

文章编号: 1008-2786-(2018)6-857-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000381

# 不同恢复方式地震受损区的土壤理化性质的 Meta 分析

段晨松<sup>1,2</sup>, 韩 燕<sup>1</sup>, 张远彬<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 地震及其引发的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害不仅严重破坏土壤物理结构, 也影响土壤质量, 进而带来一系列生态问题。地震受损区通常采用人工和自然恢复, 其恢复效果的个例研究较多, 而地震受损区土壤理化性质的整合分析鲜有报道。本文应用 Meta 分析方法, 定量综合地分析地震受损区在不同恢复方式下的土壤理化性质。通过中英文数据库, 以地震或滑坡、土壤为主题进行检索, 检索年限为 1990—2018 年, 共筛选出 19 篇有效文献, 提取了 434 个独立样本。结果表明: (1) 与邻近未受损区相比, 地震受损区在人工恢复下的土壤粉粒含量和孔隙度显著降低 ( $p < 0.05$ ), 黏粒、砂粒含量和容重无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 而自然恢复下的土壤黏粒含量和孔隙度显著降低 ( $p < 0.05$ ), 砂粒含量显著增加 ( $p < 0.05$ ); (2) 与自然恢复区相比, 人工恢复区的土壤孔隙度显著降低 ( $p < 0.05$ ), 黏粒、粉粒、砂粒含量和容重无显著性差异 ( $p > 0.05$ ); (3) 与邻近未受损区相比, 地震受损区的土壤 pH 值显著升高 ( $p < 0.05$ ), 而土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾含量均显著降低 ( $p < 0.05$ ); (4) 人工恢复区的土壤 pH 值、阳离子交换量、有机质含量、全 N、P、K 以及速效 N、P、K 含量均与自然恢复无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。地震受损区在 10 年恢复期内, 除土壤孔隙度外, 人工与自然恢复方式对其土壤性质无显著影响, 随恢复时间的延续, 其土壤性质的恢复效果有待进一步研究。

**关键词:** Meta 分析; 土壤理化性质; 人工恢复; 自然恢复; 地震受损区

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

地震是一种强烈的自然干扰, 由此引发的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害对区域生态系统造成极大破坏<sup>[1-5]</sup>。Restrepo 对墨西哥和中美洲山区的地质灾害进行调查, 发现由地震和强降雨引发的滑坡在质和量上改变了土地覆盖, 加剧土壤侵蚀<sup>[6]</sup>; 台湾水土保持局的调查显示, 1999 年的 9·21 大地震诱发的滑坡多达 20 000 处, 面积约 11 km<sup>2</sup>, 对生物栖息地、地表景观和土壤等造成不同程度的破坏<sup>[7]</sup>; 骆建国、吴聪等研究表明, 5·12 汶川地震引发的地质灾害严重损毁了区域内植被, 造成地表裸露, 破坏了土壤结构, 影响土壤质量, 带来一系列生态问题<sup>[8-10]</sup>。为了加快震后生态环境的恢复重建, 政府部门、非营利性机构、各级环保人士、科研工作者等

积极着手于地震受损区的恢复工作, 通常采用人工恢复和自然恢复两种方式。其中, 自然恢复方式是不通过人工辅助手段, 完全依靠自然演替恢复受损或退化生态系统, 其恢复速度较慢、周期较长, 对自然条件要求较高; 而人工恢复通过辅以人工措施, 包括改善生态系统物理因素、改善种源条件和物种间的相互制约关系等, 往往在一定程度上可以加快受损生态系统的恢复<sup>[11]</sup>。地震受损区采用的人工措施, 主要包括修建挡土墙、水平阶地、竹栅栏、铁丝笼, 以及栽植刺槐、柳杉、桉木等树种<sup>[12]</sup>。

目前, 已有不少学者对地震受损区的土壤性质开展调查研究, 主要运用统计学和 GIS 等方法研究震后土壤养分的空间分布特征<sup>[13,14]</sup>, 或通过“空间

收稿日期 (Received date): 2018-06-19; 改回日期 (Accepted date): 2018-09-30

第一作者 (Biography): 段晨松 (1995-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。[DUAN Chensong (1995-), female, born in Yuncheng, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on restoration ecology] E-mail: duanchensong@imde.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 张远彬 (1973-), 男, 副研究员, 主要从事植物生态学研究。[ZHANG Yuanbin (1973-), male, Ph. D., associate professor research on phytoecology] E-mail: zhangyb@imde.ac.cn

替代时间”针对某个地震受损严重区域或几个地震滑坡迹地分析其土壤恢复状况<sup>[15-17]</sup>,而对于整个地震受损区在不同恢复方式下的土壤性质尚未见报道。因此,本文应用 Meta 分析方法,通过对前人已经发表的若干相关独立研究结果进行整合,定量综合分析不同恢复方式地震受损区的土壤理化性质。通过对比地震受损区和邻近未受损区的土壤理化性质,明确地震受损区的土壤恢复状况;比较人工与自然恢复下的土壤理化性质,分析地震受损区在不同恢复方式下的土壤性质差异,为震后区域生态系统恢复措施的完善提供理论依据,对区域生态建设具有一定的指导意义。

## 1 材料与方法

Meta 分析是一种综合分析同一主题下多个独立研究结果的统计方法<sup>[18]</sup>。这种方法的思想起源于 20 世纪初,常用于心理学和医学等社会科学领域,90 年代被引入国内生态学领域<sup>[19]</sup>。与以往的统计学方法相比,Meta 分析可以较客观地进行定性和定量的综合分析,改进样本量大小对统计效能的影响,并可以进一步提高各研究结果不一致时的可靠性。

