

灾害干扰受损区自然恢复初期土壤物理性质的变化特征

李松阳^{1,2,3}, 余杭^{1,2,3}, 罗清虎¹, 刘颖^{1,2,3},
贺静雯^{1,2,3}, 林勇明^{1,2,3}, 王道杰⁴, 李健^{1,3}

(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:以洪涝诱发灾害干扰受损区的次生阔叶林、杉木林和毛竹林为研究对象,研究了3种林型自然恢复过程中土壤容重、孔隙度和田间持水量等11项土壤物理性质指标的变化规律及主要影响因素。结果表明:(1)次生阔叶林和杉木林在未受损—刚受损—受损恢复过程中土壤容重先增大后减小,毛竹林逐渐减小;次生阔叶林和杉木林总孔隙度、含水率、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量先减小后增大,毛竹林逐渐减小;3种林型土壤质地先变粗后变细。(2)通过相关性分析和主成分分析,发现含水率、毛管持水量和田间持水量可作为评价灾害干扰受损区土壤物理性质恢复能力的主要指标。(3)通过主成分分析和因子分析得出,3种林型土壤抗蚀性在未受损—刚受损—受损恢复过程中先减小后增大,受损自然恢复状态土壤抗蚀性从大到小依次为杉木林、次生阔叶林、毛竹林。研究结果可为灾害干扰受损区土壤物理性质变化规律及土壤恢复机制提供理论依据。

关键词:洪涝;植被恢复;土壤物理性质;主成分分析;因子分析

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0162-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.023

Change Characteristics of Soil Physical Properties at the Initial Natural Recovery Stage in Disaster Disturbed and Damaged Areas

LI Songyang^{1,2,3}, YU Hang^{1,2,3}, LUO Qinghu¹, LIU Ying^{1,2,3},
HE Jingwen^{1,2,3}, LIN Yongming^{1,2,3}, WANG Daojie⁴, LI Jian^{1,3}

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; 2.Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 3.Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002; 4.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041)

Abstract: Taking the secondary broad-leaved forest, *Cunninghamia lanceolata* forest and *Phyllostachys heterocycla* forest in the flood disaster disturbed area as the research objects, the change characteristics and main influencing factors of 11 soil physical properties, including soil bulk density, porosity, field capacity and so on, in the process of natural restoration were analyzed. The results showed that: (1) During the process of undestroyed - destroyed - natural recovery, soil bulk density of secondary broad-leaved forest and *C. lanceolata* forest increased first and then decreased, while that of *P. heterocycla* forest decreased gradually. The total porosity, moisture content, saturated water-holding capacity, capillary water-holding capacity and field water-holding capacity of secondary broad-leaved forest and *C. lanceolata* forest decreased first and then increased, while those of the *P. heterocycla* forest gradually decreased. The soil texture of three forest types became coarse and then fine. (2) According to the results of correlation analysis and principal component analysis, moisture content, capillary water-holding capacity and field water-holding capacity could be used as the main indicators to evaluate the recovery capability of soil physical properties in the damaged area.

收稿日期:2020-02-29

资助项目: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项目(2019);福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)

第一作者:李松阳(1998-),男,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与生态恢复研究。E-mail:songyangli163@163.com

通信作者:林勇明(1982-),男,博士,副教授,主要从事区域资源优化、生态方面的研究。E-mail:monkey1422@163.com

(3) According to the results of principal component analysis and factor analysis, soil erosion resistance of three forest types decreased first and then increased in the process of undestroyed - destroyed - natural recovery, and the soil erosion resistance at the stage of natural recovery followed the order of *C. lanceolata* forest > secondary broad-leaved forest > *P. heterocycla* forest. This study provided a theoretical basis for the study of the change rules of soil physical properties and soil recovery mechanisms in the disaster disturbed area.

Keywords: flood; vegetation restoration; soil physical properties; principal component analysis; factor analysis

自工业革命以来,全球气候变化加剧,洪水、泥石流、滑坡等自然灾害频发。由于各类灾害强大的破坏力,导致受灾地区植被受损,进而造成土壤侵蚀,土壤结构和性质遭到破坏,生态环境随之恶化^[1-2]。土壤物理性质是土壤的基本性质之一^[3],主要包括土壤容重、土壤含水量、土壤孔隙度、土壤质地及土壤持水性等指标,不仅影响着土壤的通气、保水能力,而且与土壤肥力、土壤抗蚀性密切相关^[4],对植物的生长、发育和演替过程有着至关重要的作用^[5]。因此,研究植被恢复过程中土壤物理性质的变化,对评价植被恢复效果^[6]、探究不同植被类型及恢复措施对土壤质量的影响^[7]有着重要的理论意义。

