

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180329

# 震区生态治理初期植物、土壤的营养含量及叶片化学计量特征

吴建召<sup>1</sup> 崔羽<sup>1</sup> 贺静雯<sup>1</sup> 刘颖<sup>1</sup> 李健<sup>1</sup> 林勇明<sup>1</sup> 王道杰<sup>2</sup> 吴承祯<sup>1,3</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 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;

2. 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; 3. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

**摘要:**【目的】在我国西南强地震影响区生态恢复重建的背景下,探明植被覆盖率、植物群落物种多样性、生物量变化与6种主要矿物质元素含量和植物C、N、P化学计量特征,有助于深入认识地震灾区植被恢复的动态过程。【方法】以汶川地震重灾区典型区汶川县威州镇(干旱河谷气候)和绵竹市汉旺镇(亚热带季风性气候)的受损治理样地与未受损样地为研究对象,分析两种气候区受损治理区(Destroyed and treated area, DTA)和未受损区(Undestroyed area, UA)的植被恢复特征和植物不同器官主要元素含量及其化学计量特征。【结果】(1)亚热带季风性气候区的植被恢复率(65.74%)高于干旱河谷气候区(50.68%),其中干旱河谷气候区和亚热带季风性气候区DTA的变异系数分别40.44%和23.06%,高于未受损区的14.49%和8.62%;(2)植物不同器官生物量仅茎在两个气候区DTA和UA间表现显著差异( $P < 0.05$ ),不同器官碳含量仅叶在干旱河谷气候区表现为DTA显著大于UA( $P < 0.05$ );(3)植物不同器官中元素的含量大小主要为 $N > K > Ca > Mg > P > Na$ ;(4)通过叶片氮磷比(N:P)发现,干旱河谷气候DTA和UA主要受P限制,而亚热带季风性气候DTA和UA主要受N限制。【结论】通过上述研究说明,气候可能是影响植被恢复的主导因子,应充分考虑影响植被和土壤恢复的限制养分因子。研究结果可为我国西南地震灾区的生态功能恢复与重建提供科学依据。

**关键词:**地震灾区;生态恢复;植被;矿物质元素;化学计量比

中图分类号:S718.51<sup>+</sup>2; Q948.11; Q946.91 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2019)02-0041-12

引文格式:吴建召,崔羽,贺静雯,等.震区生态治理初期植物、土壤的营养含量及叶片化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(2):41-52. Wu Jianzhao, Cui Yu, He Jingwen, et al. Characteristics of plants, soil nutrients and leaf stoichiometry at the early stage of ecological restoration in earthquake-affected area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 41-52.

## Characteristics of plants, soil nutrients and leaf stoichiometry at the early stage of ecological restoration in earthquake-affected area

Wu Jianzhao<sup>1</sup> Cui Yu<sup>1</sup> He Jingwen<sup>1</sup> Liu Ying<sup>1</sup> Li Jian<sup>1</sup> Lin Yongming<sup>1</sup> Wang Daojie<sup>2</sup> Wu Chengzhen<sup>1,3</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] Under the background of ecological restoration and reconstruction of earthquake-affected areas in southwestern China, exploring the characteristics of vegetation coverage, plant

收稿日期:2018-10-14 修回日期:2018-12-14

基金项目: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、CXZX2017283)。

第一作者:吴建召。主要研究方向:自然资源管理。Email:wjzhao168@163.com 地址:350002 福建省福州市仓山区上下店路15号福建农林大学林学院。

责任作者:林勇明,博士,教授。主要研究方向:区域资源优化、生态学。Email:monkey1422@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

community species diversity, biomass change and six major mineral element contents, and plant carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) stoichiometry will help to fully understand the dynamic process of vegetation restoration in the earthquake-affected areas. [Method] The destroyed and treated plots and the undestroyed plots (control group) of Wenzhou Town (arid-valley climate region) in Wenchuan County and Hanwang Town (subtropical monsoon climate region) in the Mianzhu City of typical area of the severely affected Wenchuan earthquake were studied. The vegetation restoration and the main elements and their stoichiometric characteristics of different organs of the plant in the destroyed and treated area (DTA) and the undestroyed area (UA) were analyzed. [Result] (1) The vegetation restoration rate in the subtropical monsoon climate region (65.74%) was higher than that in the arid-valley climate region (50.68%), and the coefficient of variation of DTA in the arid-valley climate region and subtropical monsoon climate region was 40.44% and 23.06%, respectively, which was higher than UA by 14.49% and 8.62%. (2) Only stem biomass of plant organs showed significant difference between DTA and UA in two climate regions ( $P < 0.05$ ). Only leaf carbon content in plant organs showed that DTA was significantly larger than UA in the arid-valley climate region ( $P < 0.05$ ); (3) The element content in different plant organs was mainly  $N > K > Ca > Mg > P > Na$ ; (4) Through the leaf nitrogen-phosphorus ratio (N:P), it was found that the DTA and UA in arid-valley climate region were mainly restricted by phosphorus (P), while the DTA and the UA in subtropical monsoon climate region were mainly restricted by nitrogen (N). [Conclusion] The above research shows that climate may be the dominant factor affecting vegetation restoration, and limited nutrient factors affecting vegetation and soil restoration should be fully considered. The research results can provide a scientific basis for the restoration and reconstruction of ecological functions in the earthquake-affected areas in southwestern China.

**Key words:** earthquake-affected area; ecological restoration; vegetation; mineral element; stoichiometric ratio

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震及其次生自然灾害的严重性构成了我国的基本环境背景<sup>[1]</sup>。地震对地表造成强烈扰动,导致地质灾害形成条件发生剧烈的变化,主要表现为松散固体物质条件、微地貌条件和水文条件的变化<sup>[2]</sup>。汶川地震诱发数以万计的滑坡泥石流灾害<sup>[3]</sup>,其滑坡灾害也是迄今为止记录到的,单次地震产生的分布最为密集、数量最多、面积最广的滑坡事件<sup>[4]</sup>;致使原有植被及土体遭到大量掩埋,形成大面积的次生裸地以及创伤面,改变了区域内原有植被与水文的生态过程,植被生长发育的基本条件进一步恶化,造成灾区植被严重受损,植被正常演替过程出现逆转,导致生态脆弱化和景观破碎化<sup>[4-9]</sup>。此外,汶川地震主震区位于青藏高原东缘山地生态脆弱区,地震及其次生灾害通过损毁地下隔水层、改变地质条件及水文过程等作用,降低土壤的水肥保蓄能力和水资源的利用效率,提高区域性干旱程度并引发植物生理干旱,造成原有的脆弱生态系统进一步退化,从而增加植被恢复重建的难度<sup>[9]</sup>。

植被恢复是干扰解除后趋于自然群落的缓慢过程<sup>[10]</sup>,植被覆盖度、物种多样性和群落生物量是评

价植被恢复程度及生态系统恢复效果的重要指标<sup>[11-14]</sup>。植被覆盖度可衡量地表植被状况并描述生态系统的环境变迁过程,对区域水文及生态过程具有重要的指示作用<sup>[15]</sup>。物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式,反映植被恢复程度、群落种类组成、结构水平、稳定性、复杂性和生境差异<sup>[12,14]</sup>,关系到群落环境演变、群落成熟度、生产力、进化时间、捕食竞争与空间异质性等生态过程<sup>[11,16]</sup>。植物群落的生物量是生态系统生产力的基础和功能的主要表现形式<sup>[14,17]</sup>,能反映植被覆盖度与生长情况,是地表植被生产力的体现。汶川地震后,不少学者对灾区植被恢复进行相关研究,主要涉及自然恢复植被的物种组成、恢复途径、多样性、生物量及人工恢复物种筛选等内容,并提出灾区植被恢复对策<sup>[18-20]</sup>。但这些研究内容以单次考察为主,缺乏长时间的定位观测数据,对震后不同气候条件、地形地貌等生境状况下受损治理区植被恢复效果尚不清楚,难以满足灾区长期性植被恢复的需求。

