

文章编号: 1008-2786-(2020)4-532-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000531

# 灾害干扰受损森林土壤的碳、氮、磷 初期恢复特征与变异性

余 杭<sup>1,2,3</sup>, 罗清虎<sup>1,2,3</sup>, 李松阳<sup>1,2,3</sup>, 林勇明<sup>1,2\*</sup>, 王道杰<sup>4</sup>

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3. 福建省高校  
森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002; 4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:** 2010 年 6 月福建省南平市特大洪水诱发大面积滑坡, 造成区域内森林严重受损。本文选取特大洪灾中受损的次生阔叶林和杉木林为研究对象, 测定不同样地(受损区、未受损区、受损恢复区)表层土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量, 分析受损森林恢复初期 SOC、TN、TP 的恢复率以及变异性特征。研究结果表明: (1) 灾害造成次生阔叶林与杉木林严重受损, 各样地 SOC、TN、TP 含量整体上随着植被盖度的降低而下降, 呈现“未受损区 > 受损恢复区 > 受损区”的变化趋势, 受损森林经过 7 年自然恢复尚未恢复至受灾前水平; (2) 次生阔叶林仅 TP 含量表现为受损恢复区显著高于受损区, 而杉木林受损恢复区 SOC、TP 含量均显著高于受损区, 且其养分恢复率高于次生阔叶林, 说明杉木林前期施肥工作对土壤养分的自然恢复具有积极的促进作用; (3) 受损森林 C:P 主要受到 SOC 的影响, C:N、N:P 值主要受到 TN 的影响。仅 C:P 在杉木林表现为受损恢复区显著高于受损区; (4) 受损森林土壤养分变异性表现为 TN > SOC > TP, 恢复率则相反, 说明灾害对受损森林 TN 的影响最大。上述研究表明灾害严重破坏土壤养分, 土壤养分自然恢复进程较慢且效果较差, 后期应对受损森林尤其是次生阔叶林进行适当的人工干预以促进其恢复。该研究结果可为该区受损森林的演替过程与机制预测、土壤侵蚀控制和恢复措施优化等提供科学依据。

**关键词:** 土壤养分; 生态恢复; 变异系数; 福建; 南平

**中图分类号:** S714.2

**文献标志码:** A

近年来, 洪涝、风暴潮、暴雨等各类灾害频繁发生, 不仅严重破坏基础设施, 还会导致一系列的生态环境问题<sup>[1-2]</sup>。连续性强降雨引发的山体滑坡、崩塌、泥石流等次生灾害, 造成原始土层被异位或重组, 大面积自然植被遭到掩埋或消失, 易形成次生裸地<sup>[3]</sup>。从土壤的微结构角度来看, 土壤团聚体和微团聚体减少, 降低土壤的抗蚀能力<sup>[4]</sup>, 随着降雨侵蚀和地表径流的冲刷力度增加, 侵蚀泥沙量在土壤

结构和稳定性遭到破坏后增大, 致使吸附在土壤微团聚体和小颗粒表面的养分随泥沙和径流大量流失<sup>[5]</sup>, 降低植物的营养物质供应量, 进而限制植被群落的生产力, 导致生物多样性减少, 同时生态链易受灾害干扰而中断, 生态系统的稳定性、抗干扰能力以及自我恢复能力变差, 从而引起生态环境进一步退化<sup>[6-8]</sup>。目前, 生态系统灾害干扰受损后自然恢复特征与机制已受到学术界的广泛关注。国内外学

**收稿日期** (Received date): 2020-02-16; **改回日期** (Accepted date): 2020-07-10

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目(41790434); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目(2019); 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)。[National Natural Science Foundation of China (41790434); Research Fund of Key Laboratory of Mountain Hazard and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences (2019); Outstanding Young Scientific Research Project of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq2017016)]

**作者简介** (Biography): 余杭(1997-), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 自然地理学。[YU Hang (1997-), female, born in Lu'an, Anhui province, M. Sc. candidate, research on physical geography] E-mail: 15665309598@163.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 林勇明(1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 恢复生态学。[LIN Yongming (1982-), male, Ph. D., professor, research on restoration ecology] E-mail: monkey1422@163.com

者对地震前后的土壤养分进行了研究,发现地震后连续性降水诱发的滑坡体土壤养分含量显著低于未发生滑坡的相邻区域,随着植被生态恢复年限的增加,滑坡体土壤养分含量呈显著增加趋势,区域生境状况也得到明显改善<sup>[9-10]</sup>。因此,恢复和改善灾害干扰区的生态系统,充分发挥其生态功能,既是生态系统健康稳定发展的基本保障和重要支撑,又是有效防止次生灾害发生的关键环节和必然途径。

在生态系统恢复的早期阶段,土壤养分特别是土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP),其存贮量与植物的生长发育、表层生态系统的稳定性和生态系统的恢复进程密切相关<sup>[11]</sup>。然而,在植被自然恢复的过程中,由于地表盖度的变化引起局域凋落物数量、土壤表层温湿度、有机质分解能力等的异质性,同时因不同植被类型对土壤养分的选择吸收能力不同及土壤结构质地等的差异性,导致土壤理化性质表现出不同程度的变异性<sup>[12-13]</sup>。因此,正确认识洪涝灾后受损森林土壤养分分布格局与恢复进程,可为科学管理土壤养分以及定量化评价受损生态系统的生态修复效益提供理论依据。然而,目前国内对于洪涝灾区生态系统的研究主要集中于管理与治理措施<sup>[14-15]</sup>,对于受损森林土壤的主要养分恢复特征与变异性的研究则相对较少,尤其对小尺度坡面因灾害导致的变异特征罕见报道,难以归纳总结针对性的恢复措施。