### 1.1 文献检索与筛选

本文中用于 Meta 分析的中文文献来源于中国知网、谷歌学术、维普等数据库,以地震或滑坡、土壤为主题进行检索;外文文献来源于 ISI web of science、SpringerLink、Elsevier 等数据库,设定主题为 earthquake OR seismic activity OR landslide AND soil,检索年限为 1990—2018 年。为了减少文献筛

选所带来的偏差,按照以下标准对所收集到的文献资料进行筛选,符合所有标准者视为有效文献:(1)文献中的研究区是由地震引发的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害造成的以碎石土为基质的受损区;(2)文献的数据资料中包括实验组和对照组,即文献中有地震受损区和邻近未受损区的土壤性质对比、或人工和自然恢复地震受损区的对比,且恢复时间不超过 10 年;(3)文献中的各独立研究至少测定以下 14 个土壤理化性质之一:土壤黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、土壤容重、孔隙度、pH 值、阳离子交换量(CEC)、土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK),且同一研究中的实验组和对照组的指标测定方法一致;(4)文献的数据资料是具体的数值或以图片形式表示的数据(使用 Get Data Graph Digitizer 软件进行提取),包含样本量、平均值、标准差或标准误等。

### 1.2 数据提取和数据库建立

从筛选的文献资料中,按照以下标准提取数据:(1)如果一篇文献中有多个独立的实验组或对照组,将每个实验组或对照组视为一个独立的样本进行相关数据提取;(2)对于土壤颗粒组成,由于所筛选文献资料中的土壤粒级大多是按国际标准划分的,所以按照黏粒(0, 0.002] mm、粉粒(0.002, 0.02] mm、砂粒(0.02, 2] mm 的国际制土壤粒级划分标准来提取数据。最终,通过对文献资料数据的分析、筛选、提取和转换,筛出 19 篇有效文献<sup>[9,13,20-36]</sup>,提取了 434 个独立样本(表 1)。

表 1 用于 Meta 分析的土壤理化性质指标及其数据来源

Tab. 1 Indicators of soil physical and chemical properties for meta-analysis and their data sources

| 指标   |             | 数据来源   |
|------|-------------|--|
| 物理性质 | 黏粒、粉粒、砂粒    | [9]、[13]、[20]、[21]、[22]、[23]、[24]、[25]   |
|      | 容重          | [20]、[23]、[25]、[26]、[27]、[28]、[29]、[30]  |
|      | 孔隙度         | [20]、[23]、[25]、[26]、[31]   |
| 化学性质 | pH 值        | [9]、[20]、[22]、[23]、[24]、[29]、[32]  |
|      | 阳离子交换量(CEC) | [9]、[23]、[27]、[33]   |
|      | 有机质(SOM)    | [9]、[13]、[20]、[21]、[22]、[23]、[25]、[27]、[29]、[30]、[31]、[32]、[33]、[34]、[35]、[36] |
|      | 全氮(TN)      | [9]、[13]、[20]、[21]、[22]、[23]、[24]、[25]、[27]、[29]、[31]、[32]、[35]                |
|      | 全磷(TP)      | [9]、[13]、[20]、[21]、[25]、[29]、[31]、[32]、[33]、[35]                               |
|      | 全钾(TK)      | [9]、[13]、[20]、[21]、[29]、[31]、[33]、[35]   |
|      | 速效氮(AN)     | [13]、[21]、[23]、[31]、[33]、[34]、[36]   |
|      | 速效磷(AP)     | [13]、[20]、[21]、[22]、[23]、[29]、[31]、[33]、[34]、[36]                              |
|      | 速效钾(AK)     | [13]、[20]、[22]、[23]、[29]、[31]、[33]、[36]  |

1.3 Meta 分析

运用 MetaWin2.1 软件,采用混合效应模型对所提取的数据进行 Meta 分析<sup>[37]</sup>,按照 Hedges 在 1999 年构造的适应性更强的反应比( Response ratio,  $\ln R$ )来计算样本效应值<sup>[38]</sup>,用加权平均效应值来度量地震受损区的土壤恢复情况,其计算公式如下:

$$\ln R = \ln \frac{X_e}{X_c} = \ln X_e - \ln X_c \tag{1}$$

$$V_{\ln R} = \frac{S_e^2}{N_e X_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2} \tag{2}$$

$$W'_{ij} = \frac{W_{ij}}{N_{ij}} \tag{3}$$

$$\ln R_+ = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m W_{ij} \times \ln R_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m W'_{ij}} \tag{4}$$

式中,  $N_e$ 、 $N_c$  分别是实验组和对照组的样本数,  $X_e$ 、 $X_c$  分别是实验组和对照组的平均值,  $S_e$ 、 $S_c$  分别是实验组和对照组的标准差,  $V_{\ln R}$  是样本效应值的方差,  $m$  是第  $i$  组的研究数,  $n$  为级别组数,  $N_{ij}$ 、 $W'_{ij}$ 、 $\ln R_{ij}$  分别为第  $i$  组第  $j$  个独立研究的观测数、权重因子、校正权重因子和效应值。如果  $\ln R_+$  大于 0, 则说明所考察因素对实验对象产生正效应;  $\ln R_+$  小于 0, 则说明所考察因素对实验对象产生负效应;  $\ln R_+$  等于 0, 则表明所考察因素未对实验对象产生效应<sup>[39]</sup>。

