样地。从表 3 可得,和未受损区相比,干旱河谷区的人工恢复区与自然恢复区土壤呼吸速率分别降低了 41% 和 50%,亚热带季风气候区则分别降低了 21% 和 23%,说明 2 个气候区受损恢复区(人工恢复区和自然恢复区)的土壤呼吸速率仍与

未受损区存在一定差距,但亚热带季风气候区恢复程度较高。处理、时间和气候 3 个因素,气候和时间 2 因素以及气候和处理 2 因素的交互作用对土壤呼吸影响均显著。

2.2 土壤理化性质

从表 2 可知,气候类型对 TN、 ρb 、SP 和 SC 有显著影响。与亚热带季风气候区相比,干旱河谷气候区的 TN、SP 和 SC 显著升高,而干旱河谷气候区的 ρb 显著高于亚热带季风气候区。处理方式显著影响除 pH 外的土壤性质。未受损的 SOC、TN、AN、 ρb 和 SP 均显著大于人工恢复和自然恢复样地,除 TP 表现为自然恢复区显著大于人工恢复区外,其余土壤性质在两种处理间无显著差异。时间因素对除 AN 和 ρb 外的理化性质存在显著影响,大部分理化性质季节差异显著,表现为夏秋高,春冬低。另外,

表 2 气候类型(干旱河谷气候和亚热带季风气候)与处理方式(人工恢复、未受损、自然恢复)对土壤呼吸和土壤理化性质的交互作用

Tab. 2 Interactive effect between the climate and the treatment on soil respiration rate and soil physical – chemical properties										
评价指标	Climate(C)	Treatment(T)	Date(D)	C*D	C*T	T*D	T*C*D	T	C	D
SR/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	D1. 940 \pm 0. 200a	dt1. 470 \pm 0. 140b	A2. 560 \pm 0. 280a							
	S1. 390 \pm 0. 070b	ud 2. 210 \pm 0. 220a	B0. 800 \pm 0. 090c							
		nr1. 320 \pm 0. 170b	C1. 070 \pm 0. 230bc	<0.001	<0.001	0. 055	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			D2. 310 \pm 0. 520a							
			E1. 570 \pm 0. 290b							
SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	D34. 89 \pm 3. 49a	dt20. 800 \pm 1. 900b	A37. 100 \pm 6. 270ab							
	S32. 570 \pm 4. 080a	ud 65. 580 \pm 2. 500a	B24. 950 \pm 4. 940ab							
		nr14. 820 \pm 1. 640b	C28. 580 \pm 4. 590ab	0. 342	<0.001	0. 005	0. 005	<0.001	0. 136	<0.001
			D42. 340 \pm 6. 630b							
			E35. 700 \pm 6. 830ab							
TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	D1. 980 \pm 0. 230b	dt1. 080 \pm 0. 100b	A1. 860 \pm 0. 320a							
	S1. 530 \pm 0. 150a	ud 3. 450 \pm 0. 150a	B1. 480 \pm 0. 300a							
		nr0. 750 \pm 0. 030b	C1. 750 \pm 0. 280a	0. 109	<0.001	0. 609	0. 648	<0.001	<0.001	0. 044
			D1. 890 \pm 0. 360a							
			E1. 810 \pm 0. 330a							
TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	D0. 940 \pm 0. 070a	dt0. 750 \pm 0. 070b	A0. 610 \pm 0. 060c							
	S0. 890 \pm 0. 060a	ud0. 910 \pm 0. 070ab	B0. 900 \pm 0. 110b							
		nr1. 070 \pm 0. 090a	C0. 850 \pm 0. 080bc	<0.001	0. 905	<0.001	<0.001	<0.001	0. 303	<0.001
			D0. 900 \pm 0. 090b							
			E1. 310 \pm 0. 100a							
AN/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	D104. 350 \pm 13. 890a	dt41. 770 \pm 3. 210b	A99. 290 \pm 21. 110a							
	S94. 440 \pm 10. 850a	ud 209. 060 \pm 7. 480a	B95. 560 \pm 17. 030a							
		nr47. 360 \pm 4. 510b	C100. 960 \pm 17. 650a	0. 558	0. 003	0. 010	0. 734	<0.001	0. 081	0. 950
			D102. 520 \pm 2. 630a							
			E98. 670 \pm 2. 340a							

