

文章编号: 1008-2786-(2018)5-669-10  
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000363

## 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

李宁宁<sup>1</sup>, 张光辉<sup>1,2\*</sup>, 王 浩<sup>1</sup>, 张宝军<sup>3</sup>, 杨寒月<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;  
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌, 712100)

**摘 要:** 为了明确黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体植被演替特征及其对土壤养分的影响, 本文选取了 6 个演替年限依次增加的植物群落(猪毛蒿 + 茭蒿、野菊花 + 早熟禾、杠柳 + 猪毛蒿、铁杆蒿 + 达乌里胡枝子 + 早熟禾、铁杆蒿 + 早熟禾和铁杆蒿 + 达乌里胡枝子), 以立地条件类似且未发生滑坡坡面上铁杆蒿群落为对照, 通过野外调查和室内试验, 研究了物种多样性、植被盖度、地上地下生物量、枯落物蓄积量及土壤养分指标有机质、全氮、全磷含量的变化特征, 并对植被特征和土壤养分指标进行相关性分析。结果表明: (1) 随着演替年限的增加, Simpson 优势度指数  $D$  和 Margalef 丰富度指数  $M_a$  呈减小 - 增加 - 减小的趋势, Shannon-wiener 多样性指数  $H'$  和 Pielou 均匀度指数  $J_p$  呈增大 - 减小 - 增大的趋势; 植被盖度、地上地下生物量、枯落物蓄积量、土壤有机质和全氮含量均呈增加趋势; (2) 与对照组相比, 演替初期植被盖度差异显著 ( $P < 0.05$ ), 地上生物量和枯落物蓄积量无明显差异 ( $P > 0.05$ ), 地下生物量差异极其显著 ( $P < 0.001$ ); (3) 表层土壤全氮、有机质含量与植物盖度、地上地下生物量和枯落物蓄积量均呈正相关, 全磷含量仅与枯落物蓄积量呈正相关。研究结果深化了黄土丘陵沟壑区植被演替规律及土壤养分对植被恢复响应的认识, 为该区浅层滑坡堆积体的治理与生态恢复提供理论指导。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 浅层滑坡堆积体; 植被演替特征; 土壤养分

**中图分类号:** S158

**文献标志码:** A

黄土丘陵沟壑区年降水分配不均、土体节理发育、植被稀少, 导致该区滑坡频发。据调查, 仅陕西省境内的黄土丘陵沟壑区约发育 12 000 处滑坡<sup>[1]</sup>, 其中滑动面深度小于 6 m 的浅层滑坡是该区的主要滑坡类型<sup>[2]</sup>。浅层滑坡会破坏植被及耕地、增加流域侵蚀泥沙, 导致植被大面积死亡, 形成次生裸地, 随着时间的推移, 次生裸地上的植被开始演替, 植物群落物种多样性、生物量、枯落物蓄积量和土壤养分等随之发生相应变化。

滑坡形成的次生裸地上, 植被演替初期的草本

植物为先锋物种, 首先在滑坡体上定居, 且以禾本科和菊科植物为主<sup>[3-4]</sup>。植被演替与当地气候、地形、土壤等条件密切相关, 如汶川地震滑坡体上植被恢复较好, 平均干重高达  $0.97 \text{ kg/m}^2$ <sup>[5]</sup>, 而黄土丘陵沟壑区撂荒地的平均干重仅为  $0.32 \text{ kg/m}^2$ 。物种多样性指数能够反映群落植物种类的组成、稳定性、复杂性和结构水平, 常用的物种多样性指数有 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数和 Simpson 优势度指数等。研究表明, 陇南地震滑坡体上植被 Shannon-Wiener 多

收稿日期 (Received date): 2018-3-29; 改回日期 (Accepted date): 2018-6-21

基金项目 (Foundation item): “十三五”国家重大研发计划 (2017YFC0504702); 国家自然科学基金重点项目 (41530858); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (41621061)。[National Key R & D Program of China (2017YFC0504702); State Key Program of National Natural Science Foundation of China (41530858); Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (41621061)]

作者简介 (Biography): 李宁宁 (1995-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤侵蚀。[LI Ningning (1995-), female, born in Wuwei, Gansu province, M. Sc. candidate, research on soil erosion] E-mail: 201721170008@mail.bnu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 张光辉 (1969-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[ZHANG Guanghui (1969-), male, born in Jingning, Gansu province, professor, research on soil erosion and water and soil conservation] E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

样性指数和 Pielou 均匀度指数均随海拔升高呈先增大、后减小的变化趋势, Margalef 丰富度指数和 Simpson 优势度指数则随海拔升高呈先减小、后增大再减小的变化趋势<sup>[6]</sup>。植物根系从土壤中吸收养分和水分满足植物生长需求, 浅层滑坡堆积体上植物根系主要分布在 0~40 cm, 且随着深度的增加, 根系生物量呈明显的下降趋势<sup>[7]</sup>。根系的生长发育会显著影响土壤性质, 随着植物根系的生长发育及地表枯落物与表土的混合, 土壤理化性质必然会发生相应变化, 进而影响土壤养分状况。此外, 由于植物类型不同, 植物对土壤营养元素的吸收利用不同, 会导致土壤养分出现差异<sup>[8-9]</sup>, 阿守珍等<sup>[10]</sup>对纸坊沟流域不同植被类型的土壤养分效应分析结果正说明这一点。而且由于滑坡体上植被类型和生长状况与未发生滑坡的坡面存在显著的差别, 北川震后滑坡体和龙门山滑坡体的土壤养分均显著低于未发生滑坡的相邻坡体<sup>[11-12]</sup>。但随着滑坡体植被恢复年限的延长, 滑坡体上土壤养分会呈逐渐增加趋势, 印度东北部滑坡体土壤有机质和全氮含量与植被恢复年限间的研究结果<sup>[13]</sup>充分说明了这一点。