为了减小因样本量太小或实验组和对照组的样本量悬殊所带来的统计误差, 本研究采用靴攀法(bootstrap)进行 999 次迭代生成加权平均效应值的 95% 置信区间<sup>[40]</sup>。如果 95% 置信区间不包含 0, 则表明所考察因素在 0.05 的检验水平上对实验对象产生显著影响; 如果包含 0, 则说明未产生显著影响。采用 Egger 法对所选用的 19 篇文献进行发表偏倚检验<sup>[41]</sup>, 结果表明无发表偏倚, Meta 分析结果可靠。

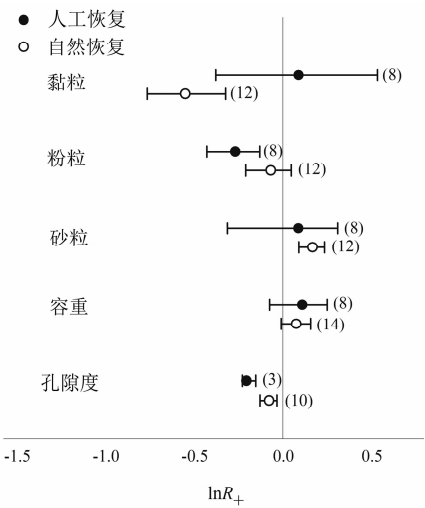
本研究中将加权平均效应值转化成变化率  $C$ <sup>[42]</sup>, 用以更好地解释地震受损区的土壤理化性质的变化,  $C > 0$  说明地震受损区的土壤某指标值大于未受损区,  $C < 0$  说明受损区的土壤某指标值小于未受损区,  $C = 0$  说明地震受损区与未受损区的土壤某指标值相等, 其计算公式为:

$$C = (e^{\ln R_+} - 1) \times 100\% \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 不同恢复方式下的土壤物理性质

与邻近未受损区相比, 人工恢复的地震受损区土壤黏粒、砂粒含量和容重差异均不显著( $p > 0.05$ ), 而土壤粉粒含量、孔隙度显著降低( $p < 0.05$ , 图 1); 人工恢复地震受损区的粉粒含量减少了 23.83%, 孔隙度降低了 18.88% (表 2)。自然恢复对地震受损区的土壤粉粒含量和容重影响不显著( $p > 0.05$ ), 而对土壤黏粒含量、孔隙度呈现显著负效应( $p < 0.05$ , 图 1), 对土壤砂粒含量呈现显



(图中圆圈代表加权平均效应值, 误差线代表 95% 置信区间, 括号中的数字代表相应指标的样本量。下同)

图 1 不同恢复方式对地震受损区土壤物理性质的影响

Fig. 1 Effects of different recovery ways on soil physical properties in earthquake destroyed area

表 2 不同恢复方式下地震受损区土壤物理性质的加权平均效应值 ( $\ln R_+$ ) 和变化率 ( $C$ )

Tab. 2 The weighted mean effect sizes and the change rates of soil physical properties in earthquake destroyed area recovered by different ways

| 土壤物理性质 | 人工恢复      |        | 自然恢复      |        |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|        | $\ln R_+$ | $C/\%$ | $\ln R_+$ | $C/\%$ |
| 黏粒     | 0.09      | 8.88   | -0.55     | -42.58 |
| 粉粒     | -0.27     | -23.83 | -0.07     | -6.96  |
| 砂粒     | 0.08      | 8.72   | 0.16      | 17.76  |
| 容重     | 0.11      | 11.09  | 0.07      | 7.38   |
| 孔隙度    | -0.21     | -18.88 | -0.08     | -7.83  |

著正效应( $p < 0.05$ ,图 1);自然恢复地震受损区的土壤黏粒含量和孔隙度分别降低了 42.58% 和 7.83%,砂粒含量增加了 17.76%(表 2)。

与自然恢复相比,人工恢复对地震受损区的土壤黏粒、粉粒和砂粒含量以及容重影响不显著( $p > 0.05$ ),而对土壤孔隙度呈现显著负效应( $p < 0.05$ ,图 2)。地震受损区在人工恢复下的土壤孔隙度显著低于自然恢复。

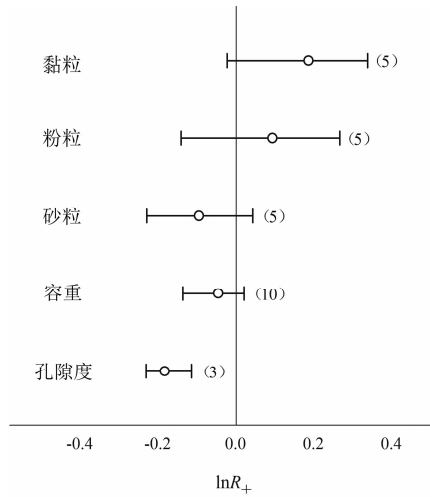


图 2 与自然恢复相比,人工恢复地震受损区土壤物理性质的加权平均效应值

Fig.2 Compared with natural recovery, the weighted mean effect sizes of soil physical properties in earthquake destroyed area by artificial restoration