福建省位于我国东南沿海地区,夏季多台风暴雨,山地、丘陵占全省总面积的80%以上,环境本底具有潜在不稳定性<sup>[16]</sup>,水土流失总面积达到 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占全省国土面积的10%<sup>[17]</sup>。2010年6月发生的特大洪水及次生灾害导致福建省北部的南平市的主要林地(次生阔叶林、杉木林等)发生大面积损毁,当地植被—土壤生态系统遭到巨大破坏。南平市作为南方红壤区土壤侵蚀最严重的地区之一<sup>[18]</sup>,分析其灾害引发的受损森林土壤养分丰缺状况及恢复特征,不仅可加深灾害对森林破坏效应的认识,还对进一步制定水土保持规划、优化森林土壤改良措施、实施灾害影响评价等具有重要的指导意义。鉴于此,本文选取南平市洪涝灾害干扰下受损林地(次生阔叶林和杉木林)为研究对象,以未受损林地作为对照,分别于2010年7月对受损区、2017年7月对受损恢复区(即受损区恢复7年后)和未受损区土壤进行取样,分析灾害干扰受损森林土壤

主要养分变异系数、恢复特征以及化学计量特征,旨在为该地区主要限制性土壤养分因子的判断和受损森林生态系统的保护、恢复及重建提供数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

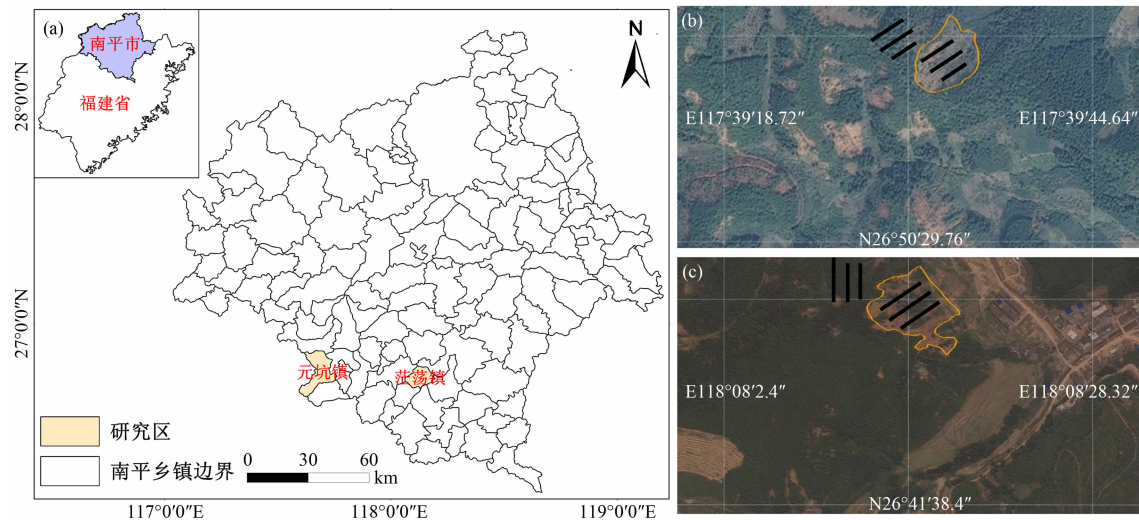
研究区(图1a)地处福建省北部南平市,属亚热带季风湿润气候,森林资源丰富,覆盖率高达76.5%。南平市内低山、丘陵分布较广,受构造运动的影响强烈,山地切割明显,地势落差大,加之境内河流众多,径流量大、河道陡急,易发生洪涝灾害。2010年6月,南平市的强降雨引发滑坡、泥石流等重大洪灾,森林滑坡数量占总滑坡数量的64%,其中以当地的两种主要林型(次生阔叶林和杉木林)受损最为严重<sup>[19]</sup>。两种林型均受浅层滑坡影响,土壤表层20~30 cm的土层结构严重破坏,坡面上植被被掩埋或移除,原有土壤分层结构消失,形成弱风化层。因此,本研究选取次生阔叶林、杉木林两种林型(表1)作为研究对象。

杉木林样地(图1b)位于顺昌县元坑镇。2017年时杉木林未受损林地林龄22 a,为杉木纯林,主要林下植被有杜茎山(*Maesa japonica*)、霍香薷(*Ageratum houstonianum*)和鸡血藤(*Kadsurae caulis*)等;受损自然恢复林地主要植被有山乌柏(*Sapium discolor*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)和盐肤木(*Rhus chinensis*)等。在滑坡发生前当地群众每年于杉木未受损样地和受损样地均施用钙镁磷肥 $749.63 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 和尿素 $224.89 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。次生阔叶林样地(图1c)位于延平区茫荡镇。其中,未受损林地天然次生阔叶林,自1958年起未经人为干扰,现存植被呈多层状:乔木层第一亚层分布米槠(*Castanopsis carlesii*)、栲(*Castanopsis fargesii*)等壳斗科树种;第二亚层分布细柄阿丁枫(*Altingia-gracilipes*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等树种;第三亚层与灌木层混生,主要有米槠(*Castanopsis carlesii*)、小叶荩草(*Arthraxon lancifolius*)和观音莲座蕨(*Angiopteris fokiensis*)等。受损自然恢复林地主要植被有福建酸竹(*Acidosasa longiligula*)、山麻杆(*Alchornea davidii*)和铁芒萁等。两种林型未受损样地的坡面均未受人为改造,坡形完整、起伏度小。