目前学者对滑坡体植被演替及土壤养分响应的研究集中于地震引起的大型滑坡。然而, 关于黄土丘陵沟壑区分布广、数量多的小型浅层滑坡堆积体上植被演替特征及其对土壤养分影响的研究相对较少。本文以黄土丘陵沟壑区纸坊沟小流域不同演替阶段的浅层滑坡堆积体为研究对象, 选择滑坡体上 6 个不同演替年限的植物群落, 通过野外调查和室内试验, 系统研究浅层滑坡堆积体上植被特征和土壤养分对植被演替过程的响应, 分析土壤养分与植被特征之间的相互关系, 为浅层滑坡体治理和生态恢复提供理论支撑。

## 1 研究区概况

纸坊沟小流域位于陕西省延安市安塞区 (109°19'30"E, 36°51'30"N), 流域呈南北向狭长型, 面积为 8.27 km<sup>2</sup>, 海拔在 1042~1426 m 之间。流域地形破碎, 沟壑纵横, 属于黄土丘陵沟壑区第二副区, 沟壑密度高达 8.06 km/km<sup>2</sup>, 流域内水土流失严重, 多年平均侵蚀模数达 14 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。气候属于暖温带半干旱大陆性季风气候, 据 1972 年以来的监测资料表明, 年平均降水量为 505.1 mm 左右, 年际分布不均匀, 丰水年降水量可达 700 mm 以

上, 枯水年降水量仅有 300 mm 左右, 年内集中分布在 7—9 月, 占全年降水量的 61.1%。年平均蒸发量 1463 mm, 无霜期 160~180 d, 年日照时间 2415 h, 年均气温 8.8℃, ≥0℃ 积温为 3733.5℃, ≥10℃ 的积温为 3160.2℃<sup>[14-16]</sup>。土壤类型为黄绵土, 植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干旱草原过渡的森林草原带, 主要灌木有狼牙刺 (*Sophora viciifolia*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、杠柳 (*Periploca sepium*) 等, 主要草本植物有窄颖早熟禾 (*Poa stenachyra* Keng)、野菊花 (*Dendranthema indicum*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、茼蒿 (*Artemisia giraldii* Pamp)、茵陈蒿 (*Artemisia capillaries*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)。研究区土质疏松、地形破碎、坡度较陡、短历时高强度降雨较多, 自然条件有利于滑坡的发生。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地选择及调查

2017 年 7 月, 在安塞水土保持试验站工作人员的协助下, 对纸坊沟内 75 处滑坡体的类型、规模、滑坡时间等进行了系统的调查, 然后选择了人为干扰较少, 立地条件类似的 6 个典型浅层滑坡堆积体<sup>[17]</sup>, 以滑坡堆积体上不同演替年限的植物群落为研究对象, 分别是猪毛蒿+茼蒿、野菊花+早熟禾、杠柳+猪毛蒿、铁杆蒿+达乌里胡枝子+早熟禾、铁杆蒿+早熟禾和铁杆蒿+达乌里胡枝子。由群落优势种类型、物种种类和生物量可以判断其演替年限依次增加<sup>[18-19]</sup>。选择立地条件类似且未发生滑坡坡面上铁杆蒿群落为对样地, 各样地的基本情况见表 1。

在 2017 年 7—8 月进行了野外样地的相关测定及土壤样品采集。每个样地随机选取 3 个 1 m × 1 m 的样方, 分别调查植物种类、盖度、高度、多度、地上生物量、地下生物量和枯落物蓄积量。坡度用坡度仪测定, 坡向用罗盘测定, 经纬度、海拔由手持 GPS 测定。

### 2.2 测定方法

样方内植物总盖度用照相机测定, 并用 PCOVER 软件处理得到, 样方内各植物的分盖度用目估法估计。地上生物量和枯落物蓄积量采用全收

表1 样地基本情况  
Tab.1 Basic information of sampling site

样地编号	群落类型	经度	纬度	坡度/%	海拔/m
1	猪毛蒿 + 茭蒿	109°45'47.52"	36°47'30.84"	53.17	1211.91
2	野菊花 + 窄颖早熟禾	109°40'6.60"	36°42'20.52"	53.17	1071.31
3	杠柳 + 猪毛蒿	109°23'56.40"	36°18'48.96"	67.45	1105.52
4	铁杆蒿 + 达乌里胡枝子 + 窄颖早熟禾	109°1'20.28"	36°22'1.92"	48.77	1174.02
5	铁杆蒿 + 窄颖早熟禾	109°24'2.16"	36°18'2.52"	50.95	1104.82
6	铁杆蒿 + 达乌里胡枝子	109°3'49.32"	36°19'53.76"	60.09	1163.8
7	铁杆蒿	109°39'52.56"	36°44'58.92"	48.77	1268.83

注:植物拉丁名如下:猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、茭蒿 (*Artemisia giraldii* Pamp)、野菊花 (*Dendranthema indicum*)、窄颖早熟禾 (*Poa stenachyrra* Keng)、杠柳 (*Periploca sepium*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)。

获法;地下生物量用根钻取样(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm),在室内用水洗法测定,设置9个重复;草本植物根系多集中在0~60 cm,虽样地3内出现了幼年的杠柳,但预试验发现60 cm以下基本没有根系分布,因此用直径9 cm的根钻分层采集60 cm深度的土样,可以测定根系分布的主体特征。有机质用重铬酸钾加热法测定;全氮用重铬酸钾-硫酸消化、凯氏定氮法测定;全磷用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定,各指标测定均设置两个重复,取其平均值。