矿物质元素是植物生长和生产的重要元素<sup>[21-22]</sup>,其中C、N和P是限制植物生长的基本营养元素和关键元素<sup>[23-25]</sup>,其在植物体内的含量直接

影响植物生长速率<sup>[26]</sup>。植物体不同功能器官具有不同的结构物质,造成同一植物不同器官的C、N、P含量存在差异<sup>[27]</sup>。以上元素的计量学特征是分析生态系统能量平衡和元素平衡的基本手段,对植物生长<sup>[28-29]</sup>、生态系统功能的发挥<sup>[30]</sup>具有极为重要的作用。

植物C、N、P化学计量特征与植被特性及土壤养分动态的关系,可以解释植物群落的功能差异和演化阶段及其对环境变化的适应性<sup>[27,31]</sup>,并预测陆地生态系统的变化过程。此外,其他元素如K、Ca、N、Mg及微量元素在植物生长过程中具有举足轻重的地位<sup>[32-33]</sup>,进而可以对土壤或者地表碳库产生重要的影响<sup>[34]</sup>。近年来,关于陆地生态系统植被生态化学计量学的研究主要集中于草地<sup>[28, 35-36]</sup>、湿地<sup>[37-39]</sup>和森林<sup>[40-41]</sup>生态系统,并以植物叶片为主要研究器官<sup>[42-44]</sup>,加深了陆地生态系统物质循环、能量流动等方面的认识。然而,针对我国地震灾区不同气候区受损治理区植物不同器官之间元素含量的分配格局及其生态化学计量学特征的研究鲜见报道,难以准确认识植被对灾害干扰的响应机制。因此,研究灾区植物不同器官元素的分配格局及化学计量特征,对揭示震后恢复植被的生态策略和环境适应性具有重要的生态学和植物生理学意义。

本文拟通过对地震灾区生态治理初期不同气候条件下受损治理区和未受损区不同土层土壤养分变化、植被覆盖度、植被群落特征、物种多样性、生物量、6种主要矿物质元素含量及植物体内C、N、P化学计量的变化特征及相互间的关系进行深入分析,以探讨和评价受损治理区人工恢复措施的恢复效果及其时效性和可行性,进一步了解在人为干扰条件下群落内各物种的组合特征和演化趋势,揭示地震灾区植被不同器官矿物质元素含量和C、N、P的分布规律及化学计量特征,为总结地震灾后生态恢复措施、人工干预促进植被正向演替、完善退化生态系统理论等提供重要的数据支撑。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

汶川地震重灾区位于四川盆地西北部和青藏高原东缘的过渡地带,受灾面积约为26 410 km<sup>2</sup>,呈“东北—西南”走向条带状分布,两端最长距离350 km,受灾区主要分布两种气候类型,以龙门山断裂带为界,西北岷江河谷为干旱河谷气候和东南山麓为亚热带季风性气候。干旱河谷气候区样地位于汶川县威州镇岷江与杂谷脑河交会处,102°51' ~

103°44'E,30°45' ~ 31°43'N,海拔1 325 m。气温年较差小,日较差大,春季气温回升快,秋季下降迅速,≥10℃的积温大,持续时间长,低温稳定,年平均气温11.2~12.9℃,最热月平均气温20~21.9℃,最冷月气温0.4~2.4℃;干湿季明显,年降水量515.7 mm,雨季平均降雨量425.2 mm,由于蒸发量大,全年水分亏损严重。受损治理区样地设置在滑坡体上,以挡土墙、铁网石笼为主要治理措施,基带土壤为棕壤和河谷褐土,表面着生的植被类型为典型的先锋群落,未受损样地设置在相近处。亚热带季风性气候区样地位于四川盆地西北部的绵竹市汉旺镇,103°54' ~ 104°20'E,30°09' ~ 31°42'N,平均海拔650 m,属于山前冲洪积扇状平原区,气候温和,降水充沛,四季分明,年平均气温15℃,年降雨量为1 500~1 700 mm,土壤为黄壤及其亚类。受损治理区样地设置在崩塌体上,以竹栅栏和石片叠梯为主要治理措施,未受损样地设置在相近处。取样调查于2015年6月进行,试验区分别设置在汶川县威州镇和绵竹市汉旺镇,治理工程位于试验区域内的生态治理典型示范区内,均在2011年3月竣工。样地具体详情如表1。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置和样品采集

在4个样地坡面分别划分3条样带,样带间隔约15 m,由于样地均以灌木和草本为主,因此将每条样带划分3个5 m×5 m样方进行灌木调查,草本调查则在5 m×5 m灌木样方内划分1 m×1 m进行,同时记录样方内的少量乔木,每个样地共设置9个灌木与草本样方。未受损样地的3个样带均以受损治理样带的同一等高线划分,以同样的距离设置样方并进行植被调查,受损治理区9个样方与未受损区的9个样方对应,以未受损区样地作为植被恢复率的对照。植被调查后,在样方内设置1 m×1 m样方,对样方内植物全部挖取,带回室内将植物分成根、茎、叶3部分,去除杂物,装入信封放置85℃烘箱恒温烘至恒质量,称其干质量,即为生物量(生物量是指现存量,不包括枯枝落叶和枯立部分)。植物3个部位样品共108份。

#### 1.2.2 样品处理及测定

自然风干的土壤样品和烘干植物样品粉碎后均过0.149 mm筛,用于养分分析。植物有机C和土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法;植物N和土壤全氮(TN)采用半微量凯式定氮法;植物P和土壤全磷(TP)采用碱熔-钼锑抗比色法;植物K、Ca、Mg、Na均采用硫酸-高氯酸消煮法后用原子吸收分光光度法测定。

表1 两种气候区受损治理区和未受损区样地概况  
Tab. 1 Sample plot survey of DTA and UA in two climatic regions

气候类型 Climate type	样地类型 Sample plot type	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/ m	坡度 Slope degree/(°)	盖度 Coverage/ %	优势物种 Dominant species
干旱河谷气候区 Arid-valley climate region(V)	受损治理区 Destroyed and treated area (DTA)	103°34'22"E	31°28'21"N	1 371	22	55	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、岷江柏 <i>Cupressus chengiana</i>
	未受损区 Undestroyed area (UA)	103°28'13"E	31°19'16"N	1 260	32	75	白刺花 <i>Sophora davidii</i> 、狗牙 根 <i>Cynodon dactylon</i> 、刺果蔷薇 <i>Rosa acicularis</i>
亚热带季风性气候区 Subtropical monsoon climate region(M)	受损治理区 Destroyed and treated area (DTA)	104°09'31"E	31°27'46"N	722	34	65	飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> 、川 滇盘果菊 <i>Prenanthes henryi</i> 、 竹柳 <i>Salix fragilis</i>
	未受损区 Undestroyed area (UA)	104°09'38"E	31°27'41"N	729	39	80	莎草 <i>Cyperus rotundus</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、扁桃 <i>Amygdalus communis</i>

### 1.2.3 计算方法

根据植被调查数据,将受损治理区与未受损区植被覆盖度的比值作为植被恢复率,本研究采用 $\alpha$ 多样性测度指标,选用 Shannon-Wiener 指数( $H$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )、Simpson 指数( $D$ )和 Species richness 指数( $S$ ),衡量物种多样性特征。

