

蒋家沟泥石流滩地不同堆积时期 土壤肥力质量演变特征*

杜 锐¹ 严思维¹ 张广帅¹ 林勇明^{1,2**} 邓浩俊¹ 陈爱民¹ 吴承祯^{1,2,3} 王道杰⁴ 邵树枫¹

¹福建农林大学林学院 福州 350002

²福建省高校森林生态系统经营与过程重点实验室 福州 350002

³武夷学院生态与资源工程系 武夷山 354300

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 土壤肥力质量是影响泥石流滩地土地利用和生态恢复的重要因素,为探究时间序列上泥石流滩地土壤肥力质量的演变趋势,采用嵌套设计方法选择近期(0-10年)、中期(10-20年)和早期(>20年)泥石流滩地为处理样地,同时以近期泥石流堆积滩地作为对照样地,通过测定不同滩地的林地、耕地、草地和荒地土壤理化性质和土壤酶活性(共16种指标),并利用土壤肥力质量综合指数法对不同堆积时期滩地的各类土地利用方式土壤肥力质量进行研究。结果显示:堆积时期和土地利用类型不同促使泥石流滩地土壤理化性质和土壤酶活性产生差异,土壤肥力质量综合指数表现出早期堆积滩地(0.54)>中期堆积滩地(0.53)>近期堆积滩地(0.31)的特征;近、中、早期滩地不同土地利用方式下土壤肥力质量评分均以耕地(46、82、83)和林地(47、79、75)最高,草地(26、42、41)次之,荒地(03、10、15)最低,且林地土壤肥力质量表现出退化的趋势。本研究表明,随堆积时间增长,泥石流滩地土壤肥力质量提高,其变化速率先快后慢,但不合理的栽植和耕种可能导致泥石流滩地土壤肥力质量退化。因此,加强土地利用方式优化和实施养分归还等对于泥石流滩地的持续利用和生态恢复具有重要意义。图2 表6 参37

关键词 泥石流滩地;堆积时期;土地利用方式;土壤肥力质量

CLC S714.8

Soil quality evolution characteristics of debris flow waste-shoal land in different deposit periods in Jiangjia Gully*

DU Kun¹, YAN Siwei¹, ZHANG Guangshuai¹, LIN Yongming^{1,2**}, DENG Haojun¹, CHEN Aimin¹,
WU Chengzhen^{1,2,3}, WANG Daojie⁴ & Shao Shuzong¹

¹Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

²Key Laboratory of Forest Ecosystem and Management of Fujian Higher Education, Fuzhou 350002, China

³Ecology and Resources Process Department, Wuyi College, Wuyishan 354300, China

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

Abstract Soil fertility quality is a significant factor affecting sustainable land use and ecological restoration in debris flow waste-shoal land. This research aimed to study the soil fertility quality of the debris flow waste-shoal land deposited in different periods. The recent (0–10 a), mid (10–20 a) and early (> 20 a) debris flow waste-shoal land were selected as the treatment plots according to the nested design method, with the recent debris flow deposits land as the control plot at the same time. Integrated soil fertility quality evaluation method was used to study the soil fertility quality under different land use types (woodland, farmland, meadowland, and uncultivated land) in different deposit periods by measuring soil properties and soil enzyme activities (16 indexes). The results showed difference in soil properties and soil enzyme activities of debris flow waste-shoal land under different deposit periods and land use types, with the integrated soil fertility quality value as: early deposit land (0.54) > mid deposit land (0.53) > recent deposit land (0.31). The soil fertility quality value of farmlands and woodlands were the greatest, followed by the grasses, with uncultivated lands being the least under different land use types in early, mid and recent deposit land. The woodland soil fertility quality showed a trend to degenerate. This study showed that the soil fertility quality in debris flow waste-shoal land improves with the deposit time, first quickly then slowed down. But soil fertility quality may degenerate with improper planting

收稿日期 Received: 2015-01-18 接受日期 Accepted: 2015-03-21

*国家自然科学基金项目(41201564)、国家科技支撑计划专题(2012BAC06B02-02)和福建农林大学林学院青年科研基金项目(6112C039Q)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41201564), the Key Sci-Tech Project of China (2012BAC06B02-02), and the Youth Science and Technology Foundation of Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University (6112C039Q)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: monkey1422@163.com)

and cultivation in debris flow waste-shoal land. Therefore, it is necessary to optimize land use types and implement nutrient return for sustainable waste-shoal use and ecological restoration in the debris flow waste-shoal land.