2.3 数据计算与分析方法

物种多样性计算选择常用的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数。Simpson 优势度指数可以表示滑坡体植物群落抗干扰能力;Shannon-Wiener 多样性指数可以评价浅层滑坡堆积体植被演替能力;Margalef 丰富度指数能直观地表征植物种类的多少;Pielou 均匀度指数可以反映物种分布情况;相对重要值反映植物种群在群落中地位,也是判断群落类型的依据。其公式<sup>[20]</sup>如下:

$$D = 1 - P_i^2 \tag{1}$$

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$Ma = (S - 1) / \log N \tag{3}$$

$$J_p = H' / \log S \tag{4}$$

$$P_i = R_c + R_f \tag{5}$$

式中:  $D$  为 Simpson 优势度指数;  $H'$  为 Shannon-Wiener 多样性指数;  $Ma$  为 Margalef 丰富度指数;  $J_p$  为 Pielou 均匀度指数;  $P_i$  为种  $i$  的相对重要值;  $R_c$  为物种盖度;  $R_f$  为物种多度;  $S$  为样方内物种数目;

$N$  为所有物种个体数之和。  
运用 SPSS18.0 软件对数据进行单因素方差分析和双变量相关分析,运用 Origin8.5 软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 植物群落特征随演替过程的变化

物种多样性是指一定时间一定空间中全部生物或者某一生物类群的物种数目与各个物种的个体分布特点。随着演替年限的增加, Simpson 优势度指数  $D$  和 Margalef 丰富度指数  $Ma$  呈先减小,再增加,再减小的趋势,而 Shannon-wiener 多样性指数  $H'$  和 Pielou 均匀度指数  $J_p$  呈先增加,再减小,再增加的趋势(图1)。滑坡初期,原来坡面的植被基本全部被破坏,植被重新演替的过程中,埋藏在滑坡体土壤里的草本种子生长快、基数大、扩散能力强,所以草本植物首先在浅层滑坡堆积体上定居。此时草本植物种类复杂,主要物种有猪毛蒿和茭蒿等,此阶段物种多样性和均匀度指数都比较低。随着植被进一步演替,少年生的植物开始入侵,代表物种为野菊花、早熟禾等,此阶段物种多样性和物种均匀性都逐渐增加。随着植物群落的演替,群落中逐渐出现多年生物种,由于多年生物种竞争力较强,所以逐渐成为群落优势种,此阶段物种多样性指数和均匀度指数呈减小的趋势。群落演替的后期阶段,群落结构基本达到稳定,形成顶级群落,群落丰富度指数降低,与演替初期相比,物种丰富度有所下降,物种均匀度有所上升。

植被盖度指植被的垂直投影面积占地表面积的

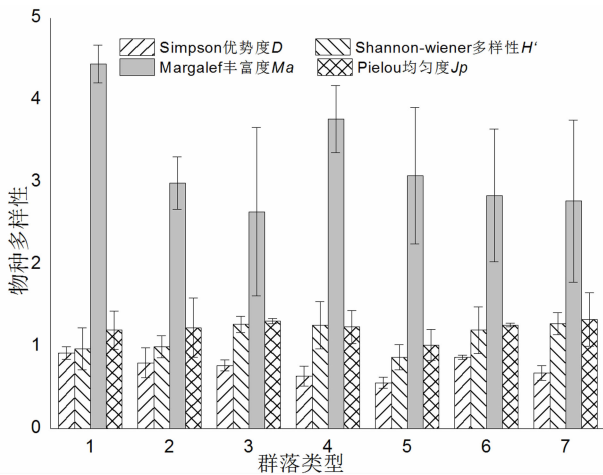


图1 群落物种多样性随演替过程的变化趋势

Fig. 1 The changes of community species diversity with succession process

百分数,它反映植被的茂密程度,以及植被进行光合作用的面积<sup>[21]</sup>。随着植被演替年限的增加,除野菊花+早熟禾群落外,植被盖度呈上升趋势(图2)。演替初期的群落盖度只有18%,说明群落演替速率比较缓慢。单因素方差分析显示,与对照样地相比,演替初期的猪毛蒿+茼蒿、野菊花+早熟禾和杠柳+猪毛蒿群落植被盖度差异显著( $P < 0.05$ ),其他群落盖度差异不显著( $P > 0.05$ ),可能是植物种类的差异所致。

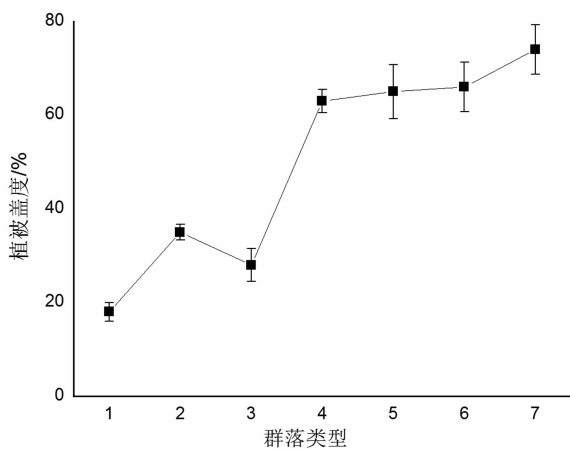


图2 群落植被盖度随演替过程的变化趋势

Fig. 2 The changes of community coverage with succession process

地上生物量指样地中地上生长的所有植被的总干重。浅层滑坡堆积体植被地上生物量如图3所示,除野菊花+早熟禾群落外,植被地上生物量随着植被演替年限的增加呈上升趋势。单因素方差分析