续上表

评价指标	Climate (C)	Treatment (T)	Date (D)	C * D	C * T	T * D	T * C * D	T	C	D
AP/ (mg · kg ⁻¹)	D15.970 ± 0.730a	dt15.380 ± 1.020a	A13.520 ± 1.030c							
	S14.810 ± 0.620a	ud16.570 ± 0.760a	B13.580 ± 0.600c							
		nr14.220 ± 0.640a	C16.330 ± 1.050b	0.447	0.584	0.344	0.004	0.030	0.106	<0.001
			D13.410 ± 0.410c							
			E20.120 ± 1.160a							
C;N	D20.790 ± 1.350a	dt22.130 ± 2.320a	A20.270 ± 1.750ab							
	S19.570 ± 1.480a	ud19.680 ± 0.860a	B18.380 ± 2.560b							
		nr18.730 ± 1.690a	C18.160 ± 1.940b	0.576	0.001	0.651	0.002	0.234	0.467	0.091
			D24.760 ± 2.620a							
			E19.320 ± 2.050ab							
C;P	D52.780 ± 9.450a	dt34.910 ± 5.020b	A65.170 ± 10.670ab							
	S43.490 ± 5.570a	ud 89.320 ± 11.540a	B35.130 ± 7.590bc							
		nr20.180 ± 5.110b	C39.340 ± 7.380abc	0.019	0.127	0.050	0.067	<0.001	0.210	0.001
			D71.920 ± 20.400a							
			E29.110 ± 7.520c							
N;P	D3.000 ± 0.560a	dt1.99 ± 0.410b	A3.310 ± 0.560ab							
	S2.190 ± 0.310a	ud 4.80 ± 0.690a	B2.130 ± 0.460ab							
		nr1.00 ± 0.200b	C2.580 ± 0.650ab	0.001	0.007	0.016	0.043	<0.001	0.063	0.022
			D3.510 ± 1.220a							
			E1.470 ± 0.320b							
pb/ (g · cm ⁻³)	D 1.310 ± 0.022b	dt1.450 ± 0.010a	A1.39 ± 0.030a							
	S1.420 ± 0.011a	ud 1.250 ± 0.030b	B1.380 ± 0.040a							
		nr1.400 ± 0.010a	C1.390 ± 0.030a	0.915	<0.001	0.010	0.306	<0.001	<0.001	0.055
			D1.350 ± 0.030a							
			E1.330 ± 0.040a							
SP/%	D50.480 ± 0.940a	dt45.270 ± 0.510b	A47.720 ± 0.980a							
	S 46.360 ± 0.410b	ud 52.820 ± 1.190a	B47.750 ± 1.500a							
		nr47.170 ± 0.310b	C47.730 ± 1.140a	0.854	<0.001	<0.001	0.078	<0.001	<0.001	0.008
			D49.060 ± 1.070a							
			E49.80 ± 1.470a							
SC/ (ms · cm ⁻¹)	D0.370 ± 0.040a	dt0.170 ± 0.010b	A0.320 ± 0.070a							
	S 0.180 ± 0.010b	ud0.260 ± 0.010b	B0.300 ± 0.060a							
		nr 0.410 ± 0.060a	C0.280 ± 0.040a	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			D0.230 ± 0.030a							
			E0.250 ± 0.040a							
pH	D8.450 ± 0.020a	dt8.450 ± 0.030a	A8.540 ± 0.030a							
	S8.430 ± 0.020a	ud8.460 ± 0.030a	B8.450 ± 0.030b							
		nr8.420 ± 0.020a	C8.390 ± 0.020c	0.084	0.001	0.161	0.760	0.199	0.208	<0.001
			D8.560 ± 0.020a							
			E8.270 ± 0.020c							

注: D: 干旱河谷气候 S: 亚热带季风气候。dt: 人工恢复区, ud: 未受损区, nr: 自然恢复区。A: 2015 年 9 月, B: 2015 年 12 月, C: 2016 年 3 月, D: 2016 年 6 月, E: 2016 年 9 月。SR: 土壤呼吸速率, SOC: 土壤有机碳, TN: 全氮, TP: 全磷, AN: 速效氮, AP: 有效磷, C:N: 碳氮比, C:P: 碳磷比, N:P: 氮磷比, pb: 土壤容重, SP: 土壤孔隙度, SC: 土壤电导率, pH: 酸碱度。数据后不同字母表示差异显著性 ($P < 0.05$)。粗体表示在 0.05 水平差异显著。D: dry-hot valley climate, S: subtropical humid climate. dt: destroyed and treated areas, ud: undestroyed areas, nr: natural recovery areas. A: September 2015, B: December 2015, C: March 2016, D: June 2016, E: September 2016. SR: soil respiration, SOC: soil organic carbon, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus, AN: available nitrogen, AP: available phosphorus, pb: bulk density, SP: soil porosity, SC: soil conductivity, pH: hydrogen ion concentration. Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$. Bold numbers represent a significant difference at $P < 0.05$.

表 3 不同气候条件下土壤呼吸与土壤理化性质与计量特征的描述性统计

Tab. 3 Soil respiration, soil physical-chemical properties and stoichiometric ratios among different climates