2.2 不同恢复方式下的土壤化学性质

与未受损区相比,人工恢复和自然恢复对地震受损区土壤 pH 值呈现显著正效应( $p < 0.05$ ,图 3),其值分别升高了 7.22% 和 7.44%(表 3)。人工恢复和自然恢复对地震受损区土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾含量均呈显著负效应( $p < 0.05$ ,图 3),其中,土壤有机质含量分别降低了 52.90% 和 62.59%,全氮含量分别降低了 58.09% 和 63.76%,全磷含量分别降低了 32.49% 和 39.26%,速效氮含量分别降低了 62.26% 和 67.14%,速效磷含量分别降低了 26.75% 和 57.83%,速效钾含量分别降低了 29.71% 和 63.39%(表 3)。人工恢复对地震受损区的土壤阳离子交换量影响不显著( $p > 0.05$ ),但自然恢复对其呈现出显著负效应( $p < 0.05$ ,图 3)。人工恢复对地震受损区的土壤全钾含量表现为显著负效应

( $p < 0.05$ ,图 3),其含量降低了 9.66%(表 3),但自然恢复对其影响不显著( $p > 0.05$ )。

与自然恢复相比,人工恢复对地震受损区的土壤 pH 值、阳离子交换量、土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾含量影响不显著( $p > 0.05$ ,图 4)。就地震受损区土壤 pH 值、阳离子交换量、土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾含量而言,人工与自然恢复方式没有显著差异。

表 3 不同恢复方式地震受损区土壤化学性质的加权平均效应值( $\ln R_+$ )和变化率(C)

Tab.3 The weighted mean effect sizes and the change rates of soil chemical properties in earthquake destroyed area recovered by different ways

| 土壤化学性质     | 人工恢复      |        | 自然恢复      |        |
|------------|-----------|--------|-----------|--------|
|            | $\ln R_+$ | C/%    | $\ln R_+$ | C/%    |
| pH 值       | 0.07      | 7.22   | 0.07      | 7.44   |
| 阳离子交换量 CEC | -0.06     | -5.85  | -1.52     | -78.08 |
| 有机质 SOM    | -0.75     | -52.90 | -0.98     | -62.59 |
| 全氮 TN      | -0.87     | -58.09 | -1.01     | -63.76 |
| 全磷 TP      | -0.39     | -32.49 | -0.50     | -39.26 |
| 全钾 TK      | -0.10     | -9.66  | -0.08     | -7.56  |
| 速效氮 AN     | -0.97     | -62.26 | -1.11     | -67.14 |
| 速效磷 AP     | -0.31     | -26.75 | -0.86     | -57.83 |
| 速效钾 AK     | -0.35     | -29.71 | -1.00     | -63.39 |

3 讨论

土壤是生物、气候等长时间对母质作用而形成的自然界综合体,具有传递、转化物质与能量的作用<sup>[43]</sup>,在遭受地震及滑坡、泥石流等地质灾害的区域,土壤理化性质直接影响着该区域生态恢复的方向和途径<sup>[13]</sup>。

土壤颗粒组成、容重和孔隙度是表征土壤结构的重要参数<sup>[44]</sup>。地震及其引发的地质灾害改变了区域的土壤颗粒组成,与未受损区相比,地震受损区的土壤砂粒含量增多,粉粒含量减少,人工恢复地震受损区的黏粒含量增多,自然恢复区的黏粒减少,与前人研究结果相似,这可能是地震扰动和地质灾害的影响导致土壤的粗骨性增加,大量土壤细颗粒随滑坡而流失,且植被破坏,地表裸露,在降水和风的

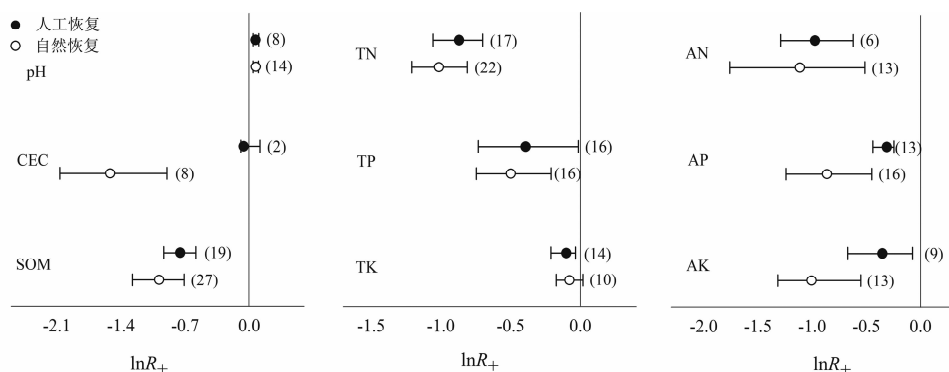


图3 不同恢复方式对地震受损区土壤化学性质的影响

Fig. 3 Effects of different recovery ways on soil chemical properties in earthquake destroyed area

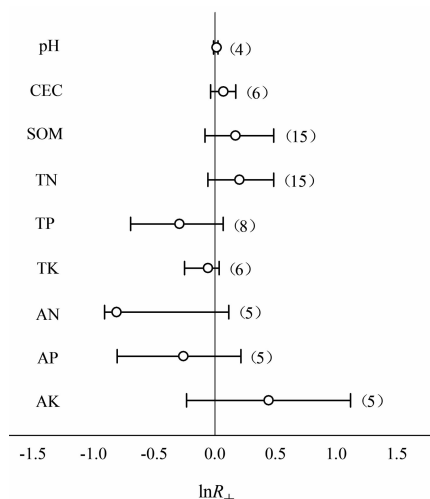


图4 与自然恢复相比,人工恢复地震受损区土壤化学性质的加权平均效应值

Fig. 4 Compared with natural recovery, the weighted mean effect sizes of soil chemical properties in earthquake destroyed area by artificial restoration