在植物的生长过程中,植物根系的发育能够改变土壤结构,植物根系分泌物和凋落物也能对土壤起到改良作用^[8],因此植被自然恢复能够改善土壤的物理性质和土壤结构状况^[9],改良土壤质地,使土壤细颗粒含量增多^[10],提高土壤的持水能力和入渗性能^[11]。同时,植被自然恢复也可显著提高土壤抗冲性^[12]。与人工更新相比,自然恢复植被的土壤恢复程度要明显优于人工更新林^[13]。然而,前人^[8]研究多以单次分析为主,在未受损样地与自然恢复样地之间进行比较分析,缺乏对植被未受损—刚受损—自然恢复过程中土壤性质的动态变化研究,难以准确认识“植被—土壤”系统恢复过程的协同机制,亟待加强。

南平市地处福建省北部,山地面积 2.11 万 km², 约占福建省的 1/4,同时是福建省的主要林区,素有“绿色金库”之称。然而,南平市所处的闽北地区年降雨量大,暴雨多,降雨侵蚀力 *R* 值大^[14],是次生山地灾害高发区。2010 年 6 月,南平市发生特大洪水,诱发了一系列滑坡、泥石流等次生灾害^[15],导致当地森林大面积受损,生态系统遭到严重破坏。本文选取福建省南平市 3 种受灾害影响较为严重的林型(次生阔叶林、杉木林、毛竹林)作为研究对象,以未受损林型作为对照,采集未受损林型、刚受损林型和自然恢复 7 年的林型土壤样品进行物理性质分析,探究植被自然恢复过程中土壤物理性质的动态变化特征,评价不同植被类型土壤物理性质的恢复潜力,旨在加深对灾害干扰前后土壤物理性质变化过程的认识,为洪涝诱

发灾害干扰区的植被恢复和土壤性质改良提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省北部南平市延平区及顺昌县,武夷山北段东南侧(26°15′—28°19′N,117°00′—119°17′E),属亚热带季风湿润气候,年降水量 1 430~2 032 mm,年平均温度 17.9~21.2 °C,山地面积 2.11 万 km²,约占福建省面积的 1/4,具有以丘陵山地为主的低山区地貌特征,土壤类型以红黄壤为主。研究区拥有丰富的森林资源,森林覆盖率 78.29%(2019 年),是福建省主要林区之一。

2010 年 6 月 13—25 日,福建省南平市全市平均过程雨量达 556.9 mm,有 13 个站点雨量在 700 mm 以上,强降雨引发重大洪灾,林木受破坏面积达到 83.73 km²^[16],当地主要林型次生阔叶林、杉木林和毛竹林受损严重,森林被洪水及其引发的次生灾害(滑坡、泥石流等)摧毁,生态环境遭到严重破坏,造成了严重的水土流失。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取与土壤采集 2010 年 7 月洪涝灾害发生后,经实地考察,选取次生阔叶林、杉木林、毛竹林 3 种林型作为研究对象,设计 3 种状态:未受损样地、刚受损样地和自然恢复样地,在 2010 年 7 月和 2017 年 7 月分 2 次进行采样。本试验中 3 种林型的刚受损样地均位于滑坡体上,2010 年受灾害干扰,样地原始植被破坏殆尽,植被盖度较低,均低于 20%,残留植被主要有五节芒、小飞蓬(*Conyza canadensis* (L.) Cronq)等先锋植物,3 种林型的自然恢复样地均由 2010 年刚受损样地自然演替至 2017 年形成,刚受损样地与自然恢复样地为同一块地,仅采样时间不同。样地基本情况见表 1。

次生阔叶林样地位于延平区茫荡镇上瓦村,以酸性红黄壤为主。其中,未受损天然次生阔叶林自 1958 年起未经人为干扰,2017 年时现存植被呈多层次,乔木层第 1 亚层分布米槠(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay)、栲(*Castanopsis fargesii* Franch)等