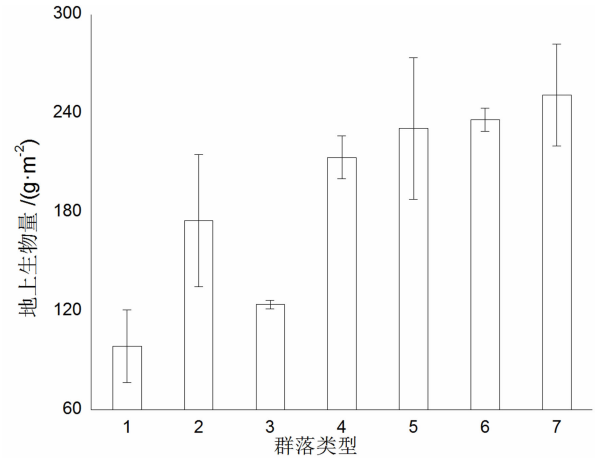


图3 群落植被地上生物量随演替过程的变化趋势

Fig. 3 The changes of aboveground biomass with succession process

显示,与对照相比,各样地植被地上生物量差异不显著( $P > 0.05$ )。说明浅层滑坡堆积体上不同演替年限植被地上生物量差别较小,但总体呈上升趋势,这可能是由植被类型差异引起。各样地平均地上生物量仅为189.85 g/m<sup>2</sup>,说明滑坡体上植被演替比较缓慢。

枯落物是由植物地上部分产生并归还到地表的所有有机物质的总称<sup>[22]</sup>。枯落物蓄积量受光照、土壤水分和植被生长状况等因素的影响。除野菊花+早熟禾群落外,群落枯落物蓄积量随演替年限的增加而增加(图4)。单因素方差分析显示,不同演替年限群落的枯落物蓄积量不存在显著差异( $P > 0.05$ ),这说明不同演替年限群落的枯落物蓄积量差异较小。与对照组相比,其他样地枯落物蓄积量均有所降低。对枯落物蓄积量和地上生物量做回归分析得:

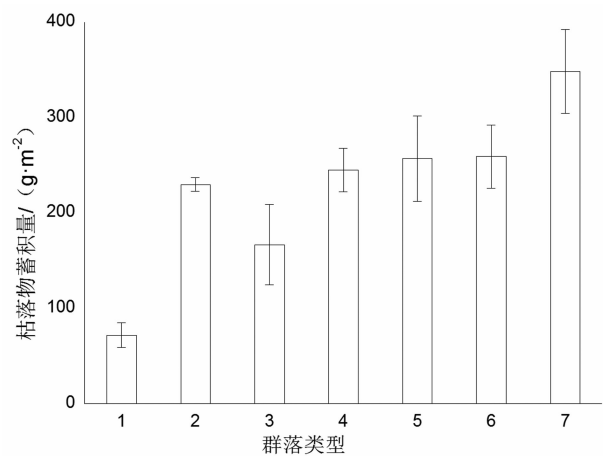


图4 群落植被枯落物蓄积量随演替过程的变化趋势

Fig. 4 The changes of litter accumulation with succession process

$$LAA = 1.35AB - 26.11 \quad (6)$$

式中: $LAA$  是枯落物蓄积量( $\text{g}/\text{m}^2$ ), $AB$  是地上生物量( $\text{g}/\text{m}^2$ )。方程 $R^2=0.83$ ,说明枯落物蓄积量与地上生物量具有较高的相关性,枯落物蓄积有利于提高土壤养分含量,且增加土壤养分利用速率。

坡体植被根系可以提高土壤的抗剪强度,促进叶片蒸腾作用,加快地下水的排泄,具有固土护坡的功效。随着土层深度的增加,植被地下生物量呈下降趋势(图5),而猪毛蒿+茭蒿群落地下生物量呈先减少、后增加、再减少的趋势,这可能是该滑坡堆积体滑坡年限较短,堆积物较少所致。各样地0~40 cm土层根系占64%~95%,说明植被根系主要分布在土壤表层。随着演替年限的增加,除野菊花+早熟禾群落外,表层地下生物量呈增加的趋势。方差分析显示不同样地间0~40 cm土层的地下生物量差异极其显著( $P<0.001$ ),说明随着植被演替年限的增加,植物地下生物量显著增加,且表层和深层地下生物量差异逐渐明显。

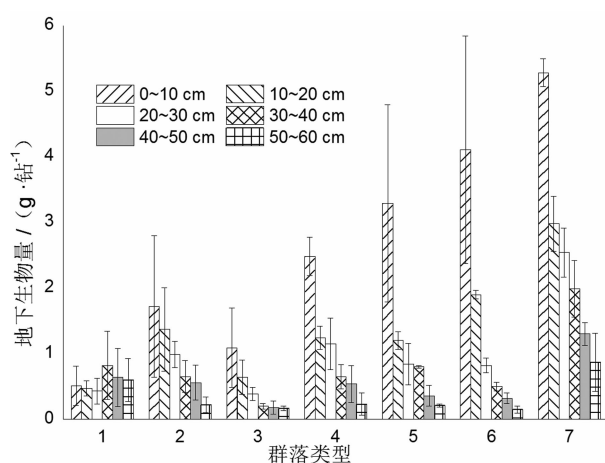


图5 群落植被地下生物量随演替过程的变化趋势

Fig.5 The changes of underground biomass with succession process

### 3.2 土壤养分对植物群落演替的响应

在土壤-植被系统中,土壤为植物的生长发育提供水分和营养物质,同时植被的演替也可以改变土壤理化性质,促进土壤养分循环。由于不同植物群落枯落物蓄积量、地下生物量和土壤水分状况等因子存在差异,所以枯落物和根系受微生物分解后释放到土壤中的营养物质含量不同,而且植物根系对土壤元素的吸收、分配能力不同,导致不同植物群落土壤养分含量存在差异。