作用下地表细颗粒被大量侵蚀<sup>[45]</sup>。与未受损区相比,地震受损区的土壤容重增大,土壤孔隙度显著减小,这与前人研究结果相似,可能是地震造成的土体挤压和滑坡等地质灾害导致土壤容重增大,总孔隙度降低,同时,由于未受损区有更高的植被盖度和物种丰富度,其植物根系的生长和枯枝落叶的分解,改善了土壤结构,增加了土壤孔隙度<sup>[46-47]</sup>。

地震受损区在不同恢复方式下的土壤物理性质有所差异。本研究结果表明,人工恢复下的土壤黏粒和粉粒含量高于自然恢复,砂粒含量低于自然恢复,但无显著性差异,这与前人研究结果相似,可能与清除表层不稳定石砾、削整坡面等人工措施有很大关系<sup>[20,25]</sup>。人工与自然恢复下的土壤容重差异

不显著,各学者对不同区域的研究结果差异较大<sup>[25,27]</sup>,有待进一步研究。地震受损区在人工恢复下的土壤孔隙度显著小于自然恢复,与前人研究结果相似,这可能与恢复过程中踩踏、修筑水平阶等有关<sup>[48]</sup>,说明地震干扰及其引发的地质灾害致使受损区的土壤孔隙度降低,可通过自然恢复更为有效地改善其孔隙度。

土壤 pH 值是表示土壤酸碱度的重要指标<sup>[49]</sup>。本研究结果表明,地震受损区的土壤 pH 值显著大于未受损区,这与前人研究结果相似,可能是因为滑坡、崩塌、泥石流等次生灾害的发生改变了土壤剖面结构,造成深层碳酸盐上翻到表层,从而使受损区土壤 pH 值升高<sup>[50,51]</sup>。土壤阳离子交换量是评价土壤保肥能力的重要指标<sup>[52]</sup>。本研究表明,自然恢复地震受损区的土壤阳离子交换量显著低于未受损区,与前人研究结果相似,这可能是地震次生灾害使地表成熟土壤大量损失所致<sup>[53]</sup>。目前,对人工恢复地震受损区的土壤阳离子交换量的研究较少,且各研究结果差异较大<sup>[24,33]</sup>,有待进一步研究。土壤有机质、氮、磷、钾等营养元素是表征土壤肥力的重要标志<sup>[54]</sup>。本研究结果表明,地震受损区的土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量以及人工恢复下的土壤全钾含量都显著低于未受损区,这与前人研究结果相似,可能是地震干扰及其引发的地质灾害使表层大量成熟土壤损失,减少了地表碳储量,且地震受损区土壤的粗颗粒增多,细颗粒减少,降低了土壤的碳储存能力;加之,地震受损区植被盖度较低,地表凋落物较少,能够进入土壤的有机物质较少,从而使得地震受损区的土壤有机质含量降低<sup>[55-56]</sup>。土壤氮素绝大多数贮藏在有机质中,与

土壤有机质含量的变化趋势一致。土壤磷素、钾素主要来源于岩石矿物风化,积累过程漫长,因此地震受损区的土壤氮素、磷素、钾素含量低于未受损区;而有些研究表明土壤全钾含量高于未受损区,这可能是地震或滑坡等使得区域地表钾含量较低的土壤被深层钾含量较高的土壤或土壤母质覆盖所致<sup>[57]</sup>,本研究中,自然恢复对地震受损区的土壤全钾含量影响不显著。地震受损区的土壤速效氮、速效磷、速效钾含量显著低于未受损区,主要是由于受损区土壤微生物组成和酶活性的改变影响了总量的矿化<sup>[58-59]</sup>。可见,地震及其引发的地质灾害对土壤化学性质造成极大破坏,地震受损区的土壤 pH 值升高,土壤有机质、氮素、磷素、钾素含量低于未受损区。

通过比较分析地震受损区在不同恢复方式下的土壤化学性质,发现人工恢复与自然恢复下的土壤 pH 值、CEC、土壤有机质、氮素、磷素、钾素含量无显著性差异。人工恢复下的土壤 pH 值略大于自然恢复,不同学者对各区域的研究结果差异较大,有待进一步研究。对于土壤阳离子交换量,多数研究表明人工恢复区大于自然恢复区,这可能是客土覆盖等人工措施使得表层熟土增加所致;而在一些人工恢复下的植被盖度低于自然恢复的受损区,表现出人工恢复区的土壤 CEC 较小,这与前人研究结果相似,说明植被状况可能影响土壤 CEC<sup>[52-53]</sup>。土壤有机质主要来源于植物、动物与微生物残体,植被自然恢复速度较慢,而人工恢复区由于多种植小灌木等,凋落物含量较高,因此人工恢复下的土壤有机质含量高于自然恢复<sup>[60]</sup>。土壤氮素绝大多数贮藏在有机质中,因此其变化趋势与土壤有机质相似。土壤磷素、钾素主要来源于岩石风化,由于人工恢复区多采取工程固坡,表层土壤较稳定,故人工恢复下的土壤全磷和全钾含量小于自然恢复。对于速效成分,受恢复时间、植被状况等因素影响,各研究结果差异较大<sup>[13,24,29]</sup>。可见,地震受损区在人工与自然恢复下的土壤化学性质无显著性差异,而人工措施、植被状况、恢复时间等可能影响土壤恢复效果。