评价指标	Dry-hot valley climate			Subtropical humid climate			F-value
	dt (<i>n</i> = 15)	ud (<i>n</i> = 15)	nr (<i>n</i> = 15)	dt (<i>n</i> = 15)	ud (<i>n</i> = 15)	nr (<i>n</i> = 15)	
	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	
SR/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.640 ± 0.250Ba	2.790 ± 0.370Aa	1.390 ± 0.310Ba	1.280 ± 0.110Ba	1.620 ± 0.090Bb	1.240 ± 0.160Ba	5.870 ***
SOC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	18.660 ± 2.680BCa	65.200 ± 2.330Aa	20.830 ± 1.880Ba	22.950 ± 2.660Ba	65.960 ± 4.560Aa	8.050 ± 1.580Cb	81.540 ***
TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.060 ± 0.190Ca	4.040 ± 0.250Aa	0.840 ± 0.070Ca	1.110 ± 0.150Ca	2.850 ± 0.330Bb	0.650 ± 0.080Cb	140.170 ***
TP/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.780 ± 0.090Aa	0.920 ± 0.130Aa	1.110 ± 0.120Aa	0.720 ± 0.100Aa	0.900 ± 0.070Aa	1.030 ± 0.140Aa	1.800
AN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	37.980 ± 6.010Ca	227.910 ± 9.340Aa	47.160 ± 7.490C	45.560 ± 2.140Ca	190.210 ± 9.690Bb	47.560 ± 5.300C	144.490 ***
AP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	15.450 ± 1.650Aa	17.470 ± 1.000Aa	14.990 ± 1.020A	15.320 ± 1.270Aa	15.680 ± 1.110Aa	13.440 ± 0.760A	1.230
C:N	21.930 ± 3.410ABa	16.180 ± 0.540ABb	24.250 ± 1.650Aa	22.330 ± 3.270ABa	23.160 ± 1.0120Aa	13.220 ± 2.170Bb	3.770 **
C:P	29.000 ± 5.030Ca	100.780 ± 21.990Aa	28.570 ± 9.310Ca	40.820 ± 8.600BCa	77.860 ± 7.060ABa	11.790 ± 3.410Ca	9.490 ***
N:P	1.660 ± 0.370Ba	6.150 ± 1.260Aa	1.190 ± 0.3900Ba	2.320 ± 0.740Ba	3.450 ± 0.340Bb	0.820 ± 0.130Ba	9.170 ***
ρb/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.420 ± 0.020ABb	1.410 ± 0.010Cb	1.100 ± 0.030ABa	1.480 ± 0.020Aa	1.400 ± 0.030Ba	1.390 ± 0.010Ba	44.840 ***
SP/%	46.430 ± 0.750BCa	58.370 ± 0.990Aa	46.640 ± 0.420BCa	44.110 ± 0.580Cb	47.270 ± 0.690Bb	47.680 ± 0.420Ba	55.680 ***
SC/($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	0.160 ± 0.010CDa	0.270 ± 0.020Ba	0.680 ± 0.060Aa	0.160 ± 0.010CDa	0.240 ± 0.010BCa	0.1300 ± 0.005Db	66.350 ***
pH	8.470 ± 0.040Aa	8.500 ± 0.050Aa	8.380 ± 0.030Aa	8.420 ± 0.030Aa	8.410 ± 0.040Aa	8.450 ± 0.020Aa	1.560

注:dt:人工恢复区,ud:未受损区,nr:自然恢复区。SR:土壤呼吸速率,SOC:土壤有机碳,TN:全氮,TP:全磷,AN:速效氮,AP:有效磷,C:N:碳氮比,C:P:碳磷比,N:P:氮磷比,ρb:土壤容重,SP:土壤孔隙度,SC:土壤电导率,pH:酸碱度。不同的小写字母表示每种气候类型之间存在显著差异;不同的大写字母表示6种样地之间存在显著差异。dt: destroyed and treated areas, ud: undestroyed areas, nr: natural recovery areas. SR: soil respiration, SOC: soil organic carbon, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus, AN: available nitrogen, AP: available phosphorus, ρb: bulk density, SP: soil porosity, SC: soil conductivity, pH: hydrogen ion concentration. Different lowercase letters indicate significant differences between each climate type, different capital letters indicate significant differences between the six plots.

气候和处理间相互作用对 SOC、TN、AN、ρb、SP、SC 和 pH 影响显著;气候和时间相互作用仅对 TP 和 SC 存在显著影响;处理和时间相互作用显著影响 SOC、TP、ρb、SC 和 pH;3 个因素共同作用显著影响 SOC、TP、AP 和 SC。

根据表 3,对 2 种气候区而言,除 SOC 外,其余土壤性质在未受损样地均表现为干旱河谷区小于亚热带季风气候区。干旱河谷区人工恢复和自然恢复样地与未受损样地相比,SOC 的恢复率分别为 28.6% 和 31.9%,TN 为 26.2% 和 20.8%,TP 为 85% 和 121%,AN 为 15% 和 21%,AP 为 88% 和 86%,ρb 分别增加 29% 和 28%,SP 均减少 20%,SC 分别减少 40% 和增加 152%;而亚热带季风气候区人工恢复和自然恢复样地与未受损样地相比,SOC 恢复率分别为 35% 和 12%,TN 为 39% 和 23%,TP 为 80% 和 114%,AN 为 26% 和 25%,AP 为 98% 和 86%,ρb 分别增加 5.7% 和减少 0.7%,SP 分别增加 6.7% 和减少 5.1%,SC 分别减少 33% 和 46%。2 个气候区 pH 均呈弱碱性,无显著差异。