壳斗科树种,第2亚层分布细柄阿丁枫(*Altingia gracilipes* Hieron)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst)等树种,第3亚层与灌木层混生,主要有米楮、小叶荩草和观音莲座蕨(*Angiopteris fokiensis* Hieron)等,植被盖度最高(88%);次生阔叶林受损自然恢复样地在2017年主要植被有福建酸竹(*Acidosasa longiligula* (Wen) C. S. Chao)、山麻杆(*Alchornea davidii* Franch)和铁芒萁等,植被盖度为60%。杉木林样地位于顺昌县元坑镇庄庄村,土壤为酸性红黄壤。2017年时未受损杉木林林龄22年,为杉木纯林,主要林下植被有霍香蓟(*Ageratum conyzoides* L)、杜荃山(*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi)和鸡血藤(*Spatholobus suberectus* Dunn)等,植被盖度约72%;杉木自然恢复样地在2017年主要植被有五节芒、山乌柏(*Sapium discolor* (Champ. ex Benth.) Muell. Arg)和盐肤木(*Rhus chinensis* Mill)等,植被盖度为52%。毛竹林样地位于延平区水南街道红星村立墩自然村,土壤以排水良好的酸性红黄壤为主,2017年时未受损样地林龄约16年,结构简单,林下灌丛分布较少,仅细齿柃木(*Eurya nitida*)、欏木(*Loropetalum chinense*)、高粱泡(*Rubus lambertianus* Ser)等零星分布,草本植物主要有小叶荩草(*Arthraxon lancifolius* (Trin.)

Hochst)、菝葜(*Smilax china*)和地念(*Melastoma dodecandrum*)等,植被盖度约65%;毛竹自然恢复样地主要植被有铁芒萁(*Dicranopteris linearis* (Burm.) Underw)、五节芒(*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut)和山苍子(*Litsea cubeba* (Lour.) Pers)等,植被盖度约35%。

在2010年7月和2017年7月初分2次进行取样,在2010年7月初次采样中对3种林型每种设置1个40 m×30 m的刚受损样地,分为上、中、下3个坡位,各坡位间隔10 m,在每个坡位随机选取3个取样点,样点之间间隔5 m。在刚受损样地附近设置面积相同、林型相同的未受到滑坡灾害影响的林地作为未受损样地,封禁但未采样,目的是最大限度地避免人为因素的干扰,从而保持与刚受损样地一致的演替时间。在每块样地的上、中、下坡位分别选取1个样点,挖取1份土壤样品(0—20 cm),即每个坡位3份土样,装入用记号笔标记好的自封袋中,并在每个取样点采3个100 cm³的环刀样,土样带回实验室风干并过2 mm筛供土壤颗粒含量分析,环刀样用以测量土壤物理性质。2017年7月初进行第2次采样,按照同样的方法在未受损样地上采样,并在原受损样地演替7年后再次采样作为受损后自然恢复的样品。所有样地共采取81个土样,81个环刀样本。

表1 样地基本概况

林型	林型状态	经度	纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	植被盖度/%
次生阔叶林	未受损	118°08'31"	26°41'42"	188	NW	36	88
	刚受损	118°08'35"	26°41'39"	173	NE	40	20
	自然恢复	118°08'35"	26°41'39"	173	NE	40	60
杉木林	未受损	117°39'44"	26°50'36"	238	NE	34	72
	刚受损	117°39'45"	26°50'33"	226	NE	32	10
	自然恢复	117°39'45"	26°50'33"	226	NE	32	52
毛竹林	未受损	118°15'05"	26°39'16"	365	NW	30	65
	刚受损	118°14'59"	26°39'23"	367	SE	43	3
	自然恢复	118°14'59"	26°39'23"	367	SE	43	35

1.2.2 土壤物理性质测定及分析 使用环刀法测定土壤容重、孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量^[17]。土壤颗粒分析使用中国科学院东川泥石流观测研究站的英国马尔文公司 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪。该仪器的测量范围为0.02~2 000 μm,遮光范围10%~20%,搅拌器速度为2 500 r/min。试验时,使用10%质量浓度的过氧化氢(H₂O₂)溶液除去样品中的有机质,之后加入10%质量浓度的盐酸(HCl)并煮沸除去碳酸盐;用浓度为0.1 mol/L的六偏磷酸钠(Na₆O₁₈P₆)分散剂并用超声波清洗机振

荡,用激光粒度分析仪进行土壤粒度百分比测量。土壤粒径分级标准采用美国制分级标准^[18]方法。

1.2.3 数据处理与评价方法 使用 Excel 2018 进行数据处理和图表绘制,使用 SPSS 23 进行显著性、相关性分析和主成分分析。主要采用容重、含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、黏粒、粉粒、砂粒等11个指标作为土壤物理性质评价指标,使用主成分分析法建立土壤物理性质得分评价体系,得出综合线性方程表达式,计算主成分得分后,按照综合得分大小进行排序,