## 4 结论

通过对地震受损区的土壤理化性质进行 Meta 分析,主要得到以下结论:(1)与邻近未受损区相

比,地震受损区的土壤孔隙度显著降低,土壤粗颗粒增多,细颗粒减少;土壤 pH 值显著高于未受损区,而土壤有机质、全氮、全磷和土壤速效氮、速效磷、速效钾含量均显著低于未受损区,可见,地震及其引发的地质灾害对土壤造成极大破坏。(2)除土壤孔隙度有显著差异外,人工与自然恢复地震受损区的土壤理化性质差异不显著,随着恢复时间的延续,其恢复效果如何,有待进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] CUI Peng, CHEN Xiaoqing, ZHU Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan province, China, and resulting geohazards [J]. *Natural Hazards*, 2011, **56**(1): 19–36
- [2] ROY C, TAKASHI G, MUNEMITSU A, et al. Ecosystem changes following the 2016 Kumamoto earthquakes in Japan: Future perspectives [J]. *Royal Swedish Academy of Sciences*, 2018, **47**(6): 721–734
- [3] CHEN Liaoqing, WU Fuzhou, YANG Wanqin, et al. A comparison on ecosystem services before/after “5. 12” Wenchuan earthquake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 271–273
- [4] CUI Peng, LIN Yongming, CHEN Can. Destruction of vegetation due to geo-hazards and its environmental impacts in the Wenchuan earthquake areas [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **44**(1): 61–69
- [5] 于文金. 地震灾害对四川省区域生态系统危害及损失评价 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(12): 5785–5794 [YU Wenjin. The harm and loss of ecosystem assessment of earthquake disaster in Sichuan province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(12): 5785–5794]
- [6] CARLA R, NORA A. Landslides and their contribution to land-cover change in the mountains of Mexico and Central America [J]. *Biotropica*, 2006, **38**(4): 446–457
- [7] LIN Wentzu, LIN Chaoyuan, CHOU Wenchieh. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan [J]. *Ecological Engineering*, 2006, **28**(1): 79–89
- [8] 骆建国, 周立江, 刘波, 等. “5·12”汶川特大地震灾害造成四川森林资源损失的评估研究 [J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(7): 3914–3917 [LUO Jianguo, ZHOU Lijiang, LIU Bo, et al. Study on the assessment of Sichuan forest resources losses caused by Wenchuan catastrophic earthquake disasters [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, **39**(7): 3914–3917]
- [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] CAO Chunxiang, YANG Bin, XU Ming, et al. Evaluation and analysis of post-seismic restoration of ecological security in Wenchuan using remote sensing and GIS[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, **7**(6): 1919–1936
- [11] 董世魁, 刘世梁, 邵新庆, 等. 恢复生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 96–101 [DONG Shikui, LIU Shiliang, SHAO Xinqing, et al. Restoration ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016: 96–101]
- [12] 李晟之. 四川生态建设报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018: 85–99 [LI Shengzhi. Annual report on ecological construction of Sichuan [M]. Beijing: China Social Science Documentation Publishing House, 2018: 85–99]
- [13] 麦积山. 北川震后滑坡体表层土壤理化性质空间变化特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016: 1–54 [MAI Jishan. Spatial variability properties of surface soil physiochemical in the landslide area of Beichuan County, southwestern China, after 5.12 Wenchuan earthquake [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016: 1–54]
- [14] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 798–808 [PENG Yi, WANG Yukuan, FU Bin, et al. Spatial distribution of Carbon storage function and seismic damage in Wenchuan earthquake stricken areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(3): 798–808]
- [15] XU Bo, WANG Jinniu, SHI Fusun, et al. Relationships between plant colonization and soil characteristics in the natural recovery of an earthquake triggered debris flow gully in the Wanglang National Nature Reserve, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(1): 59–68
- [16] 骆翔宇, 吴敬陈, 晋雨漪, 等. 四川省北川县震后边坡土壤状况与植被恢复效果[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(1): 274–280 [LUO Xiangyu, WU Jingchen, JIN Yuyi, et al. Soil nutrient and vegetation restoration on earthquake-stricken slopes in Beichuan County, Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(1): 274–280]
- [17] 徐建. 谢家店子滑坡体植被恢复与土壤物理性质研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2017: 1–58 [XU Jian. Study on the vegetation restoration and soil physical properties of Xiejiadianzi landslide[D]. Nanchong: China West Normal University, 2017: 1–58]
- [18] ELLENBERG S S. Meta-analysis the quantitative approach to research review[J]. Seminars in Oncology, 1988, **15**(5): 472–481
- [19] 彭少麟, 唐小焱. Meta 分析及其在生态学上的应用[J]. 生态学杂志, 1998, **17**(5): 74–79 [PENG Shaolin, TANG Xiaoyan. Meta-analysis and its application in ecology[J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, **17**(5): 74–79]
- [20] 徐小军. 汶川地震区新生水土流失对土壤与植被的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2012: 1–71 [XU Xiaojun. Effect of seismic soil and water loss on soil and vegetation in Wenchuan earthquake area [D]. Chongqing: Southwest University, 2012: 1–71]
- [21] 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: 1–62 [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: 1–62]
- [22] 李丹雄. 北川县地震滑坡迹地植被恢复适宜植物研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 1–88 [LI Danxiong. Study on vegetation restoration and plant species selection of the landslide areas induced by the Wenchuan earthquake in Beichuan County [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015: 1–88]
- [23] 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: 1–74 [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: 1–74]
- [24] LIN Yongming, DENG Haojun, DU Kun, et al. Soil quality assessment in different climate zones of China's Wenchuan earthquake affected region[J]. Soil & Tillage Research, 2017, **165**: 315–324
- [25] 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 Saiwei, 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]
- [26] CHENG Song, YANG Gang, YU Hui, et al. Impacts of Wenchuan earthquake-induced landslides on soil physical properties and tree growth[J]. Ecological Indicators, 2012, **15**(1): 263–270
- [27] SHI Fusun, WANG Jinniu, LU Tao, et al. Effects of different types of vegetation recovery on runoff and soil erosion on a Wenchuan earthquake-triggered landslide, China [J]. Soil & Water Conservation Society, 2013, **68**(2): 138–145
- [28] 李志华, 陈博, 李吉跃, 等. “5·12”汶川大地震后无林地土壤物理性质的变化[J]. 广东林业科技, 2014, **30**(1): 46–51 [LI Zhihua, CHEN Bo, LI Jiyue, et al. Physical properties change of non-forest soils after 5·12 Wenchuan earthquake [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2014, **30**(1): 46–51]
- [29] 孙丽文. 5.12 地震后北川不同滑坡治理措施效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 1–83 [SUN Liwen. Study of effects of landslide control measures in Beichuan County after 5.12 earthquake [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016: 1–83]
- [30] 孙凡, 严思维, 林勇明, 等. 汶川震区不同气候区受损植被土壤