Keywords debris flow waste-shoal land; deposit period; land use type; soil fertility quality

泥石流是一种发生在山区的突发性灾害,是山地环境退化、地表环境恶化和生态平衡失调的产物^[1]。泥石流堆积物形成的滩地由于地势平缓、热量丰富,是较好的土地资源,加之山区平坦土地资源较少,其已成为部分山区重要的土地利用类型。因此,探究泥石流滩地土壤学特性对于当地泥石流滩地的开发利用和生态恢复具有重要意义。国外对泥石流滩地的研究开展较早,得出了泥石流滩地土壤养分的累积速率不同^[2]、土壤结构在不同堆积类型间存在差异^[3-4]等结论。国内对泥石流滩地的研究主要集中在最近数十年,前人研究表明植被覆盖不同导致泥石流滩地土壤结构产生差异^[5],开发利用方式不同则促使土壤养分发生变化^[6-7],但运用统计学方法对泥石流滩地进行土壤肥力质量评价的研究报道仍较少^[8-9],特别是时间序列上泥石流滩地土壤肥力质量演变特征尚未见报道。

金沙江一级支流小江流域的蒋家沟地区由于老构造带错综复杂、新构造运动强烈,加之人类不合理的开发利用方式,导致其成为我国泥石流发生频率最高的典型沟谷。有研究表明,蒋家沟泥石流滩地面积达400 hm²左右^[10],而1 hm²泥石流滩地的产量相当于5 hm²坡耕地的产量^[11],土地利用价值较大。从上个世纪80年代开始至今,经过当地的治理与开发利用,蒋家沟泥石流滩地形成了一定规模的林地与耕地等,从而有效改善了当地生态环境并促进其经济发展^[11]。人类对土地的开发利用造成地表植被类型、土壤结构和土壤质地改变,引起土壤养分和土壤生物多样性变化^[12],进而对土壤肥力质量产生一定影响^[13]。王道杰等^[8]、张广帅等^[9]对蒋家沟流域泥石流滩地进行研究后证实:土地利用方式的不同引起滩地土壤肥力质量的差异,以稻田的土壤肥力质量评分最高,但该流域不同堆积时期泥石流滩地土壤肥力质量的演变特征尚不明。因此,本研究利用嵌套设计方法选择蒋家沟不同堆积时期泥石流滩地中林地(Woodland, WL)、耕地(Farmland, FL)、草地(Meadowland, ML)和荒地(Uncultivated land, UL)土壤作为研究对象,基于徐建明等人提出的土壤质量指标^[14],选取、测定滩地土壤理化性质和土壤酶活性,并利用土壤肥力质量综合评价指数对不同堆积时期泥石流滩地土壤肥力质量的演变趋势进行研究,以期对当地植被恢复和生态环境治理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蒋家沟流域地处云南省东北部、康滇地轴东缘,位于金沙江支系小江流域断裂带内(103°6'-103°13'E, 23°13'-23°17'N),平均海拔1 270 m,流域面积47.1 km²,流域内山高坡陡,坡度在25°以上的区域达61%左右。蒋家沟主沟起于门前沟与多照沟交汇处(103°9'E, 26°15'N),至与小江流域交汇处(103°16'E, 26°16'N)结束,主沟长约12 km,主要支沟有门前沟、多照沟、查菁沟、大凹子沟和老蒋家沟等。蒋家沟年

均温20.2℃,极高温40.9℃,极低温6.2℃,干湿季分明,降水集中在8、9、10三个月份,年均降水量691 mm,年蒸发量3 752 mm,干燥度指数5.43,相对湿度54%,属于典型的干热河谷气候区。蒋家沟流水四季不断,水量变化范围为0.06-0.71 m³ s⁻¹,每年5-11月为浑水期,含沙量最高可达335.1 kg m⁻³^[15],12月至次年4月为清水期,含沙量较少。该流域几乎每年雨季均爆发泥石流,由此发育有多期泥石流滩地,滩地主要分布于流域的中下游。