本实验中两种林型受滑坡影响的受损样地因土

层整体移动或翻转,在灾后降雨作用下土层发生平复,取样时坡形较完整且均匀,部分区域虽有残存植被,但未在取样样方内,且各坡位相邻样方间保持着坡形的延续性和一致性,以保证样品采集的均匀性。

受灾害干扰,两种林型受损样地的植被盖度均较低,主要分布小飞蓬 (*Conyza canadensis*) 和五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 等先锋植物。图 2 为次生阔叶林山体滑坡自然恢复前后对比。



注:图(b)和(c)中,黄色轮廓内的黑线表示“受损区”(2010)和“受损恢复区”(2017)样带,轮廓外的黑线表示“未受损区”(2017)样带。

图 1 研究区位置和样地:(a)区域位置图;(b)元坑镇杉木林 2010 年遥感图像;(c)茫荡镇次生阔叶林 2010 年遥感图像

Fig. 1 Location of the study area and sample plot: (a) Schematic map of study area; (b) Remote sensing image of *Cunninghamia lanceolata* forest in Yuankeng town in 2010; (c) Remote sensing image of Secondary broad-leaved forest of Mangdang town in 2010

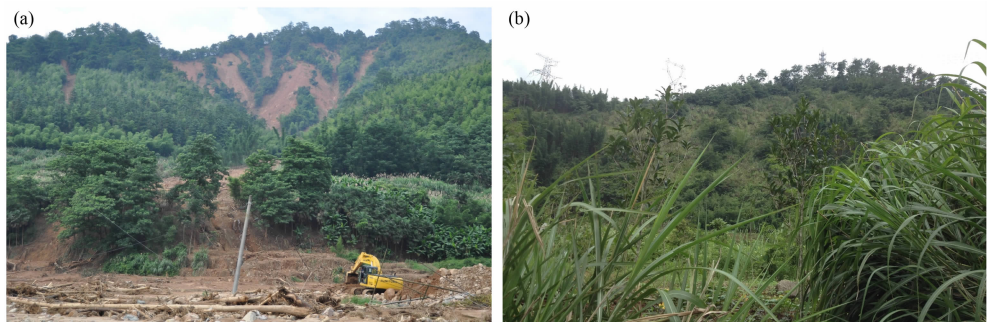


图 2 南平市茫荡山滑坡自然恢复前后对比

Fig. 2 Comparison of Mangdangshan landslide in Nanping City before and after natural recovery

表 1 样地基本概况

Tab. 1 Characteristics of sample plots

林型	样地类型	经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)	植被盖度/%
次生 阔叶林	受损恢复区	118°08'35"	26°41'39"	173	40	60
	未受损区	118°08'31"	26°41'42"	188	36	88
	受损区	118°08'35"	26°41'39"	173	40	20
杉木林	受损恢复区	117°39'45"	26°50'33"	226	32	52
	未受损区	117°39'44"	26°50'36"	238	34	72
	受损区	117°39'45"	26°50'33"	226	32	10

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集

2010 年 7 月,在次生阔叶林和杉木林两种林型中各设置 1 个 40 m×30 m 的受损样地。以 10 m 为间隔,每样地自上而下设置 3 个坡位,各坡位选取 3 个 2 m×2 m 的样方,样方间隔约 5 m。在各样方对角线中心进行 20 cm 深度的土壤采样,带回实验室风干,过 0.149 mm 孔径土壤筛,用于测定土壤养分含量。

在各林型受损样地附近设置同面积的未受损样地,封禁管理但未取样。2017 年 7 月进行二次采样,使用相同的方法分别对封禁的未受损样地和原受损样地按照同样的方法采样作为未受损样地和受损后自然恢复(7 a)的土壤样品。所有样地中共采集 54 个土壤样品。

1.2.2 样品分析

SOC 含量采用硫酸-重铬酸钾外加热法;TN 含量采用硫酸一半微量凯氏定氮法;TP 含量采用熔碱-钼锑抗比色法<sup>[20]</sup>。

1.2.3 计算方法

(1) 土壤恢复率公式<sup>[21]</sup>:

$$R = D/U \tag{1}$$

式中, $R$  为 SOC、TN、TP 恢复率(%); $D$  为受损恢复区 SOC、TN、TP 含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $U$  为未受损区 SOC、TN、TP 含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

(2) 变异系数公式<sup>[21]</sup>:

$$C.V = SD/\bar{x} \tag{2}$$

式中, $C.V$  为 SOC、TN、TP 变异系数(%); $SD$  为 SOC、TN、TP 含量标准差( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $\bar{x}$  为 SOC、TN、TP 含量平均数( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

1.2.4 数据处理

运用 Excel 2016 进行数据处理,运用 SPSS 19.0

中的单因素方差分析(变量间差异显著性水平为  $P < 0.05$  时,进行 LSD 检验)进行不同样地 SOC、TN、TP 含量及化学计量比的比较。

2 结果与分析

2.1 2 种林型不同样地 SOC、TN、TP 含量的比较

对南平市不同林型各研究区土壤样品的测定数据进行分析(表 2)。两种林型 SOC、TN、TP 含量均表现为未受损区 > 受损恢复区 > 受损区。其中,次生阔叶林 SOC 和 TP 在不同样地之间的差异显著( $P < 0.05$ ),而 TN 在受损恢复区和受损区之间无显著差异( $P > 0.05$ );杉木林 SOC 在不同样地之间的差异显著( $P < 0.05$ ),而 TN 在受损恢复区和受损区之间无显著差异( $P > 0.05$ ),TP 在受损恢复区与未受损区之间无显著差异( $P > 0.05$ )。