- 有机碳储量和碳密度分布特征[J]. 广西植物, 2017, **37**(12): 1498 – 1507 [SUN Fan, YAN Saiwei, LIN Yongming, et al. Distribution characteristics of soil organic Carbon storage and Carbon density from damaged vegetation under different climate types in Wenchuan earthquake region[J]. Guihaia, 2017, **37**(12): 1498 – 1507]
- [31] 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]
- [32] 仲波, 孙庚, 程魏, 等. 汶川地震对森林土壤养分动态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(5): 773 – 779 [ZHONG Bo, SUN Geng, CHENG Wei, et al. Effects of Wenchuan earthquake on soil nutrient dynamics in forest[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, **22**(5): 773 – 779]
- [33] 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
- [34] 秦纪洪, 武艳钊, 孙辉, 等. 彭州市龙门山不同地震裸地次生演替初期土壤酶活性研究[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(3): 55 – 59 [QIN Jihong, WU Yanzhuo, SUN Hui, et al. Study on the soil enzyme activity dynamics under different ecological restoration models on earthquake induced bareland in Mt. Longmen, Pengzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(3): 55 – 59]
- [35] 张广帅, 林勇明, 马瑞丰, 等. 汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 669 – 677 [ZHANG Guangshuai, LIN Yongming, MA Ruifeng, et al. Carbon source metabolic diversity of soil microbial community under different climate types in the area affected by Wenchuan earthquake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 669 – 677]
- [36] 徐慧文. 5 · 12 地震重灾区灾后生态功能恢复效应评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2015: 1 – 70 [XU Huiwen. Evaluation of ecological recovery after 5 · 12 Wenchuan earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015: 1 – 70]
- [37] ROSENBERG M S, ADAMS D C, GUREVITCH J. MetaWin; statistical software for meta-analysis [M]. Massachusetts, USA. Sinauer Associates Sunderland, 2000: 23 – 36
- [38] HEDGES LV, GUREVITCH J, CURTIS PS. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, **80**(4): 1150 – 1156
- [39] 罗军. 空间异质性与自我抑制在合作系统稳定维持中作用的整合分析[D]. 昆明: 中国科学院昆明动物研究所, 2013: 1 – 62 [LUO Jun. Spatial heterogeneity or self-restraint in the mutualism maintenance; a quantitative assessment using meta-analysis [D]. Kunming: Kunming institute of zoology, CAS, 2013: 1 – 62]
- [40] 李树鑫, 卢元兵, 段宝利, 等. 杨树(Populus)生理生态特性对增温、大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和干旱响应的 Meta 分析[J]. 山地学报, 2017, **35**(5): 636 – 644 [LI Shuxin, LU Yuanbing, DUAN Baoli, et al. A meta-analysis of the response of Populus to warming increasing CO<sub>2</sub> and drought [J]. Mountain Research, 2017, **35**(5): 636 – 644]
- [41] EGGER M, DAVEY SMITH G, SCHNEIDER M, et al. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test [J]. BMJ (Clinical Research ed.), 1997, **315**(719): 629 – 634
- [42] YUE K, FORNARA D A, YANG Wanqin, et al. Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: a global synthesis[J]. Global Change Biology, 2017, **23**(6): 2450 – 2463
- [43] JENNY H. Factors of soil formation; a system of quantitative pedology [M]. New York: Dover Publications, 1941: 21 – 28
- [44] NEVES C S, FELLER C, GUIMARAES M F, et al. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the Cropping Profile Method in clayey Oxisols in Brazil [J]. Soil & Tillage Research, 2003, **71**(2): 109 – 119
- [45] WANG J, SUN G, SHI F, et al. Runoff and soil loss in a typical subtropical evergreen forest stricken by the Wenchuan earthquake: Their relationships with rainfall, slope inclination, and vegetation cover [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **69**(1): 65 – 74
- [46] SCHUSTER R, HIGHLAND L. Overview of the effects of mass wasting on the natural environment [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2007, **13**(1): 25 – 44
- [47] BIENES R, MARQUES M J, SASTRE B, et al. Eleven years after shrub revegetation in semiarid eroded soils influence in soil properties [J]. Geoderma, 2016, **273**: 106 – 114
- [48] QI Yanbing, CHEN Tao, PU Jie, et al. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land [J]. Catena, 2018, **160**: 339 – 344
- [49] JI Chengjun, YANG Yuanhe, HAN Wenxuan, et al. Climatic and edaphic controls on Soil pH in alpine grasslands on the tibetan plateau, China: a quantitative analysis [J]. Pedosphere, 2014, **24**(1): 39 – 44
- [50] GANJEGUNTE G K, WICK A F, STAHL P D, et al. Accumulation and composition of total organic Carbon in reclaimed coal mine lands [J]. Land Degradation & Development, 2009, **20**(2): 156 – 175
- [51] JUWARKAR A A, MEHROTRAA K L, NAIR R, et al. Carbon sequestration in reclaimed Manganese mine land at Gumgaon, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **160**(1/4): 457 – 464
- [52] PIOTR G, JAN M. Tree species affect cation exchange capacity and cation binding properties of organic matter in acid forest soils