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置和样品采集 选取流域中下游3处人类活动干扰较大的泥石流滩地作为试验样地(图1),确定泥石流观测站(Debris flow observation station, DFOS)附近滩地(0-10年)为近期堆积滩地(Recent deposit shoal, RDS),滩地样地面积约0.11 km²,坡度<2°,主要为砂质壤土和粉壤土;以泥得坪下滩地(10-20年)为中期堆积滩地(Middle deposit shoal, MDS),滩地样地面积约0.25 km²,坡度<2°,主要为粉壤土;以老蒋家沟滩地(>20年)为早期堆积滩地(Early deposit shoal, EDS),滩地样地面积约0.75 km²,坡度为2°-3°,主要为粉壤土。在泥石流滩地依据不同土地利用方式再划分林地、旱作耕地(以下简称耕地)、草地、荒地样点,样地属性见表1。由于所选取的全部样地均位于蒋家沟中下游,其土壤类型相近,且堆积滩地地势平坦,因此本研究认为取样点的土壤本底值相近。

各土地利用类型样地均设置5个重复样方,3组样地共60个样方。样方面积中林地10 m×10 m,耕地、草地、荒地5 m×5 m,在林地主要调查乔木种类、胸径、树高、林下植被种类及其覆盖度,在耕地主要调查作物种类和耕作年限,草地和荒地主要调查植被种类及其植被覆盖度。按照五点取样法采集各样方0-20 cm土壤样品(去除土壤表层杂物)带回实验室,其中使用200 cm³环刀采集的鲜土用于测定土壤物理性质,另一部分鲜土自然风干分别过2 mm、0.149 mm筛后装袋备用。

1.2.2 样品分析 依据文献[16]测定土壤含水率(Soil water content, SMC)、pH值、容重(Bulk density, BD)、孔隙度(Bulk porosity, BP)、有机碳(Total organic carbon, TOC)、全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)、有效磷(Available phosphorus, AP)、全钾(Total potassium, TK)、速效钾(Available potassium, AK)、碱解氮(Available nitrogen, AN),其中采用烘干法测定SMC,采用酸度计法测定pH,采用环刀法测定BD,采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定TOC,采用半微量-凯氏法测定TN,采用碱熔-钼锑抗比色法测定TP,采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定AP,采用碱熔-原子吸收分光光度法(AA7002原子吸收分光光度计)测定TK,采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法(AA7002原子吸收分光光度计)测定AK,采用碱解扩散法测定AN。依据文献[17]测定蔗糖酶、纤维素酶、脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性,其中采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶和

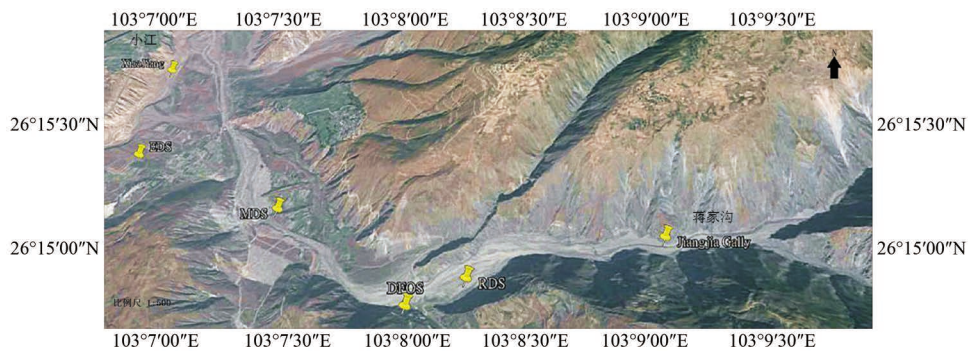


图1 样地位置 (图片来源于谷歌地图). RDS: 近期堆积滩地; MDS: 中期堆积滩地; EDS: 早期堆积滩地; DFOS: 泥石流观测站.
Fig. 1 Plot locations (Photo from Google Maps). RDS: Recent deposit shoal; MDS: Middle deposit shoal; EDS: Early deposit shoal; DFOS: Debris flow observation station.