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

$$J = H / \ln S$$

$$D = \sum P_i^2$$

式中: $P_i = N_i / N$ ,  $P_i$  为第  $i$  种的相对重要值;  $N_i$  为第  $i$  个物种个体数,即为种  $i$  的绝对重要值;  $N$  为样方内总个体数,即为种  $i$  所在样方的各个种的重要值之和;  $S$  为种  $i$  所在样地的物种数目。

### 1.2.4 数据处理

运用 Excel 2016 进行数据处理;利用 SPSS 21.0 对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA,差异显著性水平为  $P < 0.05$  时,进行 LSD 检验)、非参数检验(当样本不满足正态分布和方差齐性时)和 Pearson 相关性分析。用 Origin 9.0 进行作图。表中所有数据均为平均值  $\pm$  标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种气候类型受损治理区与未受损区不同土层的土壤养分含量

两种气候区受损治理区(Destroyed and treated area, DTA)与未受损区(Undestroyed area, UA)不同土壤层次的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量分布详见表2。两种气候 DTA 在 0~20 cm 土层 SOC 含量均极显著低于 UA ( $P < 0.001$ ),干

旱河谷气候区 DTA 和 UA 的 SOC 含量总体上均分别高于亚热带季风性气候区。两种气候 DTA 在 0~20 cm 土层 TN 含量均极显著低于 UA ( $P < 0.01$ ),干旱河谷气候区 DTA 的 TN 含量总体上低于亚热带季风性气候区 DTA,而干旱河谷气候区 UA 的 TN 含量总体上高于亚热带季风性气候区 UA。两种气候 DTA 在 0~20 cm 土层 TP 含量均极显著低于 UA ( $P < 0.01$ ),干旱河谷气候区 DTA 的 TP 含量总体上低于亚热带季风性气候区 DTA,而两种气候 UA 的 TP 含量没有显著差异。

对有机碳、全氮和全磷含量在不同土层分布而言,3 种土壤养分含量在 0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm 之间均没有显著差异,两种气候 UA 在 0~5 cm 表层土壤养分整体上高于深层土壤(TP 除外),而 DTA 没有明显分布规律。

### 2.2 两种气候类型受损治理区与未受损区的群落特征和多样性分析

地震灾区不同气候区之间的主要植被类型存在差异,干旱河谷气候区 DTA 样地主要物种包括狗尾草(*Setaria viridis*)、人为种植的 1 年生刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和岷江柏(*Cupressus chengiana*)等,独有物种有万寿菊(*Tagetes erecta*)和红椿(*Toona ciliata*)。干旱河谷气候区 UA 样地地表植被以白刺花(*Sophora davidii*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、刺果蔷薇(*Rosa acicularis*)等多年生草本和低矮灌木为主,特有种有锦鸡儿(*Caragana sinica*)、狗牙根、灰苞蒿(*Artemisia roxburghiana*)、三叶菔(*Caryopteris terniflora*)、铁线莲(*Clematis florida*)、四川黄栌(*Cotinus szechuanensis*)、刺果蔷薇、华西小石积(*Osteomeles schwerinae*)、白刺花、葱木(*Aralia*

表2 两种气候类型受损治理区与未受损区不同土层的土壤养分含量

Tab.2 Soil nutrient content in different soil layers of DTA and UA in two climatic regions

土壤养分 Soil nutrient	土层 Soil layer/cm	干旱河谷气候区 V			亚热带季风性气候区 M		
		DTA/(g·kg <sup>-1</sup> )	UA/(g·kg <sup>-1</sup> )	F	DTA/(g·kg <sup>-1</sup> )	UA/(g·kg <sup>-1</sup> )	F
有机碳 Soil organic carbon (SOC)	0~5	12.41 ± 2.39a	33.23 ± 4.24α	18.317***	10.13 ± 1.04a	29.64 ± 1.88α	82.439***
	5~10	10.69 ± 1.93a	30.35 ± 3.91α	20.326***	10.27 ± 1.55a	25.50 ± 1.75α	42.563***
	10~20	10.75 ± 2.39a	29.59 ± 3.71α	18.237***	10.01 ± 1.86a	26.29 ± 1.89α	37.833***
总氮 Total nitrogen (TN)	0~5	0.83 ± 0.14a	2.89 ± 0.39α	24.276***	1.21 ± 0.09a	2.55 ± 0.31α	17.301***
	5~10	0.87 ± 0.16a	2.80 ± 0.42α	18.614***	1.16 ± 0.16a	2.24 ± 0.24α	14.229**
	10~20	0.82 ± 0.17a	2.74 ± 0.41α	18.949***	1.22 ± 0.23a	2.19 ± 0.23α	8.958**
总磷 Total phosphorus (TP)	0~5	0.41 ± 0.05a	1.17 ± 0.18α	16.344***	0.49 ± 0.06a	1.00 ± 0.11α	15.773***
	5~10	0.44 ± 0.07a	1.04 ± 0.16α	12.155**	0.58 ± 0.05a	1.10 ± 0.12α	16.531***
	10~20	0.45 ± 0.06a	1.06 ± 0.18α	10.158**	0.55 ± 0.04a	1.19 ± 0.17α	14.184**

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ 。同列不同小写英文字母表示一种元素含量在受损治理区不同土层差异显著 ( $P < 0.05$ ); 同列不同小写希腊字母表示一种元素含量在未受损区不同土层差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Notes: \* means  $P < 0.05$ , \*\* means  $P < 0.01$ , \*\*\* means  $P < 0.001$ . Different lowercase English letters in the same column indicate that the content of one element between different soil layers is significantly different in DTA ( $P < 0.05$ ); different lowercase Greek letters in the same column indicate that the content of one element between different soil layers is significantly different in UA ( $P < 0.05$ ). The same below.

*chinensis*)等。亚热带季风性气候区受损 DTA 样地植被类型主要以飞蓬 (*Conyza canadensis*)、川滇盘果菊 (*Prenanthes henryi*)、竹柳 (*Salix fragilis*) 等为主要优势种, 特有种有苞茅 (*Hyparrhenia bracteata*)、地杨梅 (*Luzula campestris*)、一点红 (*Emilia sonchifolia*)、青蒿 (*Artemisia carvifolia*)、苦菊 (*Cichorium endivia*)、革命菜 (*Gynura crepidioides*)、笔管草 (*Equisetum ramosissimum*)、假草莓 (*Rubus pectinarius*)。亚热带季风性气候区未受损样地现有地表植被以莎草 (*Cyperus rotundus*)、刺槐、扁桃 (*Amygdalus communis*) 等为主, 独有种有牛至 (*Origanum vulgare*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、须芒草 (*Andropogon virginicus*)、清明菜 (*Anaphalis flavescens*)、野葡萄 (*Ampelopsis brevipedunculata*)、扁桃、川莓 (*Rubus setchuenensis*)、莎草、冷水花 (*Pilea notata*)。

由表3知,地震灾区同一气候区 DTA 与 UA 之间的植被覆盖度存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。两个气候区的 UA 植被覆盖度均约为 80%, 干旱河谷气候 DTA 植被覆盖度约为 41%, 低于亚热带季风气候 DTA 约为 52.2%。值得注意的是,同一气候区内 DTA 植被覆盖度的变异系数均高于 UA。其中干旱河谷气候区和亚热带季风性气候区 DTA 的变异系数分别 40.44% 和 23.06%, 高于 UA 的 14.49% 和 8.62%。物种丰富度和植物多样性的数据表明(表4),干旱河谷气候区灌木和草本的多样性表现为 DTA 与 UA 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。由于亚热带季风性气候区内只有 DTA 存在少量的灌木, UA 灌木种类极少, 故 DTA 与 UA 未进行差异性比较; 在亚热带季风性气候区内, 草本层物种数、多样性指数中的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数均表现为 DTA 显著高于 UA ( $P < 0.05$ ), 但均匀度无显著差异。

表3 两种气候类型受损治理区与未受损区植被覆盖度及其变异系数

Tab.3 Vegetation coverage and its coefficient of variation of DTA and UA in two climatic regions

%

气候类型 Climate type	样地类型 Sample plot type	植被覆盖度 Vegetation coverage	变异系数 Coefficient of variation	植被恢复率 Vegetation recovery rate
干旱河谷气候区 Arid-valley climate region	受损治理区 DTA	41.0 ± 4.1b	40.44	50.68
	未受损区 UA	80.9 ± 5.9a	14.49	
亚热带季风性气候区 Subtropical monsoon climate region	受损治理区 DTA	52.2 ± 4.3b	23.06	65.74
	未受损区 UA	79.4 ± 2.4a	8.62	

注: 相同气候区不同小写字母表示差异性显著 ( $P < 0.05$ )。Note: different lowercase letters in the same climate region mean significant difference ( $P < 0.05$ ).