2.3 土壤化学计量特征

处理方式对 C:P 和 N:P 均存在显著影响,在 3

种处理中表现为未受损样地显著大于受损处理和自然恢复样地(表 2)。时间也对 C:P 和 N:P 影响显著,C:P 在 16 年夏表现出极大值,与 15 年冬出现的极小值差异显著,N:P 极大值同样出现在 16 年夏,但极小值在 16 年秋,二者差异显著。气候对各化学计量特征均不存在显著影响,但气候和时间以及处理和时间的交互作用显著影响 C:P 和 N:P,气候和处理的交互作用显著影响 C:N 和 N:P。3 种因子的交互作用显著影响 C:N 和 N:P。

根据表 3,对于 2 种气候不同处理而言,C:P 比率没有显著差异,但亚热带季风气候区 C:N 在未受损样地显著大于干旱河谷气候区,在自然恢复样地显著小于干旱河谷气候区。干旱河谷气候区未受损样地 N:P 显著大于亚热带季风气候区。

2.4 土壤性质之间的关系

除 TP、SC 和 pH 外,大多土壤性质之间表现出显著相关性(表 4)。SOC 与 TN、AN 和 SP 表现为极显著正相关,与 ρb 表现为极显著负相关;TN 与 AN 和 SP 呈极显著正相关,与 ρb 呈极显著负相关。除 AP 和 SC 外各土壤性质与 SR 均存在显著相关性。

表 4 土壤呼吸和土壤理化因子相关矩阵

Tab. 4 Correlation matrix of soil respiration and physical-chemical properties

	SR	SOC	TN	TP	AN	AP	pb	SP	SC	pH
Soil respiration (SR)	1									
Soil organic carbon (SOC)	0.460***	1								
Total nitrogen (TN)	0.510***	0.890***	1							
Total phosphorus (TP)	-0.280**	0.001	-0.050	1						
Available nitrogen (AN)	0.420***	0.870***	0.910***	0.003	1					
Available phosphorus (AP)	0.060	0.210*	0.270*	0.260*	0.260*	1				
Soil bulk density (pb)	-0.420***	-0.510***	-0.690***	-0.160	-0.660***	-0.250*	1			
Soil porosity (SP)	0.420***	0.520***	0.690***	0.180	0.660***	0.230*	-0.970***	1		
Soil conductivity (SC)	0.050	-0.020	-0.050	0.070	-0.030	-0.080	0.020	-0.020	1	
pH	0.390***	0.140	0.170	-0.360***	0.100	-0.450***	-0.120	0.120	-0.180	1

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. Levels of significance are: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

2.5 土壤呼吸影响因子

图 1 为 2 个气候区土壤呼吸与土壤理化因子相关性分析,结果表明,干旱河谷气候区土壤呼吸与土壤 SOC、TN 和 TP 含量,C:P:N:P 比存在极显著相关性,受 AN 含量、pH、pb、SP 的显著影响。亚热带季风气候区土壤呼吸仅与 SOC、TN、AN 和 SP 存在显著正相关性,与 pb 存在显著负相关性。SOC 与 SR 的相关性最强,在干旱河谷区和亚热带季风区的相关系数分别为 0.589 和 0.413。

3 结论与讨论

3.1 土壤物理性质对震区生态恢复的响应

土壤孔隙度可以反映包括土壤透水性、导水性、持水能力和通气性在内的综合性质,是评价土壤物理性质的重要指标^[16],土壤孔隙度越大说明土壤疏松程度和贮水能力越大,有利于土壤涵养水源。本研究表明,处理和气候对土壤孔隙均有显著影响。地震未受损样地的孔隙度显著大于人工恢复样地,但与自然恢复样地不存在显著差异,说明治理后土壤的持水性以及结构通透性未得到足够改善;干旱河谷气候区土壤孔隙度显著大于亚热带季风气候区,说明该区土壤水分下渗能力更好。

除土壤透水性和通气性外,土壤容重还可以反映根系伸展时阻力^[17],容重越小的土壤抗蚀性越好^[19]。在本研究中,未受损样地土壤容重显著小于自然恢复样地和人工恢复样地,说明经过近年来的恢复治理,土壤稳定性与抗蚀性还未有明显提高;气

候对土壤容重的影响同样显著,表现为干旱河谷气候区土壤容重显著小于亚热带季风气候区,这可能与亚热带季风气候区降水频繁导致土壤养分易随雨水冲刷流失有关^[18]。

土壤电导率可以用来描述土壤含盐量,在本研究中干旱河谷区土壤电导率显著大于亚热带季风气候区,这可以用气候因子和地表覆盖差异来解释:降水量的变化可促进盐分运移,雨季降水集中导致土壤表层盐分被雨水淋洗,盐分浓度较低,旱季蒸发量强大,使土壤盐分在大量表层聚集;同时植被覆盖可以改变气候因子对土壤盐分的影响,良好植被情况使得土壤蒸发量降低,土壤被雨水淋洗情况减少,因此可使表层土壤盐分降低^[19]。在本研究中干旱河谷气候区降水量少且蒸发量巨大,亚热带季风气候区总降水较大且气候温和,因此土壤电导率表现为干旱河谷区显著大于亚热带季风气候区。