表1 样地特征
Table 1 Plot characteristics

样地 Plot	经纬度 Longitude and latitude	土地类型 Land type	海拔 (h/m) Elevation	样地概述 Description
RDS (CK)	103°7' E, 26°15'N	WL	1328.0	人工赤桉纯林, 总面积约5 000 m ² , 平均胸径6.26 cm, 平均树高8.13 m, 林下植被以拟金茅、扭黄茅为主, 植被覆盖度约60% Pure artificial <i>Eucalyptus camaldulensis</i> forest; total area about 5 000 m ² ; average diameter at breast height 6.26 cm; average tree height 8.13 m; floor vegetation mainly <i>Eulaliopsis binata</i> and <i>Heteropogon contortus</i> ; vegetation coverage about 60%
		FL	1375.7	主要为1-3年新开发耕地, 以玉米、花生、番薯为主 Farmlands cultivated in recent 3 years; crops mainly <i>Zea mays</i> , <i>Arachis hypogaea</i> and <i>Ipomoea batatas</i>
		ML	1352.0	以拟金茅、扭黄茅为主, 植被覆盖度约30% Plants mainly <i>E. binata</i> and <i>H. contortus</i> ; vegetation coverage about 30%
		UL	1336.7	零星拟金茅、狗尾草分布, 植被覆盖度不足5%, 石砾较多 Sporadic <i>E. binata</i> and <i>Setaria viridis</i> ; vegetation coverage lower than 5%; more gravels than other deposit shoal
MDS	103°7' E, 26°15'N	WL	1238.7	人工赤桉纯林, 面积约1 000 m ² , 平均胸径9.59 cm, 平均树高10.45 m, 林下植被以拟金茅、扭黄茅为主, 植被覆盖度约30% Pure artificial <i>Eucalyptus camaldulensis</i> forest; total area about 1 000 m ² ; average diameter at breast height 9.59 cm; average tree height 10.45 m; floor vegetation mainly <i>E. binata</i> and <i>H. contortus</i> ; vegetation coverage about 30%
		FL	1237.9	平均耕作年限约10年, 以玉米、花生、番薯为主 Average cultivation age about 10 a; crops mainly <i>Z. mays</i> , <i>A. hypogaea</i> and <i>I. batatas</i> .
		ML	1231.8	以拟金茅、狗牙根、菱叶藜为主, 植被覆盖度约40% Plants mainly <i>E. binata</i> , <i>Cynodon dactylon</i> and <i>Chenopodium bryoniifolium</i> Bunge; vegetation coverage about 40%
		UL	1238.0	零星拟金茅分布, 植被覆盖度不足5% Sporadic <i>E. binata</i> ; vegetation coverage lower than 5%
EDS	103°6' E, 26°15'N	WL	1105.2	人工赤桉纯林, 总面积约2 000 m ² , 平均胸径7.47 cm, 平均树高9.13 m, 林下有零星拟金茅分布, 植被覆盖度不足5%, 无明显腐殖质层 Pure artificial <i>Eucalyptus camaldulensis</i> forest; total area about 2 000 m ² ; average diameter at breast height 7.47 cm; average tree height 9.13 m; floor vegetation of sporadic <i>E. binata</i> ; vegetation coverage lower than 5%; no humus layer
		FL	1108.6	平均耕作年限约15年, 以玉米和花生为主 Average cultivation age about 15 a; crops mainly <i>Z. mays</i> and <i>A. hypogaea</i>
		ML	1097.9	以拟金茅、狗牙根、马桑为主, 植被覆盖度约65% Plants mainly <i>E. binata</i> , <i>C. dactylon</i> and <i>Coriaria nepalensis</i> ; vegetation coverage about 65%
		UL	1037.3	零星狗尾草和低矮马桑分布, 植被覆盖度约10% Sporadic <i>S. viridis</i> and <i>C. nepalensis</i> ; vegetation coverage about 10%

RDS: 近期堆积滩地; MDS: 中期堆积滩地; EDS: 早期堆积滩地. WL: 林地; FL: 耕地; ML: 草地; UL: 荒地.
RDS: Recent deposit shoal; MDS: Middle deposit shoal; EDS: Early deposit shoal. WL: Woodland; FL: Farmland; ML: Meadowland; UL: Uncultivated land.

纤维素酶, 分别以1 kg土壤1 h生成的葡萄糖数量 (g kg⁻¹ h⁻¹、mg kg⁻¹ h⁻¹) 表示蔗糖酶、纤维素酶活性; 采用苯酚-次氯酸钠比色法测定脲酶, 以1 kg土壤1 h生成的NH₃-N的数量 (mg kg⁻¹ h⁻¹) 表示脲酶活性; 采用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶, 以1 kg土壤1 h生成的苯酚数量 (mg kg⁻¹ h⁻¹) 表示其活性; 采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶, 以滴定过氧化氢

用去的高锰酸钾量 (mL g⁻¹ min⁻¹) 表示其活性.
1.2.3 数据分析 采用SPSS 19.0和Excel 2010软件对所有土壤肥力质量因子含量进行数据分析, 采用嵌套分析法 (Nested ANOVA) 分析土壤肥力质量因子在堆积时期和土地利用方式间差异水平, 并采用最小显著差异法 (LSD法) 进行多重比较, 差异水平为0.05.