表4 两种气候类型受损治理区和未受损区物种丰富度与多样性

Tab. 4 Species richness and diversity of DTA and UA in two climatic regions

植被类型 Plant type	指数 Index	干旱河谷气候区 V		亚热带季风性气候区 M	
		DTA	UA	DTA	UA
灌木 Shrub	Species richness( <i>S</i> )	3.00a	3.00a	1.67	—
	Shannon-Wiener( <i>H</i> )	0.81a	0.76a	0.79	—
	Simpson( <i>D</i> )	0.46a	0.56a	0.49	—
	Pielou( <i>J</i> )	0.40a	0.35a	0.43	—
草本 Herb	Species richness( <i>S</i> )	5.50a	4.17a	4.67b	9.00a
	Shannon-Wiener( <i>H</i> )	0.94a	1.08a	1.13b	1.77a
	Simpson( <i>D</i> )	0.47a	0.63a	0.55b	0.76a
	Pielou( <i>J</i> )	0.27a	0.33a	0.36a	0.44a

注:相同气候区同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。Note: different lowercase letters in the same climate region and the same row mean significant difference ( $P < 0.05$ ).

### 2.3 两种气候类型受损治理区与未受损区灌草层植物生物量及其碳含量

地震灾区不同气候区灌草层的生物量如表5所示。两个气候区的生物量总量、根、茎、叶均表现为UA大于DTA,其中总生物量、茎生物量均表现为UA显著大于DTA( $P < 0.05$ ),但根、叶部位DTA与UA间无显著差异( $P > 0.05$ )。干旱河谷气候DTA

和UA的生物量总量分别为211.02和267.24 g/m<sup>2</sup>,亚热带季风性气候DTA与UA的生物量总量则分别为194.00和241.24 g/m<sup>2</sup>。在干旱河谷气候区,植物不同器官碳含量均表现为DTA大于UA(表6),只有叶器官存在显著差异( $P < 0.05$ )。亚热带季风性气候DTA与UA植物不同器官碳含量均无显著差异( $P > 0.05$ )。

表5 两种气候类型受损治理区与未受损区生物量

Tal. 5 Biomass and carbon reserve of DTA and UA in two climatic regions

部位 Part	干旱河谷气候区 V			亚热带季风性气候区 M		
	DTA/(g·m <sup>-2</sup> )	UA/(g·m <sup>-2</sup> )	<i>F</i>	DTA/(g·m <sup>-2</sup> )	UA/(g·m <sup>-2</sup> )	<i>F</i>
根 Root	51.38 ± 6.16	53.29 ± 6.95	0.042	42.84 ± 5.53	42.40 ± 6.90	0.003
茎 Stem	92.31 ± 9.90	135.96 ± 12.67	7.368 *	101.69 ± 5.87	128.13 ± 9.36	5.727 *
叶 Leaf	67.33 ± 7.02	78.00 ± 10.32	0.731	49.47 ± 6.66	70.58 ± 7.54	4.401
总 Total	211.02 ± 14.31	267.24 ± 19.62	5.358 *	194.00 ± 14.65	241.11 ± 14.93	5.073 *

表6 两种气候类型受损治理区与未受损区植物不同器官碳含量

Tab. 6 Carbon content of different organs of plant of DTA and UA in two climatic regions

部位 Part	干旱河谷气候区 V			亚热带季风性气候区 M		
	DTA/(g·kg <sup>-1</sup> )	UA/(g·kg <sup>-1</sup> )	<i>F</i>	DTA/(g·kg <sup>-1</sup> )	UA/(g·kg <sup>-1</sup> )	<i>F</i>
根 Root	393.54 ± 25.72	354.97 ± 8.19	2.043	342.90 ± 12.20	351.04 ± 6.85	0.338
茎 Stem	411.46 ± 22.86	371.15 ± 6.16	2.900	379.23 ± 11.46	373.08 ± 12.51	0.131
叶 Leaf	418.91 ± 26.80	320.62 ± 8.37	12.253 **	338.52 ± 10.58	338.79 ± 7.41	0.000
平均 Mean	407.97 ± 14.12	348.91 ± 5.92	14.875 ***	353.55 ± 7.28	354.30 ± 5.85	0.006

### 2.4 两种气候类型受损治理区与未受损区植物不同器官6种矿物质元素含量

通过表7可知,植物6种矿物质元素主要表现为N > K > Ca > Mg > P > Na,不同气候区之间植物矿物质元素含量存在差异。植物根器官6种矿物质元素表现为N > K > Ca > Mg > P > Na;除Mg在干旱河谷气候区植物根器官表现为DTA高于UA,K在亚热带季风性气候区植物根器官表现为DTA高于

UA外,其他元素在两个气候区植物根器官均表现为UA大于DTA。植物茎器官6种矿物质元素含量分布特征,除在干旱河谷气候区DTA表现为Ca含量高于K含量外,其余均与植物根器官相同,但UA与DTA之间的元素含量大小未呈现出较为一致的规律。植物叶器官含量较高的依然为N、Ca、K,而Mg、P、Na含量较低,但Ca含量在两个气候区内均表现为UA显著高于DTA( $P < 0.05$ )。植物体内不

同器官的 K 元素含量在 DTA 与 UA 间均没有显著显著。干旱河谷气候区植物根、茎器官及亚热带季风性气候区植物茎器官的 Mg 元素含量,均表现为 DTA 极显著高于 UA ( $P < 0.001$ ),但在叶器官均不

显著。对 N、P、Ca 和 Mg 在植物不同部位总体分布而言,叶器官含量均显著高于根、茎器官,而 K 和 Na 没有明显的分布规律。

表 7 两种气候类型受损治理区与未受损区植物 6 种矿物质元素含量及其差异性

Tab.7 Six kinds of mineral element content of DTA and UA and their significant difference in two climate type regions