有机质是土壤养分的主要来源,能促进土壤结

构的形成,调节土壤水热状况,改善土壤理化性质。土壤有机质含量随着土层深度的增加而降低,而且演替后期土层间的差异更明显(图6),这可能与群落植物根系垂直分布的差异有关。除野菊花+早熟禾群落外,随着植被演替年限的增加,表层土壤有机质含量呈先增加、后降低、再增加的趋势,这可能是由于演替初期地表枯落物和根系的增加使得土壤有机质含量增加,随着演替的进行,植被对土壤有机质消耗量超过积累量,使有机质含量降低;随着植被演替的进行,土壤有机质积累量大于消耗量,土壤有机质含量增加。下层土壤的有机质含量变化不明显,这可能是植被根系和枯落物对下层土壤影响较小所致。与对照相比,其他样地表层土壤有机质含量有所降低,但不同样地同一土壤养分含量的降幅存在差异。不同样地土壤有机质含量均很低,一方面是由于滑坡过程扰动地表,改变了坡面微地貌,导致大量富含有机质的表土流失;另一方面是因为滑坡迹地土壤骨性物质增加,土壤通气性增强,提高了土壤好氧微生物活性,从而有机质分解速率加快,导致有机质含量降低。

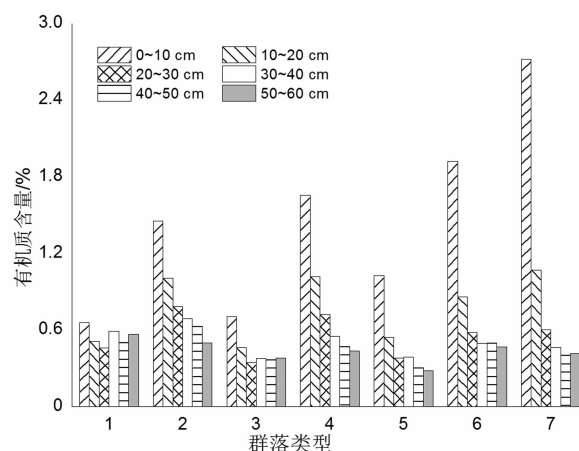


图6 土壤有机质含量随演替过程的变化趋势

Fig.6 The changes of soil organic matter with succession process

土壤全氮含量反映了土壤氮素总量,是土壤速效氮的源和库,主要受地上、地下生物量的积累和有机质分解强度的影响<sup>[23]</sup>。全氮含量随着土层深度的增加而降低(图7),这可能是土壤形成过程中氮素向土壤表层积累所致,与对照组相比,其他样地表层土壤全氮含量均有所降低。由于土壤表层大约80%~97%的氮素存在于有机质中,所以全氮和有机质含量的变化规律基本一致。对土壤全氮含量和

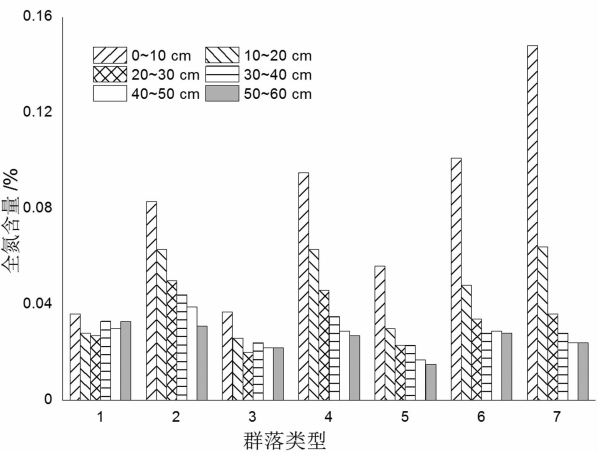


图7 土壤全氮含量随演替过程的变化趋势  
Fig.7 The changes of total nitrogen with succession process

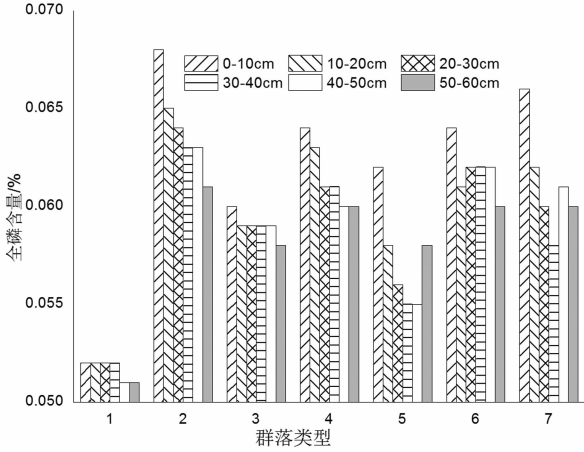


图8 土壤全磷含量随演替过程的变化趋势  
Fig.8 The changes of total phosphorus with succession process

土壤有机质含量做回归分析显示,土壤全氮含量与土壤有机质含量的关系可以由以下方程拟合:

$$TNC = 0.061OMC - 0.011 \quad (7)$$

式中:*TNC* 是全氮含量(%),*OMC* 是有机质含量(%),方程  $R^2 = 0.98$ 。说明土壤全氮含量与有机质含量具有极高的相关性,有机质的积累和分解对土壤氮素含量的变化有显著的影响。

土壤全磷是指土壤中各种形态磷素的组合。随着土层深度的增加,土壤全磷含量基本呈降低的趋势(图8),这可能是因为植物根系吸收下层土壤磷素,通过富集迁移作用累积在土壤表面,而且磷素迁移率小,不易从土壤表层向下层淋溶迁移,使得表层土壤磷素含量较高。各样地磷素含量均很低,这可能是研究区土壤为黄绵土,富含碳酸盐类物质,磷素含量小,而且植物群落演替较慢,植物对样地土壤磷素的补充较慢所致。除了猪毛蒿+茼蒿群落外,与