3.2 土壤化学计量特征和化学性质对震区生态恢复的响应

土壤化学计量比可以反映土壤在养分供应的平衡性^[20]。在本研究中,土壤 C:N 在 2 个气候和 3 种处理间均不存在显著差异,表明不同生态系统中的 C:N 比例相对稳定。不同气候区的 C:P 和 N:P 无显著差异,但均表现为未受损区显著大于人工恢复和自然恢复区,这与土壤中的 P 含量有关,研究区内土壤磷主要来自成土母质风化和有机物的归还,同时气候、土壤熟化程度、植被演替阶段均可影响磷含量。

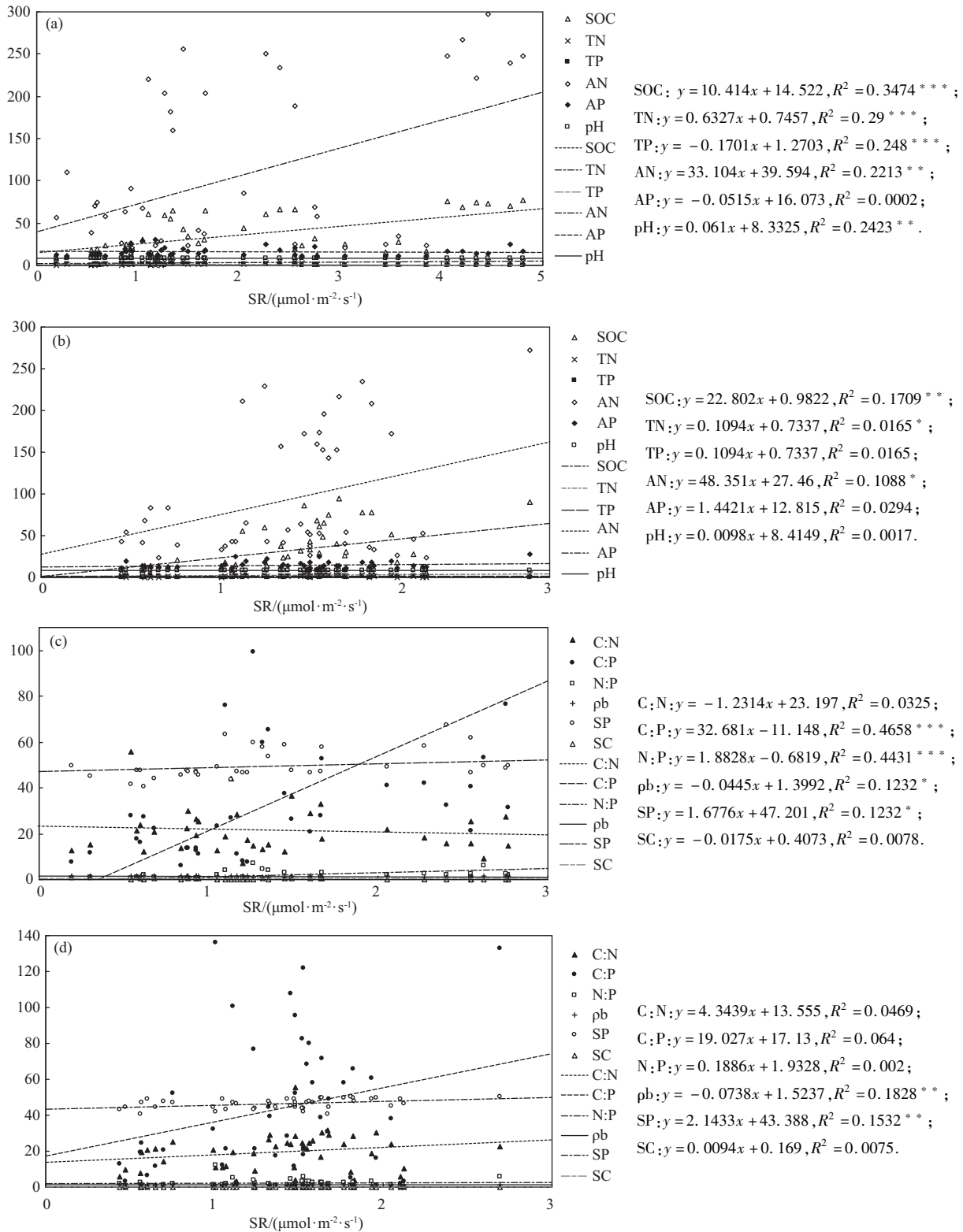


图1 不同气候区土壤理化性质和土壤呼吸速率的散点和回归分析(图中各变量单位与表3相同)

(a: 干旱河谷气候区土壤化学性质与土壤呼吸速率分析; b: 亚热带季风气候区土壤化学性质与土壤呼吸速率分析; c: 干旱河谷气候区土壤物理性质和化学计量特征与土壤呼吸速率分析; d: 亚热带季风气候区土壤物理性质和化学计量特征与土壤呼吸速率分析)