元素 Element	部位 Part	干旱河谷气候区 V			亚热带季风性气候区 M		
		DTA/(g·kg <sup>-1</sup> )	UA/(g·kg <sup>-1</sup> )	F	DTA/(g·kg <sup>-1</sup> )	UA/(g·kg <sup>-1</sup> )	F
N	根 Root	10.35 ± 0.85b	11.31 ± 1.03β	0.508	12.40 ± 0.93b	14.19 ± 1.45β	1.078
	茎 Stem	10.90 ± 0.70b	8.84 ± 0.56γ	5.324 *	10.42 ± 0.74b	13.60 ± 1.12β	5.606 *
	叶 Leaf	17.98 ± 0.50a	20.67 ± 0.65α	10.825 **	22.65 ± 1.28a	23.83 ± 1.81α	0.286
P	根 Root	0.51 ± 0.04b	0.96 ± 0.16α	7.319 *	1.04 ± 0.12b	1.14 ± 0.13β	0.316
	茎 Stem	0.44 ± 0.03b	0.84 ± 0.15α	6.469 *	1.02 ± 0.09b	1.06 ± 0.09β	0.107
	叶 Leaf	0.73 ± 0.04a	1.14 ± 0.13α	8.573 *	1.55 ± 0.07a	2.07 ± 0.22α	4.982 *
K	根 Root	9.00 ± 0.79a	9.48 ± 1.36α	0.093	13.50 ± 1.12b	13.46 ± 1.00β	0.010
	茎 Stem	8.08 ± 0.73a	8.25 ± 0.54α	0.034	15.43 ± 0.87b	13.28 ± 0.80β	3.313
	叶 Leaf	8.30 ± 0.55a	9.91 ± 1.18α	1.530	18.02 ± 0.57a	16.79 ± 1.12α	0.963
Ca	根 Root	7.91 ± 1.10b	8.50 ± 1.36β	0.113	6.19 ± 0.96b	10.27 ± 2.10β	3.101
	茎 Stem	9.70 ± 0.99b	7.72 ± 1.46β	1.251	9.77 ± 1.03b	4.80 ± 0.33β	21.222 ***
	叶 Leaf	14.73 ± 1.34a	25.28 ± 3.65α	7.379 *	15.84 ± 2.41a	28.37 ± 3.25α	9.600 **
Na	根 Root	0.36 ± 0.05a	0.54 ± 0.07α	4.168	0.25 ± 0.03a	0.33 ± 0.02αβ	4.572 *
	茎 Stem	0.24 ± 0.03a	0.41 ± 0.05α	7.755 *	0.20 ± 0.03a	0.27 ± 0.03β	4.139
	叶 Leaf	0.28 ± 0.04a	0.41 ± 0.06α	3.048	0.24 ± 0.04a	0.39 ± 0.04α	7.136 *
Mg	根 Root	3.50 ± 0.14ab	2.41 ± 0.20β	20.571 ***	1.53 ± 0.18b	1.74 ± 0.21β	0.633
	茎 Stem	3.10 ± 0.16b	1.97 ± 0.19β	21.039 ***	1.80 ± 0.07b	1.14 ± 0.09γ	32.587 ***
	叶 Leaf	3.91 ± 0.15a	4.11 ± 0.22α	0.566	2.66 ± 0.17a	2.73 ± 0.15α	0.089

注:同列不同小写英文字母表示一种元素含量在受损治理区植物不同部位差异显著 ( $P < 0.05$ );同列不同小写希腊字母表示一种元素含量在未受损区植物不同部位差异显著 ( $P < 0.05$ )。Notes: different lowercase English letters in the same column indicate that the content of one element is significantly different in different plant parts. Different lowercase Greek letters in the same column indicate that the content of one element is significantly different in varied parts of the plant in UA ( $P < 0.05$ ).

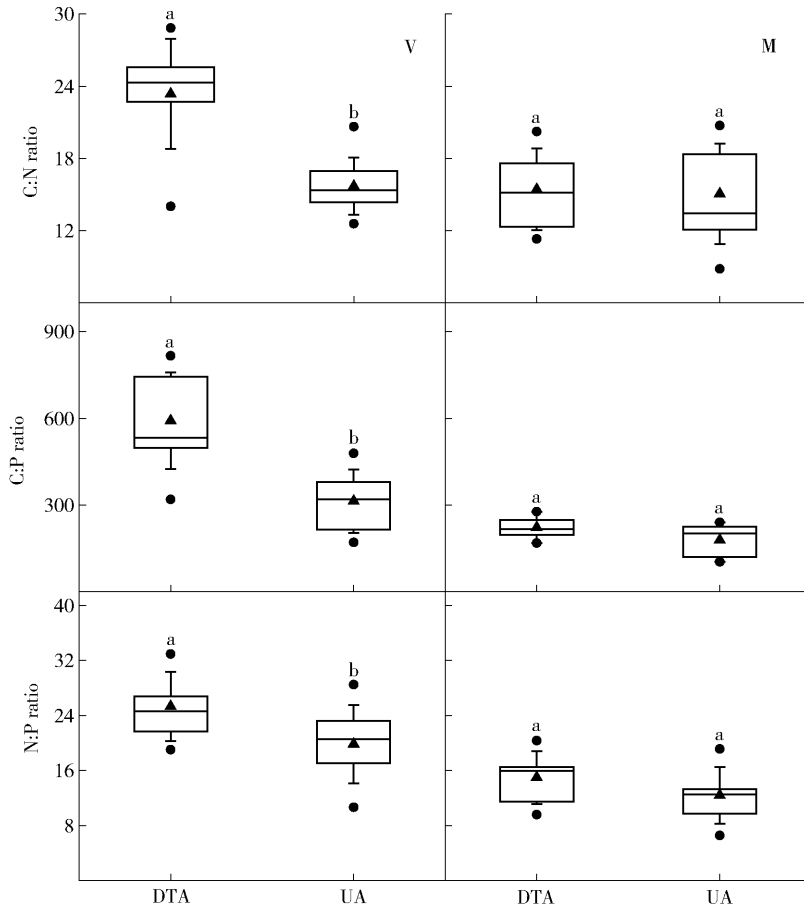
## 2.5 两种气候类型受损治理区与未受损区植物叶片 C、N、P 化学计量比

由于植物叶片的 C、N、P 化学计量比能够反映植物分配养分的情况,因此本研究主要侧重于叶片化学计量特征(图 1)。在两个气候类型中,叶片 C:N、C:P 和 N:P 均表现为 DTA 高于 UA,但仅干旱河谷气候区的 DTA 显著高于 UA ( $P < 0.05$ )。干旱河谷气候区的 C:N、C:P 和 N:P 均高于亚热带季风性气候区。

## 2.6 两种气候类型受损治理区与未受损区的植物恢复特征和植被、土壤养分含量相关性

表 8 所示,植被覆盖度(VC)与土壤养分(SOC、TN 和 TP)和植物 Ca 呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与物种丰富度(SR)、植物 P 和植物 Na 呈现显著正相关 ( $P < 0.05$ ),而与植物 C:P 呈现极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),与植物 C 和植物 N:P 呈现显著

负相关 ( $P < 0.05$ )。物种丰富度(SR)和生物量(BM)与 SOC 和 TN 均呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。植物 C 与 TP 呈现极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),与 N、SOC 和 TN 呈现显著负相关 ( $P < 0.05$ ),而与 Mg、C:N 和 C:P 则呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ );植物 C 与土壤养分(SOC、TN 和 TP)的负相关性,表明植物 C 含量越高,土壤养分含量越低,而植物 C 与 Mg 的正相关性,这可能由于 Mg 是叶绿素重要组成物质,Mg 含量直接影响植物光合作用能力。植物 N 与 P 呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与 K 呈现显著正相关 ( $P < 0.05$ ),而与 Mg、C:N 和 C:P 则呈现极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。植物 P 与 K 呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与 TP 呈现显著正相关 ( $P < 0.05$ ),而与 Mg、C:N、C:P 和 N:P 则呈现极显著负相关 ( $P < 0.01$ );植物 K 与 Na、Mg、C:P、N:P 呈现极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),与 C:N 呈



箱图上下边界分别表示数据分布的75%、25%，中间横线表示中位数；最高点为最大值，最低点为最小值，三角形表示平均值。不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。The upper and lower boundaries of the box plots represent the 75th and 25th percentiles, respectively, and the middle line of the box plots indicate the median; the highest point is the maximum value, the lowest point is the minimum value, and the triangles represent the mean. Different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