对照组相比,其他样地表层土壤全磷含量均有所降低,但差异很小,这说明全磷含量主要受黄土母质的影响,植物演替对其影响不显著。

3.3 植被特征和土壤养分指标相关性分析

不同浅层滑坡堆积体上植被特征和土壤养分参数相关性分析结果如表2所示,地上生物量、枯落物蓄积量和地下生物量与植被盖度呈显著正相关关系。经分析发现,样地0~60 cm 土壤全氮、全磷和有机质含量与植被特征参数的相关性不显著,进一步分析发现,0~10 cm 土层土壤全氮、有机质含量分别与植被盖度、地上生物量、枯落物蓄积量和地下生物量呈显著正相关关系,这表明根系和枯落物对土壤养分的影响主要集中于表层,对下层土壤养分的影响不明显,这可能与根系和枯落物分布位置有关。全磷含量仅与枯落物蓄积量呈显著正相关关系,与其他植被特征因子无显著相关关系。

表2 不同群落各指标相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between different indices of different communities

参数	盖度	地上生物量	枯落物蓄积量	根系生物量	全氮含量	全磷含量	有机质含量
盖度	1						
地上生物量	0.98**	1					
枯落物蓄积量	0.90**	0.94**	1				
根系生物量	0.78*	0.79*	0.85*	1			
全氮含量	0.77*	0.79*	0.86*	0.92**	1		
全磷含量	0.62	0.72	0.84*	0.53	0.71	1	
有机质含量	0.78*	0.80*	0.86*	0.93**	0.99**	0.69	1

注:\*\* 指在 0.01 水平上显著相关,\* 指在 0.05 水平上显著相关。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

野外调查结果显示,浅层滑坡堆积体植被恢复初期禾本科和菊科植物占主导地位,这与李丹雄等<sup>[3]</sup>、崔艳红等<sup>[4]</sup>在汶川地震后滑坡体上研究结果一致。这可能是由于滑坡初期,浅层滑坡堆积体土壤养分较少,土壤保水保肥性能差,而禾本科和菊科植物具有耐旱耐贫瘠的特点,是典型的先锋植物物种,对受损后植被的恢复和延续具有重要的作用。植被多样性的研究有利于预测植物群落的演替方向和群落稳定性,是研究受损生态系统重建的重要内容。对照样地是未发生滑坡的坡面,植物群落接近研究区的顶级群落,所以群落物种丰富度相比其他样地有所降低。不同演替阶段群落物种多有重复,植被群落表现出相似性和递进性,表明群落演替具有强烈和明显的方向性,这与白文娟等<sup>[24]</sup>在黄土丘陵沟壑区退耕地上的研究结论一致。

随着演替年限的增加,Simpson 优势度指数  $D$  和 Margalef 丰富度指数  $M_a$  呈先减小,再增加,再减小的趋势,这与张继强等<sup>[6]</sup>在甘肃陇南地震滑坡体的研究结果一致。Shannon-wiener 多样性指数  $H'$  和 Pielou 均匀度指数  $J_p$  呈先增加,再减小,再增加的趋势,这与师阳阳等<sup>[18]</sup>在黄土丘陵区退耕地的研究结果一致。刘守江等<sup>[5]</sup>在汶川地震非规范滑坡体上调查植被恢复时发现,非规范滑坡体上植被平均生物量高达  $970 \text{ g/m}^2$ ,而本研究各浅层滑坡堆积体上植被平均生物量均低于  $300 \text{ g/m}^2$ ,这说明黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体上植被演替较为缓慢,这一差异与研究区的气候特征也有密切关系。Chou 等<sup>[25]</sup>研究发现,台湾地震6年后滑坡体植被覆盖率达到86%,远高于本研究各浅层滑坡堆积体上植被覆盖率,这一差异可能是由两地气候、地形、土壤等条件的差异所致。单因素方差分析显示,不同演替年限群落的枯落物蓄积量不存在显著差异( $P > 0.05$ ),而且枯落物蓄积量均不高,这可能是由于研究样地都处于阳坡,微生物活动频繁,枯落物分解较快;而且植物样品采集时正是植物生长旺盛时期,还未到枯落物凋落盛期所致。各样地植物根系主要集中在表层  $0 \sim 40 \text{ cm}$ ,这与师阳阳等<sup>[16]</sup>、李鹏等<sup>[26]</sup>研究结果一致,分布在表层的根系和枯落物可

以增强土壤抗蚀性能,具有较好的水保效益。

不同浅层滑坡堆积体上土壤有机质和全氮含量随着植被演替而呈现增加的趋势,说明植被恢复对土壤有机质和全氮含量具有明显的累积作用,而且植被的存在也在很大程度上抑制了坡体养分的流失,有利于土壤养分的保持。而且表层土壤有机质和全氮含量变异程度远大于下层,这可能与土壤表层不仅受根系生长发育的影响,同时还受枯落物分解及外界环境条件的影响有关。各样地间土壤全磷含量没有明显差异,但随着土层深度的增大而减小。猪毛蒿+芨芨草群落全磷含量特别少,具体原因尚不清楚,有待进一步调查。

由于本研究中取样调查点有限,仅选取纸坊沟小流域6处典型滑坡堆积体做为研究样地,因此研究结果可能比较片面;公式(6)和(7)仅适用于本研究区,不能外推到黄土丘陵沟壑区其他小流域,今后应在更大尺度上开展相关研究,取得更为普适性的研究成果。