通过综合得分结果评价土壤物理性质情况。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质变化分析

2.1.1 土壤容重及孔隙度分析 本研究分析了研究区次生阔叶林、杉木林、毛竹林3种林型的土壤物理性质。由表2可知,研究区土壤容重在灾害干扰恢复过程中介于 $1.02\sim 1.42\text{ g/cm}^3$,不同林型之间以及同一林型不同受损状态下均有明显差异。未受损状态下,杉木林容重显著大于其他林型($P<0.05$),次生阔叶林和毛竹林之间差异不显著。刚受损状态下,次生阔叶林和杉木林容重较未受损状态显著增大,分别增大36.27%和12.70%,毛竹林则减小2.68%。在刚受损状态,毛竹林容重显著小于次生阔叶林和杉木林,次生阔叶林和杉木林无显著差异。自然恢复状态下,次生阔叶林和杉木林容重较刚受损状态分别减小3.60%和13.38%,毛竹林容重显著增大,增大22.94%,其中杉木林容重显著小于其他林型。

不同林型样地的土壤孔隙度变化也存在一定规律,3种林型遭受灾害干扰后土壤总孔隙度和毛管孔隙度均减小,经过自然恢复后,自然恢复状态次生阔叶林和杉木林总孔隙度较刚受损时显著增大($P<0.05$),毛竹林显著减小;毛管孔隙度3种林型均显著增大。3种林型非毛管孔隙度变化过程与毛管孔隙度相反。毛竹林总孔隙度在刚受损状态显著大于次生阔叶林和杉木林,在受损恢复状态显著小于次生阔叶林和杉木林。

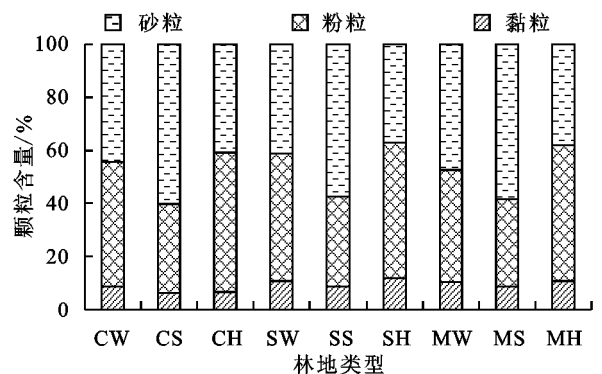
表2 不同林型土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度

指标	林型状态	次生阔叶林	杉木林	毛竹林
容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	未受损	$1.02\pm 0.05\text{Bb}$	$1.26\pm 0.02\text{Ba}$	$1.12\pm 0.04\text{Bb}$
	刚受损	$1.39\pm 0.03\text{Aa}$	$1.42\pm 0.03\text{Aa}$	$1.09\pm 0.02\text{Bb}$
	自然恢复	$1.34\pm 0.05\text{Aa}$	$1.23\pm 0.04\text{Bb}$	$1.34\pm 0.03\text{Aa}$
总孔隙度/%	未受损	$58.84\pm 2.05\text{Aa}$	$49.71\pm 1.10\text{Bb}$	$50.10\pm 1.29\text{Aa}$
	刚受损	$40.81\pm 0.83\text{Bb}$	$43.33\pm 1.35\text{Bb}$	$49.78\pm 1.43\text{Aa}$
	自然恢复	$50.96\pm 1.72\text{Ca}$	$49.93\pm 2.16\text{Aa}$	$41.52\pm 1.36\text{Bb}$
毛管孔隙度/%	未受损	$38.24\pm 1.81\text{Aa}$	$40.45\pm 0.81\text{Aa}$	$38.68\pm 1.01\text{Aa}$
	刚受损	$30.49\pm 0.94\text{Ba}$	$32.35\pm 1.38\text{Ba}$	$31.66\pm 0.75\text{Ba}$
	自然恢复	$39.06\pm 1.34\text{Aa}$	$38.15\pm 1.90\text{Aa}$	$35.40\pm 1.39\text{Ca}$
非毛管孔隙度/%	未受损	$20.60\pm 1.68\text{Aa}$	$9.26\pm 1.05\text{Ab}$	$11.42\pm 1.55\text{Bb}$
	刚受损	$10.32\pm 1.41\text{Bb}$	$10.98\pm 1.04\text{Ab}$	$18.12\pm 1.79\text{Aa}$
	自然恢复	$11.90\pm 1.59\text{Ba}$	$11.79\pm 1.27\text{Aa}$	$6.12\pm 1.63\text{Cb}$