2.2 不同林型土壤恢复率的差异

由表 3 可知,杉木林 SOC、TN 与 TP 的平均恢复率均高于次生阔叶林。整体来看,两种林型均表现为 TP 的恢复率最高,SOC 次之,TN 的恢复率最低。

2.3 2 种林型不同样地土壤 C、N、P 化学计量比

根据表 4,对比两种林型的受损恢复区与未受损区可以发现,C:N 仅在杉木林表现为受损恢复区显著高于未受损区( $P < 0.05$ ),C:P 仅在次生阔叶林表现为未受损区显著高于受损恢复区( $P < 0.05$ ),N:P 在两种林型均表现为未受损区显著高于受损恢复区( $P < 0.05$ )。

对比两种林型的受损恢复区与受损区可以发现,除了 C:P 在杉木林表现为受损恢复区显著高于受损区( $P < 0.05$ ),C:N、C:P 与 N:P 在两种林型的受损恢复区和受损区之间均未表现出显著差异( $P > 0.05$ )。

表 2 两种林型不同样地 SOC、TN 和 TP 含量和差异性

Tab. 2 SOC, TN, TP content and the P-value in different sample plots of the two forest types

林型	样地类型	含量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
		SOC	TN	TP
次生阔叶林	受损恢复区	10.18 ± 0.17bc	0.57 ± 0.04b	0.58 ± 0.01b
	未受损区	23.64 ± 0.82a	1.76 ± 0.04a	0.78 ± 0.01a
	受损区	4.51 ± 0.21c	0.12 ± 0.00b	0.22 ± 0.00c
杉木林	受损恢复区	16.97 ± 0.43b	0.75 ± 0.04b	0.55 ± 0.00b
	未受损区	18.59 ± 0.70a	1.64 ± 0.04a	0.59 ± 0.01b
	受损区	4.38 ± 0.15c	0.24 ± 0.01b	0.34 ± 0.01c

注:同一列不同小写字母表示同林型不同样地土壤养分含量差异显著( $P < 0.05$ )。

表 3 不同林型 SOC、TN 和 TP 的平均恢复率

Tab. 3 Average recovery rates of SOC、TN and TP in different forest types

林型	平均恢复率/%		
	SOC	TN	TP
次生阔叶林	43.06	32.39	74.36
杉木林	91.29	45.73	93.22

2.4 两种林型不同样地土壤碳、氮、磷的变异系数

土壤变异性强弱可根据变异系数的大小进行分级： $C.V \leq 20\%$  为弱变异性； $20\% < C.V < 50\%$  为中等变异性； $C.V \geq 50\%$  为强变异性<sup>[22]</sup>。

由表 5 可知，SOC 在两种林型均属于中等变异，其变异系数表现为受损区 > 受损恢复区；TN 在两种林型受损恢复区均表现为强变异性，在其他样地属于中等变异及以下，其变异系数在两种林型均表现为受损恢复区 > 受损区；TP 的变异系数在两种林型各样地均表现为弱变异性，且变化范围不大，说明其在土壤中的含量相对稳定。

3 讨论与结论

3.1 受损森林土壤养分含量变化特征

SOC、TN 和 TP 是植物生长的主要营养元素，土壤养分作为土壤环境的一部分<sup>[23-25]</sup>，其含量体现着整个土壤系统的恢复水平<sup>[26-27]</sup>。本研究中，次生阔叶林和杉木林的 SOC、TN 和 TP 均表现为未受损区 > 受损恢复区 > 受损区，与各样地植被盖度变化趋势相似，说明土壤主要养分含量与植被恢复程度具有一致性，这与多数学者的研究结果一致<sup>[3,28]</sup>。洪水及其诱发的次生灾害使得当地森林受到一定程度的损毁，造

成径流对土壤的冲刷侵蚀程度增大，地表径流携带附着养分的泥沙颗粒汇流至河道，流失泥沙中氮、磷和有机质等土壤养分的含量均高于表土，从而导致森林土壤养分贫瘠<sup>[22]</sup>。随着生态恢复年限的增加，植被恢复不仅可以改变植被群落特征、增加根系分泌物以及向土壤中输入的凋落物质数量<sup>[29]</sup>，还改变微生物的生存环境进而影响植物残体的分解速率<sup>[30]</sup>。陈晓清等认为良好植被区的植被拥有较为完善的乔、灌、草组合，其根系能够锚固从浅层到深层的大量土体，使土体得到植被的加固，土壤结构逐渐改善，这有助于微生物获得稳定的生存环境，从而有利于其活动繁殖以及提高分解有机质的速率<sup>[4,31]</sup>。本研究中，两种林型受损恢复区 SOC、TN 和 TP 含量均高于刚受损区，说明生态系统初期自然恢复对土壤主要养分积累具有明显促进作用，然而次生阔叶林仅 TP 含量表现为受损恢复区显著高于受损区，杉木林受损恢复区 SOC、TP 含量均显著高于受损区，且杉木林 SOC、TN 和 TP 的恢复率均高于次生阔叶林，表明杉木林土壤养分自然恢复效果较好，这主要受到施肥处理、林地坡度、土壤质地的共同影响：首先，杉木林灾害发生前期的施肥能够有效增加土壤营养物质含量，使植物根系更加发达为灾后土壤养分恢复提供了基础<sup>[32]</sup>，同时有益于促进微生物种群的繁殖，促进养分循环和生物有效性<sup>[33]</sup>；其次，杉木林受损恢复区较小的坡度能够使得该区域植被及微生物获得较为稳定的生存环境；再者，本研究涉及的杉木林样地土壤中掺杂较多小石砾，这有利于降低土壤容重、提高土壤孔隙度，进而有利于植物根系生长并促进养分循环和转化<sup>[34]</sup>。因此，建议后期恢复治理过程中加强次生阔叶林受损区域的生态管理，以改善土壤结构促进养分循环。