图1 不同气候区受损治理区和未受损区植物叶片 C、N 和 P 化学计量比

Fig. 1 Plant leaf C: N: P stoichiometric ratio of DTA and UA in different climate regions

表8 两种气候类型受损治理区与未受损区的植物恢复特征和植被、土壤养分含量相关性

Tab. 8 Correlations between plant nutrient content and soil nutrient content of DTA and UA in two climatic regions

项目 Item	VC	SR	BM	C	N	P	K	Ca	Na	Mg	C: N	C: P	N: P	SOC	TN	TP
VC	1															
SR	0.402 *	1														
BM	0.266	0.525 **	1													
C	-0.403 *	-0.250	-0.138	1												
N	0.119	-0.224	-0.268	-0.390 *	1											
P	0.382 *	-0.032	-0.013	-0.288	0.433 **	1										
K	0.108	-0.114	-0.195	-0.217	0.334 *	0.557 **	1									
Ca	0.596 **	0.198	0.070	-0.305	0.109	0.240	0.076	1								
Na	0.408 *	0.245	0.376 *	-0.279	-0.020	-0.085	-0.427 **	0.114	1							
Mg	-0.262	-0.091	-0.044	0.437 **	-0.428 **	-0.647 **	-0.586 **	0.108	0.096	1						
C: N	-0.312	0.048	0.137	0.798 **	-0.841 **	-0.456 **	-0.372 *	-0.289	-0.116	0.500 **	1					
C: P	-0.469 **	-0.089	0.045	0.639 **	-0.471 **	-0.860 **	-0.588 **	-0.316	0.013	0.689 **	0.683 **	1				
N: P	-0.409 *	-0.114	-0.020	0.236	-0.118	-0.879 **	-0.553 **	-0.223	0.133	0.605 **	0.228	0.853 **	1			
SOC	0.673 **	0.572 **	0.574 **	-0.358 *	0.001	0.206	-0.041	0.405	0.512 **	-0.119	-0.169	-0.239	-0.204	1		
TN	0.661 **	0.590 **	0.581 **	-0.360 *	0.002	0.280	0.025	0.319	0.515 **	-0.206	-0.162	-0.303	-0.308	0.897 **	1	
TP	0.501 **	0.293	0.323	-0.444 **	0.293	0.406 *	-0.012	0.377 *	0.297	-0.283	-0.444 **	-0.499 **	-0.382 *	0.392 *	0.296	1

注: VC、SR、BM、C、N、P、K、Ca、Na、Mg、C: N、C: P、N: P、SOC、TN 和 TP 分别代表植被覆盖度、物种丰富度、生物量、植物 C、植物 N、植物 P、植物 K、植物 Ca、植物 Na、植物 Mg、植物 C: N、植物 C: P、植物 N: P、土壤有机碳、土壤总氮和土壤总磷。Notes: VC, SR, BM, C, N, P, K, Ca, Na, Mg, C: N, C: P, N: P, SOC, TN and TP mean vegetation coverage, species richness, biomass, plant carbon, plant nitrogen, plant phosphorus, plant potassium, plant calcium, plant sodium, plant magnesium, plant C: N, plant C: P, plant N: P, soil organic carbon, soil total nitrogen, soil total phosphorus, respectively.



现显著负相关( $P < 0.05$ )。SOC 与 TN 存在极显著的相关性说明 SOC 和 TN 之间关系密切,其含量的恢复程度也具有较高的相关性,TP 与 SOC、TN 之间的相关性不高,说明 TP 与 SOC、TN 的累积和来源可能存在差异性。

### 3 讨 论

#### 3.1 两种气候受损治理区与未受损区的土壤养分

两种气候类型未受损区不同土层土壤养分(SOC、TN 和 TP)均明显高于受损治理区,未受损区3种主要土壤养分含量大约为受损治理区的2倍(表2),表明短期内土壤养分含量恢复过程较为缓慢。王春明等<sup>[45]</sup>在汶川地震发生前(2003年)对岷江干旱河谷气候区养分特征研究发现,该地区土壤表层 SOC 含量介于 32.55 ~ 72.78 g/kg 之间,整个土壤剖面 TN 介于 0.78 ~ 4.00 g/kg 之间,TP 介于 0.33 ~ 0.68 g/kg 之间,这与本研究干旱河谷气候区的未受损区土壤养分含量相似,说明该区域未受损样地的土壤养分含量在地震发生前后变化不明显。地震及次生灾害破坏土壤剖面层次并影响土壤理化性质,弱化地表植被对土壤理化性质的改良效果。虽然震后植被恢复可通过根系及枯落物重新补充土壤中元素含量,但降水冲刷山体造成表土层剥落,产生大量粉砂粒并堆积,导致土壤密度增大,植被返还土壤的枯落物受高密度土壤阻挡,其积累与腐殖质化过程均发生于地表,极易受降水冲刷造成流失,进而在短期内无法在土壤中快速积累各种养分<sup>[46-47]</sup>。

#### 3.2 两种气候受损治理区与未受损区植被恢复特征分析

地震灾区两种气候区的植被恢复率存在一定的差异(表3)。总体而言,亚热带季风性气候区的植被恢复率(65.74%)高于干旱河谷气候区的植被恢复率(50.68%),这可能由于两种气候自然条件差异较大,亚热带季风气候区受东南季风的影响,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。受损治理区的植被覆盖度具有较高的异质性,亚热带季风气候区和干旱河谷气候区植被盖度的空间异质性分别为 23.06% 和 40.44%,说明在植被恢复的过程中,受损治理区内植被恢复差异性较大,特别是干旱河谷气候区植被破碎化较严重,土壤养分和土壤种子库分布不均,导致植被覆盖度空间异质性高<sup>[48]</sup>。

植物多样性结果表明,干旱河谷气候区灌木种类较亚热带季风性气候区高,亚热带季风气候区主要物种以草本为主(表4)。然而,在不同气候区受损治理区与未受损区的丰富度与多样性指数中,仅

亚热带季风性气候区物种丰富度、Shannon-Wiener 和 Simpson 指数表现为未受损区显著高于受损治理区,这与罗清虎等<sup>[49]</sup>的前期研究结论一致。干旱河谷区人为引种物种多于亚热带季风性气候区,这可能是造成受损治理区多样性指数与未受损区无显著差异的主要原因。

干旱河谷气候受损治理区和未受损区的生物量总量分别为 211.02 和 267.24 g/m<sup>2</sup>,亚热带季风性气候受损治理区和未受损区的生物量总量则分别为 194.00 和 241.24 g/m<sup>2</sup>(表5),说明受损治理区植被也未恢复到其原有水平。就植物不同部位的生物量而言,未受损区的茎器官生物量在两种气候均明显高于受损治理区,这可能因为未受损区灌木较多,茎分布数量高于受损治理区<sup>[50]</sup>。

#### 3.3 两种气候受损治理区与未受损区植物养分及叶片化学计量特征分析

在干旱河谷气候区受损治理区植物叶器官碳含量显著高于未受损区,且在植物叶器官表现显著差异,这可能与受损治理区植被覆盖度低于未受损区,其单株植物光合作用能力较强和有机质积累速度较快有关,但植物碳含量在亚热带季风气候区没有明显差异,这可能是因为该区域水热条件较好,植物碳合成不受限制。

植物叶片6种元素含量大小为  $N > K > Ca > Mg > P > Na$ (表7),与 Han 等<sup>[42]</sup>的研究结果相似,即中国植物叶片11种矿物质含量大小依次为  $N > K > Ca > Si > Mg > S > Na > P > Al > Fe > Mn$ 。与 Han 等<sup>[42]</sup>的研究结果比较,仅 K、Ca 两种元素存在明显的差异,K 低于全国平均含量,Ca 则高于全国平均含量,其中未受损叶片 Ca 含量约为全国的3倍,这可能与灾区土壤母质中钙含量较高有关<sup>[51]</sup>。