### 4.2 结论

(1)浅层滑坡堆积体植被恢复过程中,菊科和禾本科植物占主导地位,植被演替过程中植被类型表现出较强的相似性和递进性,说明在气候干旱、地形复杂、生态环境脆弱的黄土丘陵沟壑区,浅层滑坡堆积体上植被演替是一个较为缓慢的过程。

(2)随着植被演替年限的增加,Simpson 多样性指数  $D$  和 Margalef 丰富度指数  $M_a$  呈减小—增加—减小的趋势,Shannon-wiener 多样性指数  $H'$  和 Pielou 均匀度指数  $J_p$  呈增加—减小—增加的趋势;植被盖度、地上生物量和枯落物蓄积量大致呈增加的趋势。与对照相比,演替初期植被盖度差异显著( $P < 0.05$ ),地上生物量和枯落物蓄积量无明显差异( $P > 0.05$ )。

(3)土壤有机质、全氮含量呈增加—降低—增加趋势,与对照相比,浅层滑坡堆积体样地表层土壤有机质、全氮和全磷含量均有所降低。表层土壤全氮、有机质含量与植物盖度、地上地下生物量和枯落物蓄积量均呈显著正相关关系,全磷含量仅与枯落物蓄积量呈正相关关系。

## 参考文献(References)

- [1] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京:地质出版社, 2001:1-56 [LEI Xiangyi. Geo-hazards in loess plateau and human activity[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001:]

- 1-56]
- [2] 黄细超,任光明,周纵横,等. 浅层滑坡中的地下水作用机理及治理方法概述[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, **14**(5): 181-188 [HUANG Xichao, REN Guangming, ZHOU Zongheng, et al. The mechanism of groundwater in the shallow landslide and the governance method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, **14**(5): 181-188]
- [3] 李丹雄,杨建英,史常青,等. 汶川地震滑坡迹地植被恢复中优势种的种间关联性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(5): 938-943 [LI Danxiong, YANG Jianying, SHI Changqing, et al. Interspecific association of dominant species in the vegetation recovery process after landslide of Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, **20**(5): 938-943]
- [4] 崔艳红,史常青,孙丽文,等. 5·12 地震后北川次生灾害迹地植被的自然恢复与更新[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(2): 219-226 [CUI Yanhong, SHI Changqing, SUN Liwen, et al. 5·12 Vegetation restoration and regeneration of the secondary disaster area in Beichuan after the May 12, 2008 earthquake [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, **35**(2): 219-226]
- [5] 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 Shoujiang, ZHANG Bin, YANG Qingwei, et al. Study on the natural restoration capacity of vegetation on the non-standard landslide in Wenchuan earthquake-taking the landslide of Xiejiadian in Yinchanggou, Pengzhou as an example [J]. Mountain Research, 2010, **28**(3): 373-378]
- [6] 张继强,王晶绘,王三英,等. 甘肃陇南地震滑坡体自然恢复 5a 后植被群落分布特征[J]. 干旱区地理, 2015, **38**(3): 592-598 [ZHANG Jiqiang, WANG Jinghui, WANG Sanying, et al. Distribution characteristics of vegetation community after five year natural restoration on earthquake-induced landslide at Longnan in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2015, **38**(3): 592-598]
- [7] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系——以富县“7·21”特大暴雨为例[J]. 生态学报, 2016, **36**(15): 4635-4643 [HAN Yong, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziowuling forest area: a case study of the “7·21” disaster in Fuxian County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(15): 4635-4643]
- [8] LIANG Jian, WANG Xiaolan, YU Zhongdong, et al. Effects of vegetation succession on Soil fertility within Farming-Plantation ecotone in Ziowuling Mountains of the loess Plateau in China [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, **9**(10): 1481-1491
- [9] FRANSEN B, DE KROON H, BERENDSE F. Soil nutrient heterogeneity alters competition between two perennial grass species [J]. Ecology, 2001, **82**(9): 2534-2546
- [10] 阿守珍,卜耀军,温仲明,等. 黄土丘陵区不同植被类型土壤养分效应研究——以安塞纸房沟流域为例[J]. 西北林学院学报, 2006, **21**(6): 58-62.
- [11] 麦积山,赵廷宁,郑江坤,等. 北川震后滑坡体表层土壤养分的空间变化[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(12): 3588-3594 [MAI Jishan, ZHAO Tingning, ZHENG Jiangkun, et al. Spatial variability of surface soil nutrients in the landslide area of Beichuan County, Southwest China, after 5·12 Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(12): 3588-3594]
- [12] 吴聪,王金牛,卢涛,等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18**(6): 911-916 [WU Cong, WANG Jinniu, LU Tao, et al. Effect of Wenchuan earthquake on Soil physical and chemical properties of the Longmen Mountain, Southwestern China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2012, **18**(6): 911-916]
- [13] 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
- [14] 王国梁,刘国彬,刘芳. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被特点与生态交错带效应[J]. 西北植物学报, 2002, **22**(5): 1102-1108 [WANG Guoliang, LIU Guobin, LIU Fang. The vegetative characteristics and ecotone effect of Zhifanggou watershed in Loess Hilly region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, **22**(5): 1102-1108]
- [15] 王国梁,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, **22**(1): 1-5 [WANG Guoliang, LIU Guobin, XU Mingxiang. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, **22**(1): 1-5]
- [16] 师阳阳,张光辉,陈云明,等. 黄土丘陵区不同退耕模式林下草本变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, **10**(5): 64-70 [SHI Yangyang, ZHANG Guanghui, CHEN Yunming, et al. Characteristics of undergrowth herbage of different restoration models in the Loess Hilly Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, **10**(5): 64-70]
- [17] WANG Hao, ZHANG Guanghui, LI Ningning, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2018, **325**: 18-27
- [18] 师阳阳,陈云明,张光辉,等. 不同退耕年限撂荒地植物多样性及生物量分析[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(6): 36-40 [SHI Yangyang, CHEN Yunming, ZHANG Guanghui, et al. Investigation into the species diversity and biomass of plants in the abandoned farmlands with different restoration years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, **19**(6): 36-40]
- [19] 贾燕锋,焦菊英,张振国,等. 黄土丘陵区沟壑区沟沿线边缘植被特征初步研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, **5**(4): 39-43 [JIA Yanfeng, JIAO Juying, ZHANG Zhenguo, et al. Primary study of the vegetation characters of the margin between gully and