表 4 两种林型不同样地的化学计量比

Tab. 4 Soil stoichiometric ratio in different sample plots of the two forest types

林型	样地类型	化学计量比		
		C: N	C: P	N: P
次生阔叶林	受损恢复区	23.04 ± 1.23ab	17.82 ± 0.41b	0.95 ± 0.05b
	未受损区	13.18 ± 0.22b	30.44 ± 1.03a	2.28 ± 0.05a
	受损区	39.04 ± 1.89a	20.34 ± 0.90b	0.54 ± 0.01b
杉木林	受损恢复区	24.26 ± 0.61a	31.23 ± 0.84a	1.38 ± 0.07b
	未受损区	11.68 ± 0.46b	31.52 ± 1.09a	2.82 ± 0.08a
	受损区	20.09 ± 0.97ab	12.93 ± 0.46b	0.70 ± 0.02b

注：同一列不同小写字母表示同林型不同样地土壤 C、N、P 化学计量比差异显著（ $P < 0.05$ ）。

表 5 两种林型不同样地 SOC、TN 和 TP  
变异系数的变化

Tab. 5 Change of SOC, TN, TP variation coefficient in  
different sample plots of the two forest types

林型	样地类型	变异系数/%		
		SOC	TN	TP
次生 阔叶林	受损恢复区	15	58	16
	未受损区	31	19	13
	受损区	42	23	13
杉木林	受损恢复区	23	42	6
	未受损区	34	23	6
	受损区	31	28	14

3.2 受损森林土壤养分的变异性

洪涝灾害带来的水土流失不仅会直接破坏地表植被,并导致土壤养分随之变动,表现出不同程度的变异性<sup>[35]</sup>。对两种林地不同样地的 SOC、TN、TP 的变异系数进行研究,结果表明:SOC 的变异系数在各林地均表现为受损区 > 受损恢复区,说明受损区因水土流失导致土壤结构遭到严重破坏,土壤表层养分流失严重, SOC 异质性也随着土壤破坏程度而增大。与以上规律不同的是,TN 的变异系数在各林地表现为受损恢复区 > 受损区,这主要是因为:(1)森林刚受损时,由于土壤有机氮组分中的氨基酸氮、NH<sub>3</sub>-N 和无机氮组分中的硝态氮易随着泥沙和地表径流而流失,导致土壤表层氮素遭到损失,造成其在该区域拥有较大变异性<sup>[36-37]</sup>(变异系数表现为:受损区 > 未受损区);(2)氮作为植物生长的主要限制性元素,植物生长初期对氮素的需求远远超过磷等其他营养元素<sup>[38]</sup>,加之恢复初期阶段草本植物群落的随机扩张和繁殖,使得土壤中 TN 含量的不均匀性程度增大,导致其空间分布可能趋向高度的异质化<sup>[39-41]</sup>。TP 在两种林地均表现为弱变异性,这可能与磷素在土壤中的存在形式有关,南方红壤区土壤磷素主要受到土壤母质中所含矿物的控制,较稳定,不易淋溶流失<sup>[42]</sup>,故变异性较弱。

3.3 受损森林土壤 C:N:P 化学计量比

土壤 C:N:P 化学计量比是衡量土壤碳、氮、磷平衡特征的重要指标,体现受损森林生态系统土壤养分元素的协同能力及其变化趋势<sup>[21]</sup>。

土壤 C:N 值反映碳和氮之间的变化趋势,本研究中除了未受损区,两种林型受损区与受损恢复区的土壤 C:N 值高于福建省山地土壤 C:N 水平范围

(11.7~18.2)<sup>[43]</sup>。由于氮素在土壤中的易移动特性,而使其易淋溶损失和流失<sup>[36]</sup>,导致 2 种林型 TN 的平均恢复率比 SOC 低,TN 相对 SOC 处于更缺乏状态,从而引起土壤 C:N 值的增大,表明该区域的洪涝及其次生灾害严重破坏了土壤碳、氮循环,导致恢复初期阶段 SOC 和 TN 的输入输出平衡机制不稳定,受损区仍需要长期的生态恢复以实现土壤较稳定的碳氮比值。

土壤 C:P 反映微生物矿化土壤有机质释放磷或从环境中吸收固持磷的能力,是衡量土壤磷有效性的重要指标,其值越低表明土壤磷有效性越高<sup>[44]</sup>。本研究区为红黄壤,各林型表层 TP 含量均显著低于全国土壤表层 TP 含量(0.78 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[40]</sup>,但是土壤 C:P 值却明显低于中国亚热带土壤 C:P 值(78)<sup>[45]</sup>,说明虽然研究区土壤中磷元素较少<sup>[46]</sup>,但其有效磷含量能够满足植物生长的需求,土壤 C:P 值主要受到 SOC 的影响。此外,由于次生阔叶林 SOC 的恢复率(43%)明显低于杉木林(91%),导致土壤 C:P 在次生阔叶林表现为未受损区显著高于受损恢复区,而在杉木林的 2 个区域之间无显著差异。