叶片中 C:N、C:P 主要受到 N、P 的影响,因而 C:N、C:P 能够反映植物对 N、P 元素的利用效率及其对 C 的同化能力<sup>[52-53]</sup>。本研究中,干旱河谷地区植物叶片 C:N、C:P、N:P 均高于亚热带季风性气候区。在不同气候区中,C:N、C:P、N:P 均表现为受损治理区高于未受损区,其中干旱河谷气候区受损治理区显著高于未受损区。有研究表明,生物个体的生长速率与 C:N、C:P 比率呈负相关<sup>[54-55]</sup>,由此推断亚热带季风气候区植被的生长率高于干旱河谷气候区,同一气候区内植被的生长率也表现为未受损区高于受损治理区。N、P 以及其比率 N:P 能够表现植物 N、P 的缺乏程度,Koerselman 等<sup>[56]</sup>的研究发现,当鲜叶 N:P < 14,植物受 N 限制,当鲜叶 N:P > 16,植物受 P 限制,当 N:P 在 14 ~ 16 之间,植物共同受 N、P 限制。在本研究中,干旱河谷气候区 N:P 均高

于亚热带季风气候区。干旱河谷气候区受损治理区和未受损区的 N:P 分别为 25.30 和 19.83, 表现为 P 限制; 亚热带季风性气候受损治理区和未受损区的 N:P 则分别为 14.98 和 12.37, 受损治理区表现为 N、P 共同限制, 未受损区则表现为 N 限制。

### 3.4 植被恢复特征养分含量和化学计量比与土壤养分相关性分析

影响植被覆盖度、物种丰富度和生物量的因素众多, 本文发现土壤有机碳、全氮和全磷与植被覆盖度呈显著正相关, 这与 Xu 等<sup>[57]</sup>的研究结果一致, 即改善土壤环境可增加物种丰富度<sup>[58]</sup>。C:P 是碳素与磷素总质量的比值, 能够显示植物有机质组成和质量程度, 也是表示磷有效性的指标, 其主要受有机质的积累速率影响<sup>[59]</sup>。本研究中 C:P 与 C 呈极显著正相关, 与 P 呈极显著负相关(表 8), 受损治理区植物 C:P 高于未受损区, 表明受损区虽然经过治理, 但受降水冲刷, 植被有机碳仍处于下降趋势, 磷的有效性仍较低。

## 4 结 论

通过汶川地震重灾区汶川县(干旱河谷气候区)和绵竹市(亚热带季风气候区)的受损治理典型样地与未受损样地进行对比, 分析了不同气候区受损治理区和未受损区土壤养分含量、植被的恢复特征、生物量和植被不同器官 6 种主要矿物质元素含量以及 C、N、P 组成特征及其分布规律以及其两两之间化学计量特征。

(1) 亚热带季风性气候区受损治理区的植被恢复率高于干旱河谷气候区受损治理区, 其恢复过程中植被分布也较干旱河谷气候区受损治理区均匀, 但受损治理区的恢复效果仍未达到未受损水平。

(2) 在干旱河谷气候区, 植物不同器官碳含量均表现为受损治理区大于未受损区, 而亚热带季风性气候受损治理区与未受损区植物不同器官碳含量相当。

(3) 植物不同器官 6 种矿物质元素主要表现为  $N > K > Ca > Mg > P > Na$ ; 通过叶片 N:P 发现, 干旱河谷气候区受损治理区和未受损区主要受 P 限制; 亚热带季风性气候区受损治理区和未受损区则主要受 N 限制。

### 参 考 文 献

[1] 王峰, 周立江, 刘波, 等. 汶川地震四川重灾区森林景观变迁及间接损失研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 67-71.  
Wang F, Zhou L J, Liu B, et al. Study on variation of forest landscape and indirect loss in Sichuan seriously disaster area by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Soil and Water

Conservation. 2009, 23(5): 67-71.

- [2] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 10-19.  
Cui P, Zhuang J Q, Chen X C, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan Area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 10-19.
- [3] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述[J]. 地质论评, 2010, 56(6): 860-874.  
Xu C, Dai F C, Xu X W. Wenchuan earthquake-induced landslides: an overview [J]. Geological Review, 2010, 56(6): 860-874.
- [4] 包维楷. 汶川地震重灾区生态退化及其恢复重建对策[J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(4): 324-329.  
Bao W K. Ecological degradation and restoration and reconstruction countermeasures for severe calamity regions in Wenchuan earthquake in Sichuan [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23(4): 324-329.
- [5] Wang Z Y, Shi W J, Liu D D. Continual erosion of bare rocks after the Wenchuan earthquake and control strategies [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 915-925.
- [6] Zhang J D, Hull V, Xu W H, et al. Impact of the 2008 Wenchuan earthquake on biodiversity and giant panda habitat in Wolong Nature Reserve, China [J]. Ecological Research, 2011, 26(3): 523-531.
- [7] Wang Z Y, Cui P, Wang R Y. Mass movements triggered by the Wenchuan earthquake and management strategies of quake lakes [J]. International Journal of River Basin Management, 2009, 7(4): 391-402.
- [8] Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation [J]. Landslides, 2009, 6(3): 209-223.
- [9] 刘彬, 吴福忠, 张健, 等. 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 [J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5892-5898.  
Liu B, Wu F Z, Zhang J, et al. Key issues in restoration on earthquake-damaged ecosystem at the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5892-5898.
- [10] 张晶晶, 王蕾, 许冬梅. 荒漠草原自然恢复中植物群落组成及物种多样性 [J]. 草业科学, 2011(6): 1091-1094.  
Zhang J J, Wang L, Xu D M. Composition and plant species diversity of plant community in the process of natural restoration of desert steppe [J]. Pratacultural Science, 2011(6): 1091-1094.
- [11] Inouye R S, Huntly N J, Tilman D, et al. Old-field succession on a Minnesota Sand Plain [J]. Ecology, 1987, 68(1): 12-26.
- [12] Nagaraja B C, Somashekar R K, Raj M B. Tree species diversity and composition in logged and unlogged rainforest of Kudremukh National Park, South India [J]. Journal of Environmental Biology, 2005, 26(4): 627.
- [13] 吴祥云, 卢慧, 王晓娇. 固沙林采伐迹地撂荒后自然恢复的植物多样性、生物量与土壤养分含量的变化 [J]. 生态学报, 2007, 26(7): 978-982.  
Wu X Y, Lu H, Wang X J. Changes of plant diversity, biomass,