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同大写字母表示同一林型不同受损状态间差异显著($P<0.05$);同行不同小写字母表示相同受损状态不同林型间差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 土壤质地 由图1可知,次生阔叶林、杉木林、毛竹林在不同受损状态下,砂粒($50\sim 2\,000\ \mu\text{m}$)

含量最大,占比36.88%~60.21%;其次为粉粒($2\sim 50\ \mu\text{m}$)含量,占比35.14%~53.99%;黏粒($<2\ \mu\text{m}$)含量最小,占比6.34%~11.86%。黏粒和粉粒含量在未受损—刚受损—自然恢复状态变化过程中,均呈现先减小后增大的趋势,砂粒含量则相反。不同林型土壤质地的自然恢复能力有所不同,自然恢复状态与刚受损状态相比,次生阔叶林黏粒、粉粒含量分别增大了4.41%和49.89%,砂粒含量减小了32.39%;杉木林黏粒、粉粒含量分别增大了39.20%和42.48%,砂粒含量减小了28.34%;毛竹林黏粒、粉粒含量分别增大了26.08%和53.29%,砂粒含量减小了35.10%。根据美国制土壤质地分类表^[18],本研究样地土壤质地类型为粉砂壤土。



注: CW为次生阔叶林未受损; CS为次生阔叶林刚受损; CH为次生阔叶林自然恢复; SW为杉木林未受损; SS为杉木林刚受损; SH为杉木林自然恢复; MW为毛竹林未受损; MS为毛竹林刚受损; MH为毛竹林自然恢复。下同。

图1 不同林型土壤粒径分布

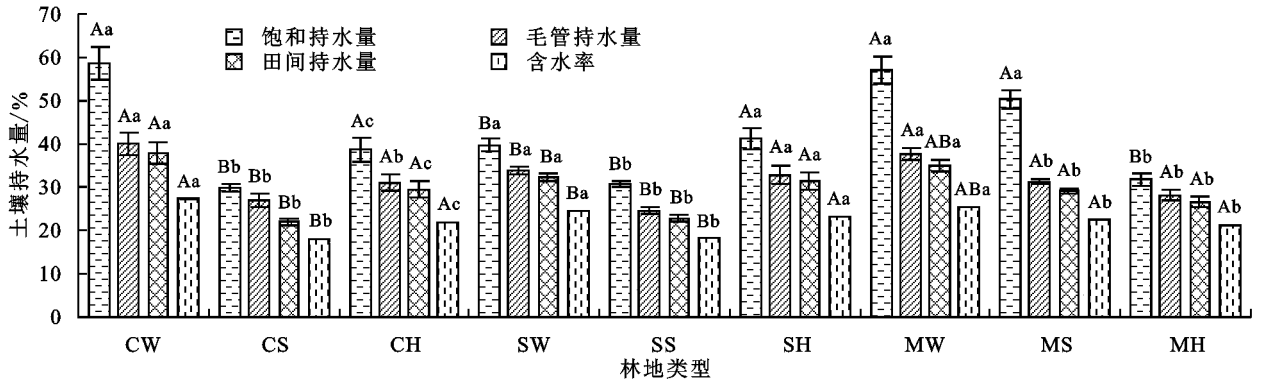
2.1.3 土壤含水率和持水性 由图2可知,灾害干扰不同阶段土壤含水率和持水性有所不同。次生阔叶林和杉木林样地土壤含水率、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量在未受损—刚受损—自然恢复过程中先减小后增大,毛竹林样地则不断减小。各林型自然恢复状态的土壤含水率、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量都表现为杉木林>次生阔叶林>毛竹林,3种林型的毛管持水量和田间持水量无显著差异,毛竹林饱和持水量显著小于次生阔叶林样地和杉木林样地($P<0.05$)。

2.2 土壤物理性质相关性分析

由表3可知,容重和黏粒、粉粒含量呈负相关,与砂粒含量呈正相关,但相关性未达到显著水平,除与毛管孔隙度未达到显著水平外,容重与其他土壤物理性质均呈极显著负相关关系($P<0.01$)。土壤含水率除与黏粒含量显著正相关($P<0.05$),与砂粒含量呈极显著负相关外,与其他指标均呈极显著正相关。除容重和土壤质地外,饱和持水量、毛管持水量与其

他土壤物理性质呈极显著正相关关系。田间持水量与容重和砂粒含量呈极显著负相关关系,和其他土壤物理性质呈显著及极显著正相关关系。总孔隙度和毛管孔隙度与容重呈负相关,与含水率、饱和持水量、