土壤 N:P 用于确定土壤氮、磷养分限制的阈值<sup>[47]</sup>。本研究中两种林地 TN 值、TP 值均低于全国土壤表层 TN(1.86 g·kg<sup>-1</sup>)、TP(0.78 g·kg<sup>-1</sup>)含量<sup>[42]</sup>,表明本研究区存在较为严重的缺氮、缺磷现象。此外,两种林型土壤受损恢复区的平均 N:P 值均低于未受损区,这主要是因为 TN 的恢复率远低于 TP,说明该区域土壤 N:P 值主要受到 TN 的影响。

比较两种林型的受损恢复区与受损区可以发现,除了 C:P 在杉木林表现为受损恢复区显著高于受损区,C:N、C:P 与 N:P 在两种林型的受损恢复区和受损区之间均未表现出显著差异,说明两种林型的 TN 以及次生阔叶林的 SOC 在自然恢复过程中并没有达到显著的恢复,与未受损区相比仍然存在较大的差距,表明该区域土壤养分自然恢复效果较差,建议后期可通过人工措施促进植被恢复和提高土壤肥力。

综上所述,洪涝灾害引起的滑坡不仅造成植被大面积受损,产生严重的水土流失,而且引起 SOC、TN 和 TP 大量流失。整体上南平市受损森林土壤中 TN 的损失量最严重,其次是 SOC,TP 损失量最小。建议后期治理中适当施加氮肥、碳肥以提高土



壤总体养分,有利于区域整体的生态恢复。此外,本研究范围处于磷素不足区域,建议适当施加磷肥或生物解磷菌肥以保证土壤主要养分的补给和平衡,避免下一阶段恢复进程受到 P 的限制,从而促进植被—土壤生态系统更好的恢复。此外,受灾森林土壤养分各化学计量比均处于严重失衡状态,土壤 C:P 主要受到 SOC 的影响,土壤 C:N、N:P 主要受到 TN 的影响,且整体上表现为 TN 变异性最大,其次为 SOC,TP 变异性最小。从土壤养分的恢复程度来看,杉木林受损恢复区 SOC、TP 含量均显著高于受损区,而次生阔叶林仅表现为 TP 含量均显著高于受损区,且杉木林 SOC、TN 和 TP 恢复率均高于次生阔叶林,表明杉木林的前期施肥工作对土壤养分的自然恢复具有良好的促进作用,建议后期治理过程中需加强对次生阔叶林的生态恢复管理。此外,虽然植被恢复整体上提高了灾害干扰土壤的 SOC、TN 和 TP 养分含量,但与未受损区比较仍然存在一定差距,说明该区域土壤养分尚未恢复至原先水平,自然恢复进程较慢且效果较差,建议后期对受损森林进行适当的人工治理,如封山育林、营造人工林或采取工程技术措施等促进其尽快恢复。

## 参考文献 (References)

- [1] VAN OOST K, QUINE T A, GOVERS G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J]. *Science*, 2007, **318**(5850): 626 – 629.
- [2] ZHANG Jindong, HULL V, XU Weihua, 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.
- [3] 李宁宁,张光辉,王浩,等. 黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体植被演替特征及土壤养分响应[J]. *山地学报*, 2018, **36**(5): 669 – 678. [LI Ningning, ZHANG Guanghui, WANG Hao, et al. Properties of vegetation succession on shallow landslide deposits in loess hilly and gully region and the related response of soil nutrient [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(5): 669 – 678]
- [4] 陈晓清,崔鹏,韦方强. 良好植被区泥石流防治初探[J]. *山地学报*, 2006, **24**(3): 333 – 339. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, WEI Fangqiang. Study of control debris flow in high-covered vegetation region [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(3): 333 – 339]
- [5] GBUREK W J, SHARPLEY A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**(2): 267 – 277.
- [6] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. *生态学报*, 2013, **33**(18): 5484 – 5492. [ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5484 – 5492]
- [7] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等. 人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(5): 529 – 532. [YU Lifei, ZHU Shouqian, YE Jingzhong, et al. Evaluation on degradation of Karst forest community and human disturbance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(5): 529 – 532]
- [8] WANG S J, LIU Q M, ZHANG D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2004, **15**(2): 115 – 121.
- [9] 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 & Environmental Biology*, 2012, **18**(6): 911 – 916]
- [10] ARUNACHALAM A, ARUNACHALAM K, BHATTACHARJEE A, et al. Natural revegetation on landslides in humid tropical Arunachal Pradesh: community dynamics and soil properties [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2000, **12**(4): 682 – 696.
- [11] YI Zhang, PENG Li, LIU Xiaojun, et al. Effects of farmland conversion on the stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil aggregates on the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2019, **351**: 188 – 196.
- [12] 杨秀云,郭平毅,韩有志,等. 采伐干扰对林下草本根系生物量与土壤环境异质性关系的影响[J]. *植物科学学报*, 2012, **30**(6): 545 – 551. [YANG Xiuyun, GUO Pingyi, HAN Youzhi, et al. Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity between root biomass of the herb and soil environment in *larix principis-rupprechtii* forests in Guandi Mountain [J]. *Plant Science Journal*, 2012, **30**(6): 545 – 551]
- [13] LEUSCHNER C, WULF M, BÄUCHLER P, et al. Soil C and nutrient stores under Scots pine afforestations compared to ancient beech forests in the German Pleistocene: the role of tree species and forest history [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **310**(1): 405 – 415.
- [14] 金增芳. 玉树地震滑坡的特征与形成机理及治理措施[J]. *建筑结构*, 2013, **43**(S2): 686 – 689. [JIN Zengfang. Yushu seismic landslide characteristics and formation mechanism and its control measures [J]. *Building Structure*, 2013, **43**(S2): 686 – 689]
- [15] 张德罡. 砍伐与滑坡对东祁连山杜鹃灌丛草地土壤肥力的影响[J]. *草业学报*, 2002, **11**(3): 72 – 75. [ZHANG Degang. Effect of deforestation and landslide on soil of *Rhododendron* shrub ecosystem in the eastern Qilian mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, **11**(3): 72 – 75]
- [16] 林捷. 福建省水土流失治理实践与探索[J]. *中国水土保持*, 2015, (10): 27 – 28. [LIN Jie. Practice and exploration of soil