Fig. 1 Regression analysis of soil physical-chemical properties and soil respiration rate (the units in the figure are same as Tab. 3)

(a: Regression analysis of soil chemical properties and soil respiration rate in dry-hot valley climate; b: Regression analysis of soil chemical properties and soil respiration rate in subtropical humid climate; c: Regression analysis of soil physical properties and stoichiometric ratios and soil respiration rate in dry-hot valley climate; d: Regression analysis of soil physical properties and stoichiometric ratios and soil respiration rate in subtropical humid climate)

地震滑坡扰动会导致土壤养分的空间变化。本研究中,不同处理方式对土壤有机碳、全氮和速效氮含量影响显著,其中有机碳、全氮和速效氮表现为未受损区显著大于人工恢复区和自然恢复区,表明未受损区养分积累情况最好,这主要是因为地震扰动曾造成受损区土壤物理结构被破坏,土壤养分积累变慢,且好氧微生物活跃使土壤有机物的分解加速^[3]。在气候类型上,全氮含量受气候影响显著,全磷含量受气候和处理交互影响显著,这与亚热带季风气候区和干旱河谷区水热条件不同有关,亚热带季风气候区降水更多,不利于土壤养分积累。本研究中3种处理的土壤pH变化差异不大,均呈碱性,与赵丽丽等人的研究结果一致^[21-22],土壤pH值仅与土壤呼吸存在显著正相关关系,与全磷和有效磷存在显著负相关性。

3.3 土壤呼吸与土壤理化性质的关系

植被通过养分吸收和归还有机物等方式影响土壤的理化、生物学性质,土壤呼吸因此随植被演替变化而变化,可以指示生态系统演替过程中土壤质量的变化过程^[12]。本研究显示,不同处理方式对土壤呼吸的影响显著,表现为未受损区显著大于人工恢复区和自然恢复区,这主要是因为人工植被重建和演替过程也是植物对土壤不断适应和改造的过程,不同的植物群落对土壤理化性质的影响不同,进而影响土壤呼吸过程^[23],说明本研究中未受损区植被对土壤的适应性好于受损区,因此根据土壤呼吸速率判断植被重建恢复水平,对于快速评价治理措施的恢复效果、总结改进治理措施等具有一定的积极意义。不同气候区的土壤呼吸同样存在显著差异,干旱河谷气候区土壤呼吸速率显著大于亚热带季风气候区。前人研究发现,土壤呼吸与土壤温度、湿度、森林植被覆盖、土壤微生物、pH值、土壤氮素、土壤磷素以及人类活动等有关^[24],对本研究整体而言,土壤呼吸与除全磷、电导率外的其他因子均存在显著相关性。对于2气候区而言,土壤有机质、全氮、速效氮、容重和孔隙度均为影响土壤呼吸的主要因子,但干旱河谷气候区还受土壤全磷和pH值的显著影响,这与不同气候区水、肥、气、热条件不同有关,本研究中干旱河谷气候区各项土壤养分与土壤呼吸速率均优于亚热带季风气候区,但不同因子的震后恢复效果存在差异,导致土壤呼吸影响因子不同。因此,在不同气候区开展生态恢复工作时,应根

据气候区性质,针对性地改善土壤理化性质,增加土壤固碳能力,促进区域碳平衡。

4 小结

地震及其次生灾害会引起当地植被破坏,且由于山体滑坡、泥石流等灾害的发生,原本养分充足结构良好的表层土壤会被破坏、裸露,导致土壤物理性质变动,土壤养分流失,对生态系统存在多重影响,震后治理方式的选取往往决定着退化生态系统的发展方向、发育速度和恢复水平,人工治理往往能使生态系统迅速演替,达到加快植被-土壤结构功能恢复的目的^[25]。本文研究结果表明,经人工恢复的样地土壤透水透气性能,土壤全碳、全氮和有效磷养分情况略好于自然恢复样地,但与未受损样地还存在一定差距;自然恢复样地土壤的抗蚀性、电导率、全磷和速效氮含量略好于人工恢复样地;经人工恢复的样地土壤呼吸速率略优于自然恢复样地。说明,自2010年开始在该地区开展的震后森林治理工程已初见成效。但土壤养分、土壤呼吸的变化仅是生态恢复过程中土壤演变的外在表现,其内在推动力尚不明确,今后需开展相应研究。另外,制约土壤演变的因子在不同空间尺度下是不同的^[26],本研究中,不同气候类型这一大尺度对土壤全氮、容重、孔隙度、电导率以及土壤呼吸的恢复情况具有显著影响,其他中尺度格局如土壤母质、受损方式,小尺度格局如植被类型、微地貌等对土壤养分、土壤呼吸恢复的影响与相互作用关系等研究有待进一步展开。

致谢:在室内试验、数据处理及论文撰写过程中,福建农林大学2015级自然地理与资源环境专业浦仕力、白沛冰、张燕林、鲁智帅等同学提供了很多的支持与帮助,特此致谢!