毛管持水量、田间持水量均呈极显著正相关。除容重和非毛管孔隙度外,黏粒、粉粒含量与大多数土壤物理性质呈正相关关系,而砂粒含量与容重和非毛管孔隙度呈正相关关系,和其他物理性质呈负相关关系。



注:图柱上方不同大写字母表示相同受损状态不同林型之间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同种林型不同受损状态之间的差异显著($P < 0.05$)。

图 2 不同林型土壤含水率和持水性

表 3 土壤物理性质相关性矩阵

指标	BD	SC	SWC	CWC	FC	TP	CP	NCP	黏粉	粉粒	砂粒
BD	1.000										
SC	-0.719**	1.000									
SWC	-0.856**	0.766**	1.000								
CWC	-0.756**	0.910**	0.810**	1.000							
FC	-0.753**	0.943**	0.815**	0.972**	1.000						
TP	-0.676**	0.801**	0.763**	0.777**	0.810**	1.000					
CP	-0.166	0.717**	0.379**	0.707**	0.760**	0.549**	1.000				
NCP	-0.644**	0.313**	0.561**	0.293**	0.286**	0.690**	-0.226*	1.000			
黏粒	-0.150	0.233*	0.121	0.148	0.226*	0.127	0.252*	-0.141	1.000		
粉粒	-0.040	0.367**	0.047	0.259*	0.348**	0.269*	0.525**	-0.141	0.449**	1.000	
沙粒	0.050	-0.371**	-0.064	-0.257*	-0.356**	-0.274*	-0.535**	0.143	-0.582**	-0.979**	1.000

注:BD 为容重;SC 为含水率;SWC 为饱和持水量;CWC 为毛管持水量;FC 为田间持水量;TP 为总孔隙度;CP 为毛管孔隙度;NCP 为非毛管孔隙度;** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.3 不同植被类型土壤抗蚀性主成分分析

选取容重、含水率、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量等 11 个指标进行主成分分析,分别标记为 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, 11)$ 。表 4 为经主成分分析得出的总方差分析结果,由表 4 可知,第 1 主成分方差贡献率最大(43.02%),对土壤物

理性质恢复的影响明显;第 2 主成分(22.96%)和第 3 主成分(22.00%)方差贡献率次之,对土壤物理性质恢复的影响较小。由于提取得到的 3 个主成分特征根均大于 1,且累积方差贡献率为 87.98% > 85%,达到主成分分析的要求,因此可以用前 3 个主成分反映研究区不同植被类型下土壤物理性质的恢复能力。

表 4 总方差分析结果

主成份	提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	5.974	54.31	54.31	4.732	43.02	43.02
2	2.602	23.65	77.96	2.525	22.96	65.98
3	1.102	10.02	87.98	2.420	22.00	87.98

经主成分方差分析后,得到的因子载荷未出现明显差异,因此,使用最大方差法对因子载荷进行旋转,得到表 5。由各主成分贡献率和旋转后的因子载荷可知,表征研究区土壤物理性质恢复能力的最适指标

分别为含水率、毛管持水量、田间持水量。

主成分分析还得出各主成分与因子之间的得分系数,由表 5 可得出,主成分 1,2,3 的线性表达式:
 $F_1 = -0.015X_1 + 0.205X_2 + 0.110X_3 + 0.252X_4 +$

$$0.232X_5 + 0.077X_6 + 0.32X_7 - 0.187X_8 -$$

$$0.180X_9 - 0.05X_{10} + 0.074X_{11}$$

$$F_2 = -0.008X_1 - 0.017X_2 - 0.059X_3 - 0.096X_4 -$$

$$0.044X_5 + 0.037X_6 - 0.044X_7 + 0.081X_8 +$$

$$0.406X_9 - 0.377X_{10} - 0.412X_{11}$$

$$F_3 = -0.29X_1 - 0.033X_2 + 0.163X_3 - 0.077X_4 -$$

$$0.061X_5 + 0.175X_6 - 0.367X_7 + 0.522X_8 +$$

$$0.204X_9 - 0.005X_{10} - 0.026X_{11}$$

由表4可知,主成分1,2,3的方差累积贡献率为87.98%,主成分1,2,3的方差贡献率分别为43.02%,22.96%,22.00%,因此3个主成分占方差累积贡献率的比重分别为48.90%,26.10%,25.01%。因此,土壤物理性质恢复能力的综合线性表达式为: $F_{\text{综}} = 0.4890F_1 + 0.2610F_2 + 0.2501F_3$ 。