- inter-gully on hilly-gullied Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 2007, **5**(4): 39–43]
- [20] WANG GL, LIU GB, HOU XL. The research of species diversity after the vegetation restoration in Loess hilly region[J]. Journal of Mountain Research, 2002, **20**(2): 182–187
- [21] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J]. 地球科学进展, 2003, **18**(1): 85–93 [ZHANG Yunxia, LI Xiaobing, CHEN Yunhao. Overview of field and multi-scale remote sensing measurement approaches to grassland vegetation coverage[J]. Advances in Earth Science, 2003, **18**(1): 85–93]
- [22] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, **34**(14): 3807–3819 [LI Qiang, ZHOU Daowei, CHEN Xiaoying. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(14): 3807–3819]
- [23] 王百群, 刘国彬. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(2): 19–23 [WANG Baiqun, LIU Guobin. Effects of relief on Soil nutrient losses in sloping fields in hilly region of loess plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1999(2): 19–23]
- [24] 白文娟, 焦菊英, 马祥华, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(7): 1317–1322 [BAI Wenjuan, JIAO Juying, MA Xianghua, et al. Classification and sorting of natural restoration of plant communities in loess hilly and gully region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, **25**(7): 1317–1322]
- [25] CHOU W C, LIN W T, LIN Chaoyuan. Vegetation recovery patterns assessment at landslides caused by catastrophic earthquake: A case study in central Taiwan[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **152**(1/4): 245–257
- [26] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(5): 849–853 [LI Peng, LI Zhanbin, TAN Taizhan. Dynamic distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(5): 849–853]

## Properties of Vegetation Succession on Shallow Landslide Deposits in Loess Hilly and Gully Region and the Related Response of Soil Nutrient

LI Ningning<sup>1</sup>, ZHANG Guanghui<sup>1,2,\*</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, ZHANG Baojun<sup>3</sup>, YANG Hanyue<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875 China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing, 100875 China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** In order to demonstrate the vegetation succession characteristics and its effects on soil nutrients, six vegetation communities with different succession ages were selected as research subjects, which were *Artemisia scoparia* + *Artemisia giraldii*, *mother chrysanthemum* + *Poa annua*, *Periploca sepium Bunge* + *Artemisia scoparia*, *Artemisia vestita* + *Lespedeza daurica* + *Poa annua*, *Artemisia vestita* + *Poa annua*, and *Artemisia vestita* + *Lespedeza daurica*. As control group, the *Artemisia vestita* community with similar site conditions located on nearby hillslope without landslides was selected. The variations of vegetation diversity, coverage, aboveground and underground biomass, litter accumulation amount and soil nutrient indices such as organic matter, total nitrogen and phosphorus contents were measured through field investigation and laboratory tests. The correlations between vegetation characteristics and soil nutrient indices were also analyzed. The results showed: (1) Simpson's  $D$  and Margalef's  $M_a$  decreased, then increased, and finally decreased with vegetation succession age. However, Shannon-wiener's  $H'$  and Pielou's  $J_p$  changed oppositely with succession age. The vegetation coverage, aboveground and underground biomass, litter accumulation amount, soil organic matter and total nitrogen content of different communities increased with succession age. (2) Compared to control group, significant differences were detected

in vegetation coverage ( $P < 0.05$ ) and underground biomass ( $P < 0.001$ ) at the early succession stage, while no significant difference was found in aboveground biomass and litter accumulation amount. (3) Total nitrogen and organic matter content of top-soil layer (0 ~ 10 cm) were positively correlated to vegetation coverage, aboveground and underground biomass, and litter accumulation amount. Total phosphorus was only positively correlated to litter accumulation amount. The results of this study are helpful to understand the properties of vegetation succession and the corresponding soil nutrients response on shallow landslide deposits in Loess Hilly and Gully region, and give theoretical guidance for the management and ecological restoration of shallow landslide deposits in this region.

**Key words:** loess hilly and gully region; shallow landslide deposit; vegetation succession characteristic; soil nutrient

---

## 四川省盐源县玻璃村“7·19”特大滑坡全貌图

(伍康林 中国科学院水利部、成都山地灾害与环境研究所)

群测群防对我国的地质灾害易发区的灾害预警和避险起着重要作用。2018年7月19日四川省盐源县玻璃村突发特大土质滑坡,损毁房屋65户186间,造成直接经济损失1300万元。由于预警预报及时,区域内97户437人成功避险,无人员伤亡。滑坡是在区域脆弱地质环境背景,陡倾地形的影响下,降水和地表径流联合作用下,古滑坡堆积体复活的结果。滑坡堆积体存在转化为泥石流灾害的风险。盐源县玻璃村滑坡是典型的避险成功案例,县、乡、村、组4级监测网络的群测群防工作对此次成功的灾害避险起到重要作用,可为相似灾害的避险工作提供借鉴。

详见本期《四川省盐源县玻璃村“7·19”特大滑坡灾害应急科学调查》一文。