参考文献(References)

- [1] 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. [WANG Wenjie, PAN Yingzi, XU Weihua, et al. Analysis on ecosystem destroy and its ecological impact caused by earthquake in Wenchuan, Sichuan province [J]. Research of Environment Science, 2008, 21(5): 110-116]
- [2] 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[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(4): 441-444. [BAO Weikai, PANG Xueyong. Ecological degradation in the Wenchuan

- earthquake seriously affected region in Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, **14**(4): 441–444]
- [3] LIN Yongming, DENG Haojun, DU Kun, et al. Combined effects of climate, restoration measures and slope position in change in soil chemical properties and nutrient loss across lands affected by the Wenchuan Earthquake in China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 596: 274–283.
- [4] 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. [SUN Liwen, SHI Changqing, ZHAO Tingning, et al. Vegetation recovery in the landslide-tackling area of Wenchuan earthquake[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, **13**(5): 86–92]
- [5] 王宇, 刘兴良, 闵安民, 等. 汶川地震灾区人工植被恢复技术研究[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(8): 2374–2376. [WANG Yu, LIU Xingliang, MIN Anmin, et al. Study on vegetation restoration technology in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, **42**(8): 2374–2376]
- [6] 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. [WU cong, WANG Jinniu, LU Tao, et al. Effect of Wenchuan earthquake on soil physical and chemical properties of the Longmen mountain, southwestern China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2012, **18**(6): 911–916]
- [7] KRETZSCHMAR A, LADD J N. Decomposition of 14 C-labelled plant material in soil: The influence of substrate location, soil compaction and earthworm numbers [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1993, **25**(6): 803–809.
- [8] 刘丽雯, 刘梦云, 吴健利, 等. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤呼吸季节性变化及影响因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(12): 1819–1828. [LIU Liwen, LIU Mengyun, WU Jianli, et al. Seasonal variation of soil respiration and affecting factors under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau[J]. Research of Environmental Science, 2016, **29**(12): 1819–1828]
- [9] 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响[J]. 草业科学, 2009, **26**(3): 9–15. [SHI Feng, LI Yu'e, GAO Qingzhu, et al. Effects of management on soil organic carbon of grassland in China[J]. Pratacultural Science, 2009, **26**(3): 9–15]
- [10] 马涛, 于洋, 张峰, 等. 陇东黄土高原不同林龄刺槐林土壤碳通量及其组分特征[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5): 196–202. [MA Tao, YU Yang, ZHANG Feng, et al. Soil carbon flux and component characteristics in the plantation of different-aged *Robinia pseudoacacia* L. forests in Longdong Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(5): 196–202]
- [11] 崔海, 张亚红. 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1507–1515. [CUI Hai, ZHANG Yahong. Diurnal and seasonal dynamic variation of soil respiration and its influencing factors of different fenced enclosure years in desert steppec [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1507–1515]
- [12] 崔骁勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展[J]. 生态学报, 2001, **21**(2): 315–325. [CUI Xiaoyong, CHEN Zuozhong, CHEN Siqing. The development on the soil respiration of grassland ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, **21**(2): 315–325]
- [13] 刘盼. 巴颜喀拉块体周缘及龙门山地区强震活动的数值模拟研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2016: 1–74. [LIU Pan. Numerical simulation of strong earthquake activity on the margin of Bayanhar block and Longmenshan area[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2016: 1–74]
- [14] 国家林业局. 森林土壤分析方法: 中华人民共和国林业行业标准(LY/T1219—1999)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999. [The State Forestry Bureau. The Analysis Methods of Forest Soil: The Forestry Industry Standard of the People's Republic of China(LY/T1219–1999)[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.]
- [15] 王家骏, 王传宽, 韩轶. 帽儿山不同年龄森林土壤呼吸速率的影响因子[J]. 生态学报, 2018, **38**(4): 1194–1202. [WANG Jiajun, WANG Chuankuan, HAN Yi. Factors affecting soil respiration in stands of different ages in the Maoershan region, northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(4): 1194–1202]
- [16] 毛竹, 谢强, 杨渺, 等. 汶川地震极重灾区破坏山体对土壤理化性质影响调查研究[J]. 四川环境, 2017, **36**(S1): 7–12. [MAO Zhu, XIE Qiang, YANG Miao, et al. Hilly vegetation damage of the soil physical and chemical properties in the severest disaster area after Wenchuan earthquake [J]. Sichuan Environment, 2017, **36**(S1): 7–12]
- [17] 郑鹏. 四川盆地北部不同植被恢复模式对土壤肥力的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 1–36. [ZHENG Peng. Effects of vegetation restoration on soil fertility in northern Sichuan basin [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2013: 1–36]
- [18] 陈爱民, 严思维, 林勇明, 等. 地震灾区生态治理初期土壤抗蚀性特征——以汶川地震典型区为例[J]. 山地学报, 2018, **36**(1): 74–82. [CHEN Aimin, YAN Siwei, LIN Yongming, et al. Characteristics of soil anti-erodibility at the initial stage of ecological restoration in the earthquake affected regions—A case study in Wenchuan, China [J]. Mountain Research, 2018, **36**(1): 74–82]
- [19] 张蛟, 崔世友, 冯芝祥, 等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, **26**(2): 1–10. [ZHANG Jiao, CUI Shiyu, FENG Zhixiang, et al. Climate factors and ground mulching affect soil salinity dynamic changes in coastal areas [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **26**(2): 294–302]
- [20] 张贾宇, 徐叶宁, 陶慧颖, 等. 杨—桉短期混交的林地土壤养分异质性[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(2): 216–223. [ZHANG Jiaoyu, XU Yening, TAO Huiying, et al. Short-term effects on the