表5 主成分因子载荷矩阵及得分系数矩阵

指标	旋转后主成份载荷			旋转后得分系数		
	1	2	3	1	2	3
X_1	-0.789	0.434	0.218	-0.015	-0.008	-0.290
X_2	0.948	0.012	0.149	0.205	-0.017	-0.033
X_3	0.848	-0.380	-0.030	0.110	-0.059	0.163
X_4	0.937	-0.086	0.254	0.252	-0.096	-0.077
X_5	0.971	-0.001	0.200	0.232	-0.044	-0.061
X_6	0.886	-0.197	-0.112	0.077	0.037	0.175
X_7	0.694	0.473	0.484	0.320	-0.044	-0.367
X_8	0.431	-0.640	-0.549	-0.187	0.081	0.522
X_9	0.302	0.532	-0.486	-0.180	0.406	0.204
X_{10}	0.423	0.795	-0.237	-0.050	0.377	-0.005
X_{11}	-0.437	-0.821	0.294	0.074	-0.412	-0.026

通过线性加权求和得到3种林型不同受损状态土壤抗蚀性综合指数见表6,综合指数越大,说明土壤抗蚀性越强。由表6可知,3种林型未受损—刚受损—受损恢复状态土壤抗蚀性先减小后增大,其中杉木林自然恢复状态土壤抗蚀性大于未受损状态。3种林型自然恢复状态综合指数排名为杉木林>次生阔叶林林>毛竹林,因此不同林型类型自然恢复状态土壤抗蚀性排名为杉木林>次生阔叶林林>毛竹林。

表6 不同林型土壤抗蚀性综合指数

林型	林型状态	第1主成分	第2主成分	第3主成分	综合主成分	排名
		F_1	F_2	F_3	$F_{\text{综}}$	
次生阔叶林	未受损	1.039	-0.264	1.184	0.735	1
	刚受损	-0.757	-0.338	-0.324	-0.539	8
	自然恢复	0.269	-0.487	-0.605	-0.147	6
杉木林	未受损	0.083	0.263	-0.335	0.026	5
	刚受损	-0.788	-0.078	-0.561	-0.546	9
	自然恢复	0.153	0.506	-0.016	0.203	3
毛竹林	未受损	0.854	0.034	0.156	0.466	2
	刚受损	-0.255	0.050	1.217	0.193	4
	自然恢复	-0.599	0.314	-0.716	-0.390	7

3 讨论

植被恢复对土壤性状产生影响,不同植被类型对土壤物理性质的影响存在差异^[19]。土壤容重和孔隙度反映了土壤的结构和通气透水能力,本研究中,次生阔叶林和杉木林未受损—刚受损—自然恢复状态变化过程土壤容重先增大后减小,总孔隙度先减小后增大;毛竹林土壤容重逐渐增大,总孔隙度逐渐减小。说明次生阔叶林和杉木林自然恢复过程改善了土壤的通气透水能力,这与朱万泽等^[20]的研究结论一致。毛竹林的土壤容重、孔隙度和持水性变化特征和其他2种林型的不同,可能与毛竹林受损方式及灾害干扰受损后植被盖度的变化有关。首先,毛竹林受滑坡影响后,以倒木形式与结构受破坏的土壤混合形成松散堆积物,造成其容重较未受损时无显著差异,但在随后的水力侵蚀及重力沉积作用下,松散堆积物变得紧实,自然恢复7年后土壤容重反而加大;此外,植被盖度对土壤侵蚀影响显著,植被盖度越低,土壤侵蚀模数越大^[21],本研究中毛竹林受损时植被盖度仅为3%,且自然恢复7年后植被盖度仅为35%,远小于次生阔叶林的60%和杉木林的52%,因此毛竹林土壤更易受到侵蚀,造成土壤容重增大,孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量减小。土壤毛管孔隙对土壤饱和和导水率有重要影响^[22],次生阔叶林和杉木林在未受损—刚受损—自然恢复状态变化过程中,毛管孔隙度先显著减小,后显著增大($P < 0.05$),且自然恢复7年样地和未受损样地的毛管孔隙度无显著差异,说明自然恢复过程改善了次生阔叶林和杉木林的土壤饱和和导水率。土壤质地作为重要的土壤物理性质之一,对土壤通气和持水性能起支配作用^[18],在本研究中,3种林型在未受损—刚受损—受损恢复过程中土壤质地先变粗再变细,主要原因可能是洪涝引起的滑坡次生灾害破坏了原生植被,使原有的肥沃土壤流失殆尽,此外植被覆盖度下降,也使土壤更易受到径流侵蚀。在植被恢复的过程中,新生的植被增强了地表拦蓄径流的能力,使土壤侵蚀有所缓解,同时植被根系也能改良土壤质地^[23],因此土壤质地有所恢复。在土壤持水性能指标中,土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量分别反映了土壤的最大容水能力、直接供水能力和土壤生产能力^[24],本研究中次生阔叶林和杉木林3项持水量指标均先减小后增大,说明植被自然恢复对土壤容水、供水及生产能力有所改善,自然恢复状态杉木林的饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均大于其他林型,说明杉木林自然恢复初期土壤容水、供水能力较好。