- [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511:655 – 662
- [53] FU Biao, QI Yanbing, CHANG Qingrui. Impacts of revegetation management modes on soil properties and vegetation ecological restoration in degraded sandy grassland in farming-pastoral ecotone [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015, 8(1): 26 – 34
- [54] WANG Xiang, YOO K, WACKETT A A, et al. Soil organic Carbon and mineral interactions on climatically different hillslopes [J]. *Geoderma*, 2018, 322(71): 71 – 80
- [55] 田佳倩,周志勇,包彬,等. 农牧交错区草地利用方式导致的土壤颗粒组分变化及其对土壤碳氮含量的影响[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 601 – 610 [TIAN Jiaqian, ZHOU Zhiyong, BAO Bin, et al. Variation of soil particle size distribution with land-use types and influences on soil organic Carbon and Nitrogen [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 601 – 610]
- [56] DE DEYN G B, CORNELISSEN J H, BARDGETT R D. Plant functional traits and soil Carbon sequestration in contrasting biomes [J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 516 – 531
- [57] DONG S K, WEN L, LI Y Y, et al. Soil-quality effects of grassland degradation and restoration on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2256 – 2264
- [58] CHEN D, ZHANG S, DONG S, et al. Effect of land use on soil nutrients and microbial biomass of an alpine region on the northeastern Tibetan plateau, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(5): 446 – 452
- [59] WU Gaolin, LIU Zhenheng, ZHANG Lei, et al. Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and Carbon properties in black-soil-type degraded grassland [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 469 – 479
- [60] ROSENZWEIG S T, CARSON M A, BAER S G. Changes in soil properties, microbial biomass, and fluxes of C and N in soil following post-agricultural grassland restoration [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100:186 – 194

## Meta-analysis of Soil Physical and Chemical Properties in Earthquake Destroyed Area Recovered by Different Ways

DUAN Chensong<sup>1,2</sup>, HAN Yan<sup>1</sup>, ZHANG Yuanbin<sup>1\*</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Geological hazards such as landslide, collapse and debris flow induced by earthquake not only seriously damage soil physical structure, but also affect the quality of soil. Further, it causes a series of ecological problems. Artificial restoration or natural recovery is usually used in earthquake destroyed area. So far, there are some individual cases studied the soil recovery effect in earthquake destroyed areas, but few articles have reported on its integrated analysis. In this paper, meta-analysis was used to comprehensively analyze the soil physical and chemical properties of earthquake destroyed areas under different recovery modes. A total of 19 published reports were screened and 434 observations were obtained through the Chinese and English database, with the subjects of earthquake or landslide and soil as the retrieval period from 1990 – 2018. The results showed that: (1) compared with the nearby undestroyed areas, in the earthquake destroyed areas undergoing artificial restoration, soil silt content and porosity decreased significantly, while soil clay content, sand content and bulk density did not change significantly. And undergoing natural recovery, soil clay content and porosity decreased significantly, while soil sand content increased significantly. (2) Compared with the earthquake destroyed sites undergoing natural recovery, soil porosity decreased significantly by artificial restoration. There were no significant differences in soil clay content, silt content, sand content and bulk density induced by the two different recovery modes. (3) Compared with the nearby undestroyed areas, soil pH value increased significantly in the earthquake destroyed areas, while the content of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkaline nitrogen, available

phosphorus and available potassium decreased significantly. (4) There were no significant differences in the soil pH value, cation exchange capacity, soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline nitrogen, available phosphorus and available potassium contents between artificial restoration and natural recovery. Within 10 years, the recovery ways have no significant effects on soil properties in earthquake destroyed areas except on soil porosity. With the progress of recovery time, the recovery ways effects after the earthquake on soil properties needs to be further studied.

**Key words:** Meta-analysis; soil physical and chemical properties; artificial restoration; natural recovery; earthquake destroyed area

## 泥石流声波信号预处理时域图

(袁路,中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

泥石流在运动过程中颗粒之间的相互碰撞、摩擦以及颗粒与沟床、沟岸的碰撞、摩擦作用扰动空气产生声波。作为泥石流声波法预警的重要媒介,泥石流声波的特性从一定程度上可以反映泥石流的性质和规模。通过开展室内水槽实验,以泥石流容重(性质)和流量(规模)为变量,分析研究了实验变量对泥石流声波时频域特征的影响规律。实验表明:泥石流声波最大振幅的高低可反映泥石流规模的大小;泥石流声波最大振幅对泥石流容重的响应各不相同,据此可以估算泥石流的峰值流量及规模,预测其危害大小。同时,不同容重的泥石流声波能量分布频带不同,通过对泥石流声波能量分布的分析,可以对泥石流的性质和类型进行判别。

详见本期《泥石流性质和规模对声波特性影响的实验研究》一文。