- and water loss control in Fujian province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015, (10): 27–28]
- [17] 王振平,汪小钦,曾舒娇,等.福建省水土流失现状分析[J].水土保持通报,2017,37(5):169–175. [WANG Zhenping, WANG Xiaoqin, ZENG Shujiao, et al. Analysis of soil and water loss in Fujian province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 169–175]
- [18] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J].应用生态学报,2016,27(3):735–745. [YAO Xiong, YU Kunyong, LIU Jian, et al. Spatial and temporal changes of the ecological vulnerability in a serious soil erosion area, Southern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 735–745]
- [19] 余坤勇,刘健,杨平,等.森林经营过程对区域发生滑坡的影响关系研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(4):5–10. [YU Kunyong, LIU Jian, YANG Ping, et al. The impact of forest management forest management process on the landslide [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(4): 5–10]
- [20] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J].生态学报,2012,32(3):852–862. [GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al. Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged *Pinus massoniana* stands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 852–862]
- [21] 刘颖,贺静雯,吴建召,等.震区典型受损区生态恢复过程中的土壤恢复率与空间异质性[J].应用与环境生物学报,2019,25(4):823–830. [LIU Ying, HE Jingwen, WU Jianzhao, et al. Soil recovery rate and spatial heterogeneity in the process of ecological restoration in an earthquake-affected area [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, 25(4): 823–830]
- [22] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等.喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(3):80–92. [WU Peng, CUI Yingchun, ZHAO Wenjun, et al. Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of Maolan karst forest vegetation, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 80–92]
- [23] 程晓莉,安树青,李远,等.鄂尔多斯草地退化过程中个体分布格局与土壤元素异质性[J].植物生态学报,2003,27(4):503–509. [CHENG Xiaoli, AN Shuqing, LI Yuan, et al. The individual distribution patterns and soil elements heterogeneity during the degradation of grassland in Ordos. [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(4): 503–509]
- [24] CHANDER K, GOYAL S, NANDAL D P, et al. Soil organic matter, microbial biomass and enzyme activities in a tropical agroforestry system [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27(2): 168–172.
- [25] MORRISON I K, FOSTER N W. Fifteen-year change in forest floor organic and element content and cycling at the Turkey Lakes watershed [J]. Ecosystems, 2001, 4(6): 545–554.
- [26] 赵越,罗志军,廖牧鑫,等.泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素[J].水土保持学报,2018,32(5):296–303. [ZHAO Yue, LUO Zhijun, LIAO Muxin, et al. Study on the spatial distribution of soil nutrients and its influencing factors in the cultivated land of Taihe county [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 296–303]
- [27] 余博.绢蒿属荒漠草地不同退化阶段土壤养分空间异质性的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2009:2–6. [YU Bo. Study on spatial variability of soil nutrient in *Seriphidium* desert grassland in different degraded stages [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009: 2–6]
- [28] 刘艳,宋同清,蔡德所,等.喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1561–1568. [LIU Yan, SONG Tongqing, CAI Desuo, et al. Soil fertility characteristics under different land use patterns in depressions between karst hills [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1561–1568]
- [29] 杨红飞,穆少杰,李建龙.气候变化对草地生态系统土壤有机碳储量的影响[J].草业科学,2012,29(3):392–399. [YANG Hongfei, MU Shaojie, LI Jianlong. Effects of climate change on soil organic carbon storage of grassland ecosystem [J]. Pratacultural Science, 2012, 29(3): 392–399]
- [30] FANG C, MONCRIEFF J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155–165.
- [31] JASON G V, VALENTINE D W, ROGER W R. Soil and root respiration in mature Alaskan black spruce forests that vary in soil organic matter decomposition rates [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(1): 161–174.
- [32] 刘芳.2年生杉木人工林施肥效应及土壤养分含量变化的研究[D].福州:福建农林大学,2014:1–6. [LIU Fang. Study on fertilization effects and the changes of soil nutrient content of 2-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014: 1–6]
- [33] 孙瑞莲,朱鲁生,赵秉强,等.长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用[J].应用生态学报,2004,15(10):1907–1910. [SUN Ruilian, ZHU Lusheng, ZHAO Bingqiang, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganism and its role in adjusting and controlling soil fertility [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1907–1910]
- [34] 罗清虎,吴建召,崔羽,等.洪涝灾害干扰下受损自然恢复林地土壤基本性状及分形维数特征[J].应用与环境生物学报,2019,25(1):29–37. [LUO Qinghu, WU Jianzhao, CUI Yu, et al. Characteristics of soil properties and fractal dimensions of destroyed and naturally restored forest land under floor disaster disturbance [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, 25(1): 29–37]