土壤物理性质相关性分析表明,含水率、毛管持水量、田间持水量与绝大多数土壤物理性质呈显著相关,可用作对土壤物理性质评价的主要指标,通过对土壤物理性质进行主成分分析也验证了这一结论。在对土壤物理性质进行主成分分析和因子分析发现,未受损—刚受损—受损恢复状态变化过程中土壤抗蚀性先减小后增大,说明植被自然恢复能够改变土壤抗蚀性,证实了白秀梅等^[25]的研究结果。

4 结论

(1)植被自然恢复能显著改变土壤物理性质,次生阔叶林、杉木林和毛竹林在未受损—刚受损—受损恢复状态的变化过程中土壤质地先变粗后变细,次生阔叶林和杉木林容重、孔隙度、含水率和持水性变化趋势基本一致,容重先增大后减小,总孔隙度、毛管孔隙度、持水性指标先减小后增大。

(2)影响灾害干扰受损区植被恢复的主要土壤物理性质为含水率、毛管持水量、田间持水量。

(3)植被自然恢复能够改变土壤抗蚀性,依据研究区土壤容重、孔隙度、田间持水量等指标,运用主成分分析法得出,灾害干扰区土壤抗蚀性在未受损—刚受损—受损恢复状态变化过程中先减小后增大,自然恢复状态3种林型土壤抗蚀性从大到小依次为杉木林、次生阔叶林、毛竹林。

参考文献:

- [1] 谢贤健,韦方强.泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J].水土保持学报,2011,25(4):202-206.
- [2] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J].水土保持研究,2018,25(1):84-91.
- [3] 李民义,张建军,王春香,等.晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):125-130.
- [4] 陈爱民,严思维,林勇明,等.泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J].北京林业大学学报,2016,38(9):62-70.
- [5] 王来,高鹏翔,刘滨,等.农田向农林复合系统转变过程中土壤物理性质的变化[J].应用生态学报,2017,28(1):96-104.
- [6] Raiane M V, Joao B S F, Afrânio F N, et al. Soil quality indicators for different restoration stages on Amazon rainforest [J].Soil and Tillage Research, 2014,140:1-7.
- [7] 闫焯琛,赵廷宁,张艳,等.不同植物恢复措施对采石矿废弃地土壤物理性质的改良效果及评价[J].浙江农林大学学报,2019,36(6):1062-1068.
- [8] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.
- [9] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across achronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J].Catena, 2011, 86:110-116.
- [10] 罗清虎,吴建召,崔羽,等.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.
- [11] 吕春娟,陈丹,郭星星,等.铁尾矿不同复垦模式土壤贮水能力及入渗特征[J].中国水土保持科学,2019,17(4):59-66.
- [12] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):138-146.
- [13] 祁凯斌,黄俊胜,杨婷惠,等.亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响[J].生态学报,2018,38(22):8118-8128.
- [14] 唐松青.闽北山区土壤侵蚀演变与影响因素分析[J].中国水土保持,2003(8):20-21.
- [15] 中国气象局.中国气象灾害年鉴(2011)[M].北京:气象出版社,2012:16-18.
- [16] 南平市林业局.南平市2010年上半年林工调度简报[N].闽北林业工业动态,2010-07-06(6).
- [17] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978:140-148.
- [18] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [19] 王森浩,朱怡静,王玉芳,等.西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响[J].热带亚热带植物学报,2019,27(4):383-390.
- [20] 朱万泽,盛哲良,舒树森.川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J].水土保持学报,2019,33(6):205-212.
- [21] 李斌,张金屯.不同植被盖度下的黄土高原土壤侵蚀特征分析[J].中国生态农业学报,2010,18(2):241-244.
- [22] 梁向锋,赵世伟,张扬,等.子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J].生态学报,2009,29(2):636-642.
- [23] 黄林,王峰,周立江,等.不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J].生态学报,2012,32(19):6110-6119.
- [24] 李钢,刘祥超,张由松,等.毛竹林地不同植被恢复模式的土壤物理性质评价[J].人民长江,2019,50(3):88-93.
- [25] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.