- and soil nutrients in cutting slash of artificial sand fixation forest after fallowing and natural restoration [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(7): 978-982.
- [14] 漆良华,彭镇华,张旭东,等. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2007,26(11): 1697-1702.  
Qi L H, Peng Z H, Zhang X D, et al. Species diversity and biomass allocation of vegetation restoration communities on degraded lands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(11): 1697-1702.
- [15] 马志勇,沈涛,张军海,等. 基于植被覆盖度的植被变化分析[J]. 测绘通报, 2007(3): 45-48.  
Ma Z Y, Shen T, Zhang J H, et al. Vegetation changes analysis based on vegetation coverage [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(3): 45-48.
- [16] 张光富. 浙江天童山区灌丛群落的物种多样性及其与演替的关系[J]. 生物多样性, 2000, 8(3): 271-276.  
Zhang G F. Species diversity of a shrub community in Tiantong Region, Zhejiang Province and its implication for succession[J]. Biodiversity Science, 2000, 8(3): 271-276.
- [17] 杨利民,周广胜,李建东. 松嫩平原草地群落物种多样性与生产力关系的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 589-593.  
Yang L M, Zhou G S, Li J D. Relationship between productivity and plant species diversity of grassland communities in Songnen Plain of Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 26(5): 589-593.
- [18] Viña A, Chen X, McConnell W J, et al. Effects of natural disasters on conservation policies; the case of the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Ambio, 2011, 40(3): 274.
- [19] 黄光忠,刘向东,何飞. 岷江上游地震灾后受损植被状况及其恢复重建对策[J]. 四川林业科技, 2009, 30(3): 95-99.  
Huang G Z, Liu X D, He F. Damaged vegetation situation after the earthquake in the upper reaches of Minjiang River and its restoration and reconstruction measures [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2009, 30(3): 95-99.
- [20] 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.  
Liu S J, Zhang B, Yang Q W, et al. Research on the natural recovery of vegetation on the non-normative landslide mass in Wenchuan earthquake: take landslide mass in Xie Jia Dian of Ying Chang Gou in Pengzhou as an example[J]. Mountain Research, 2010, 28(3): 373-378.
- [21] Iii F S C, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. London:Springer, 2014: 369-397.
- [22] Aerts R, Chapin F S I. The mineral nutrition of wild plants revisited; a re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30(8): 1-67.
- [23] Cleland E E. Nutrient co-limitation of primary producer communities. [J]. Ecology Letters, 2011, 14(9): 852-862.
- [24] Koerselman W. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [25] 郭宝华,刘广路,范少辉,等. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征[J]. 林业科学, 2014, 50(6): 1-9.  
Guo B H, Liu G L, Fan S H, et al. Distribution patterns and stoichiometry characteristics of C, N, P in *Phyllostachys edulis* forests of different productivity levels[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(6): 1-9.
- [26] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2008, 39(39): 153-170.
- [27] 刘超,王洋,王楠,等. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1205-1216.  
Liu C, Wang Y, Wang N, et al. Advances research in plant nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in terrestrial ecosystems: a review [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(11): 1205-1216.
- [28] 宾振钧,王静静,张文鹏,等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸6个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 231-237.  
Bin Z J, Wang J J, Zhang W P, et al. Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3): 231-237.
- [29] 刘兴诏,周国逸,张德强,等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N、P的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.  
Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64-71.
- [30] Yu Q, Chen Q S, Elser J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning, and stability [J]. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1390.
- [31] Venterink H O, Wassen M J, Verkoost A W M, et al. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands[J]. Ecology, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [32] Makkonen M, Berg M P, Handa I T, et al. Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient [J]. Ecology Letters, 2012, 15(9): 1033-1041.
- [33] 闫帮国,纪中华,何光熊,等. 金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5668-5674.  
Yan B G, Ji Z H, He G X, et al. The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5668-5674.
- [34] Reich P B, Oleksyn J, Modrzyński J, et al. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species[J]. Ecology Letters, 2005, 8(8): 811-818.
- [35] Song Z L, Liu H Y, Zhao F J, et al. Ecological stoichiometry of N:P:Si in China's grasslands[J]. Plant & Soil, 2014, 380(1-2): 165-179.
- [36] 安卓,牛得草,文海燕,等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C:N:P化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 801-807.  
An Z, Niu D C, Wen H Y, et al. Effects of N addition on nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometric characteristics in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8): 801-807.

- [37] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, et al. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls [J]. *Journal of Soils & Sediments Protection Risk Assessment & Rem*, 2013, 13(6): 1043-1051.
- [38] Qu F Z, Yu J B, Du S Y, et al. Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta [J]. *Geoderma*, 2014, 235-236(4): 227-232.
- [39] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1054-1061.
- Li Z, Han L, Liu Y H, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(10): 1054-1061.
- [40] Huang W J, Zhou G Y, Liu J X, et al. Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen addition on foliar stoichiometry of nitrogen and phosphorus of five tree species in subtropical model forest [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168(5): 113.
- [41] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, et al. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests [J]. *Plant & Soil*, 2011, 339(1-2): 163-175.
- [42] Han W X, Fang J Y, Reich P B, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(8): 788-796.
- [43] Xia C X, Yu D, Wang Z, et al. Stoichiometry patterns of leaf carbon, nitrogen and phosphorus in aquatic macrophytes in eastern China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70(5): 406-413.
- [44] 马露莎, 陈亚南, 张向茹, 等. 黄土高原刺槐叶片生态化学计量学特征 [J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 57-61.
- Ma L S, Chen Y N, Zhang X R, et al. Characteristics of leaf ecological stoichiometry of *Robinia pseudoacacia* in Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 57-61.
- [45] 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 [J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 11-15.
- Wang C M, Bao W K, Chen J Z, et al. Profile characteristics and nutrients of dry cinnamon soils in dry valley of the upper Minjiang River [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(3): 11-15.
- [46] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1): 13-26.
- [47] Arbelo Rodríguez A C D, Rodríguez A R, García J A G, et al. Soil quality and plant succession in forest andosols [C] // Lian X W, De Y W, Xiao N T, et al. Proceedings of 12th ISCO conference. sustainable utilization of global soil and water resources. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 452-458.
- [48] 林勇明, 吴承祯, 洪伟, 等. 汶川地震灾区典型区不同植被类型土壤种子库特征: 以北川县苏保河、魏家沟流域为例 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 99-104.
- Lin Y M, Wu C Z, Hong W, et al. Soil seed bank characteristics of different vegetations in typically affected regions of Wenchuan earthquake: a case study in Subaohe and Weijiagou Basins [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 99-104.
- [49] 罗清虎, 孙凡, 吴建召, 等. 汶川地震对两种气候区植被恢复群落特征的影响 [J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(1): 50-56.
- Luo Q H, Sun F, Wu J Z, et al. Community characteristics of vegetation restoration in 2 different climate areas of Wenchuan earthquake affected region [J]. *Journal of Forest and Environment*. 2018, 38(1): 50-56.
- [50] 严代碧. 岷江上游干旱河谷区退化植被特征及其恢复重建的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- Yan D B. Research on degraded vegetation characters, restoration and reconstruction at the arid valley in the upper reaches of the Minjiang River [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [51] Lin Y M, Deng H J, Du K, et al. Soil quality assessment in different climate zones of China's Wenchuan earthquake affected region [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165: 315-324.
- [52] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, 305: 509-513.
- [53] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency: litter production, nutrient use, forests. [J]. *American Naturalist*, 1982, 119(4): 553-572.
- [54] Makino W, Cotner J B, Sterner R W, et al. Are bacteria more like plants or animals: growth rate and resource dependence of bacterial C:N:P stoichiometry [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17(1): 121-130.
- [55] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, et al. Organism size, life history, and N:P stoichiometry [J]. *Bioscience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [56] Koerselman W. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [57] Xu X L, Ma K M, Fu B J, et al. Relationships between vegetation and soil and topography in a dry warm river valley, SW China [J]. *Catena*, 2008, 75(2): 138-145.
- [58] Arbelo C D, Rodríguez-Rodríguez A, Guerra J A, et al. Soil degradation processes and plant colonization in abandoned terraced fields overlying pumice tuffs [J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 17(6): 571-588.
- [59] 何俊杰, 陈小梅, 冯思红, 等. 城郊梯度上南亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 591-596.
- He J J, Chen X M, Feng S H, et al. Stoichiometric characteristics of soil C, N and P in subtropical forests along an urban-to-suburb gradient [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 591-596.

(责任编辑 赵 勃  
责任编辑委 余新晓)