- heterogeneity of soil nutrients in mixed poplar – alder plantation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(2): 216 – 223]
- [21] 赵丽丽. 汶川大地震对四川理县岷江柏林土壤理化性质及微生物多样性的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015: 1 – 61. [ZHAO Lili. Effects of Wenchuan earthquake on soil physical and chemical properties and microbial biodiversity under *Cupressus chenginana* forest in Li County of Sichuan Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015: 1 – 61]
- [22] 赵丽丽, 钟哲科, 史作民, 等. 汶川地震对四川理县典型受灾区岷江柏人工林土壤理化性质的影响[J]. 林业科学, 2016, **52**(3): 1 – 9. [ZHAO Lili, ZHONG Zheke, SHI Zuomin, et al. Effect of Wenchuan earthquake on physical and chemical properties of forest soils in Li county of Sichuan province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, **52**(3): 1 – 9]
- [23] 张鹏, 胡宜刚, 黄磊, 等. 露天煤矿排土场植被重建对土壤呼吸的影响[J]. 生态科学, 2016, **35**(4): 91 – 96. [ZHANG Peng, HU Yigang, HUANG Lei, et al. Effect of vegetation reconstruction on soil respiration of dumping site in an open pit coal mine [J]. Ecological Science, 2016, **35**(4): 91 – 96]
- [24] 王红, 王邵军, 李霁航, 等. 森林土壤呼吸及其主要调控因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2017, **32**(1): 92 – 97. [WANG Hong, WANG Shaojun, LI Jihang, et al. Characteristics and the influencing factors of forest soil restoration: a review [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, **32**(1): 92 – 97]
- [25] 张新时. 关于生态重建和生态恢复的思辨及其科学涵义与发展途径[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 112 – 118. [ZHANG Xinshi. An intellectual enquiring about ecological restoration and recovery, their scientific implication and approach [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(1): 112 – 118]
- [26] 俞伟. 汶川地震灾区不同气候受损治理区土壤养分演变特征与肥力质量评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2014: 1 – 52. [YU Wei. The evolutionary characteristics of the soil nutrients and fertility quality evaluation in Wenchuan earthquake areas of different climate zones [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014: 1 – 52]

Effects of Soil Physiochemical Properties on Soil Respiration in Preliminary Stage after the Wenchuan Earthquake

CUI Yu^{1, 2}, YAN Siwei^{1, 2}, WU Jianzhao^{1, 2}, LIN Yongming^{1, 2*}, WANG Daojie³

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian province, China;

2. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian province, Fuzhou 350002, Fujian province, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 640001, Sichuan province, China)

Abstract: In order to understand the relationship between soil physical-chemical properties and soil respiration characteristics under different restoration modes in the earthquake-affected areas, the destroyed and treated areas, undestroyed areas, and natural recovery areas in the dry-hot valley climate and the subtropical humid climate were selected as fixed sample plots. In addition, soil respiration and soil physical-chemical properties (organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, available phosphorus, bulk density, porosity, conductivity and pH) were determined at regular intervals. Apart from that, the correlations matrix of these above factors were analyzed. As shown by the findings: (1) the climate type had a marked impact on soil total nitrogen, bulk density, porosity, conductivity, and soil respiration. In other words, the dry-hot valley climate areas was significantly better than the subtropical humid climate areas. (2) The treatment greatly affected soil respiration rate, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, available phosphorus content, C:P, N:P, bulk density, porosity and conductivity, and basic characteristic was the destroyed and treated areas were better than natural recovery areas, compared with undestroyed areas. (3) Except soil total phosphorus and available phosphorus, interactive effect between the climate and the treatment influenced soil respiration, soil physical properties and main soil nutrient loss obviously. (4) The key affecting factors of soil respiration in the two

climatic regions were not the same. In the dry-hot valley climate areas, the main influencing factors were as follows: soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, pH, bulk density and porosity, while in the subtropical humid climate areas, soil organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, bulk density and porosity were the main influencing factors. The results of this study provided a scientific basis for evaluating and optimizing post-disaster recovery measures. It was helpful to maintain ecological safety in earthquake-affected areas and support ecological barrier construction in the southwest region.

Key words: the Wenchuan earthquake; ecological restoration; soil respiration; soil physical and chemical properties