- [35] 李阳,裴志永,秦伟,等. 区域性皆伐抚育作业对沙柳林地土壤养分空间异质性的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, **16**(18): 161–165. [LI Yang, PEI Zhiyong, QIN Wei, et al. Regional clear cutting operation on soil nutrient of *salix psammophila* forest short-term disturbance characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2016, **16**(18): 161–165]
- [36] 赵满兴,周建斌,延志莲. 不同土层土壤对可溶性有机氮、碳的吸附特性研究[J]. 土壤通报, 2010, **41**(6): 1328–1332. [ZHAO Manxing, ZHOU Jianbin, YAN Zhilian. Adsorption characteristics of soluble organic carbon and nitrogen in different layer of cultivated soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, **41**(6): 1328–1332]
- [37] 王百群,戴鸣钧. 土壤不同形态氮素在剖面中移动特征的模拟研究[J]. 水土保持研究, 2000, **7**(4): 117–122. [WANG Baiqun, DAI Mingjun. Simulated study on movement features of soil nitrogen in different forms in soil profile [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, **7**(4): 117–122]
- [38] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937–3947. [WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(8): 3937–3947]
- [39] GARNER W, STEINBERGER Y. A proposed mechanism for the formation of 'Fertile Islands' in the desert ecosystem [J]. Journal of Arid Environments, 1989, **16**(3): 257–262.
- [40] PAUL B H, INGRID C B, LAUENROTH W K. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe [J]. Plant and Soil, 1991, **138**(2): 247–256.
- [41] EPSTEIN H E, BURKE I C, Mosier A R. Plant effects on spatial and temporal patterns of nitrogen cycling in shortgrass steppe [J]. Ecosystems, 1998, **1**(4): 374–385.
- [42] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2002, **22**(8): 1173–1178. [WANG Jun, FU Baijie, QIU Yang, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(8): 1173–1178]
- [43] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, **98**(1/3): 139–151.
- [44] CHEN Fusheng, XUE Feng, CHAO Liang. Endogenous versus exogenous nutrient affects C, N, and P dynamics in decomposing litters in mid-subtropical forests of China [J]. Ecological Research, 2012, **27**(5): 923–932.
- [45] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 2014, **65**(1): 10–21.
- [46] 赖壮杰,刘健,余坤勇,等. 南方典型毛竹经营区土壤养分空间变异特征——以福建省南平市顺昌县毛竹林经营区为例[J]. 东北林业大学学报, 2018, **46**(3): 63–68. [LAI Zhuangjie, LIU Jian, YU Kunyong, et al. Spatial variability of soil nutrients in typical *phyllostachys pubescens* growing areas in South China—*Takmg phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* forest management area in Shunchang county, Nanping city, Fujian province as example [J]. Journal of North-East Forestry University, 2018, **46**(3): 63–68]
- [47] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(15): 4674–4682. [ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(15): 4674–4682]

## Initial Recovery Characteristics and Variability of Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in the Damaged Forests under Disaster Disturbance

YU Hang<sup>1,2,3</sup>, LUO Qinghu<sup>1,2,3</sup>, LI Songyang<sup>1,2,3</sup>, LIN Yongming<sup>1,2\*</sup>, WANG Daojie<sup>4</sup>

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

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

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

4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In June 2010, heavy floods induced large-scale landslides in Nanping City, Fujian Province, China causing severe damages to forests in the area. In this study, two different kinds of forest lands (*Cunninghamia*

lanceolata forest and secondary broad-leaved forest) destroyed by major floods were selected for determination of soil organic carbon (SOC) content, total nitrogen (TN) content and total phosphorus (TP) content of surface soil in different sample plots (damaged area, recovered area, and undamaged area), and then the initial recovery characteristics and variability of SOC, TN, TP of damaged forests were analyzed. The results show that: (1) Disaster caused severe damages to the secondary broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* forest. The contents of SOC, TN and TP in all plots decreased as the vegetation coverage, following the rule of “undamaged area > recovered area > damaged area”, indicating that damaged forests had not recovered to the pre-disaster level after seven years of natural recovery. (2) Only TP content of the recovered area was significantly higher than the damaged area in secondary broad-leaved forest, while the content of SOC and TP of the recovered area were both significantly higher than the damaged area in *Cunninghamia lanceolata* forest, and the recovery rate of soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* forest was higher than secondary broad-leaved forest, indicating that the early fertilization had a positive promoting effect on the natural restoration of soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* forest. (3) C:P value was mainly affected by SOC, C:N and N:P values were mainly affected by TN in the damaged forests, and only C:P value of recovered area was significantly higher than the damaged area in *Cunninghamia lanceolata* forest. (4) TN had the maximum variability, followed by SOC and TP in the damaged forests, but the recovery rate of soil nutrients was contrary to the above conclusions, indicating that disaster had the greatest impact on TN of the damaged forests. The results indicated that soil nutrients had been severely damaged by disaster, and the natural recovery process of soil nutrients was slow and the recovery effect was poor. Therefore, appropriate artificial measures should be carried out to promote the recovery of damaged forests, especially secondary broad-leaved forests. The research results can provide a scientific basis for the prediction of the succession process and mechanism, soil erosion control, and the optimization of restoration measures of the damaged forests.

**Key words:** soil nutrient; ecological restoration; variable coefficient; Fujian; Nanping