1.2.4 土壤肥力质量评价 本研究土壤肥力质量因子变化具有连续性, 因此采用连续性质的隶属度函数评价土壤肥力质量因子, 并依据文献[18]分析得到因子隶属度值、特征值、贡献率、因子载荷矩阵和因子权重。各样地土壤肥力质量综合指数(I_Q)为各因子的隶属度值与其权重乘积之和^[19], 公式如下:

$$I_Q = \sum_{i=1}^n W_i \times Q(x_i) \quad (1)$$

式中: I_Q 为土壤肥力质量综合指数, W_i 为因子权重向量, $Q(x_i)$ 表示土壤因子隶属度值。 I_Q 值越大, 土壤肥力质量越高, I_Q 值越小则表明土壤肥力质量越差。

2 结果与分析

2.1 泥石流滩地土壤理化性质演变特征

研究结果表明, 堆积时期和土地利用类型仅对土壤含

水量作用显著 ($P < 0.05$, 下同), 以MDS、EDS的WL和FL含水量最大(表2), 表明在人类干扰下, 泥石流滩地土壤持水能力得到提高, 这是由于林地和耕地的植被覆盖增加以及当地群众引水灌溉导致的。不同堆积时期和土地利用方式下, 土壤pH值、容重和孔隙度均未发生显著变化, 这可能因为人类对堆积滩地的开发利用时间较短, 对滩地土壤容重和孔隙度影响不显著导致的。因此, 在蒋家沟流域, 人类活动对不同堆积时期泥石流滩地的土壤物理性质的影响较小。

在土壤养分中, 堆积时期仅对土壤有机碳、水解氮和速效钾作用显著, 土地利用类型对土壤有机碳、水解氮、有效磷和速效钾作用显著, 其中, MDS的WL、FL与该堆积时期滩地UL间差异显著(表3), 表明随着堆积(人类开发利用)时间增大, 泥石流堆积滩地土壤养分得到一定程度提高, 这是由于林地和耕地地表植被在人为干扰下迅速增加, 通过根

表2 样地土壤物理性质

Table 2 Plot soil physical properties

样地 Plot	土地类型 Land type	含水率 Water content (w/%)	pH	容重 Bulk density (w/g cm ⁻³)	孔隙度 Bulk porosity (w/%)
RDS (CK)	林地 Woodland	2.91% ± 1.21%Aa	7.96 ± 0.28Aa	1.46 ± 0.13Aa	0.45 ± 0.06Aa
	耕地 Farmland	3.09% ± 1.64%Aa	7.86 ± 0.39Aa	1.45 ± 0.24Aa	0.46 ± 0.14Aa
	草地 Meadowland	2.55% ± 0.46%Aa	8.06 ± 0.10Aa	1.62 ± 0.14Aa	0.39 ± 0.08Aa
	荒地 Uncultivated land	1.94% ± 1.39%Aa	8.09 ± 0.29Aa	1.67 ± 0.19Aa	0.37 ± 0.09Aa
MDS	林地 Woodland	12.16% ± 4.52%Bbc	7.83 ± 0.25Aa	1.43 ± 0.28Aa	0.46 ± 0.12Aa
	耕地 Farmland	11.36% ± 5.89%Bbc	7.85 ± 0.48Aa	1.34 ± 0.26Aa	0.50 ± 0.07Aa
	草地 Meadowland	6.48% ± 3.65%Bab	7.93 ± 0.21Aa	1.52 ± 0.18Aa	0.43 ± 0.08Aa
	荒地 Uncultivated land	4.26% ± 2.18Ba	7.96 ± 0.37Aa	1.64 ± 0.21Aa	0.38 ± 0.08Aa
EDS	林地 Woodland	10.64% ± 3.34%Bbc	7.91 ± 0.34Aa	1.23 ± 0.27Aa	0.54 ± 0.12Aa
	耕地 Farmland	16.27% ± 4.09%Bc	7.95 ± 0.32Aa	1.13 ± 0.09Aa	0.57 ± 0.11Aa
	草地 Meadowland	7.73% ± 4.86%Bab	7.98 ± 0.46Aa	1.49 ± 0.30Aa	0.44 ± 0.07Aa
	荒地 Uncultivated land	2.41% ± 1.69%Ba	8.01 ± 0.13Aa	1.52 ± 0.19Aa	0.43 ± 0.10Aa

同列标不同大写字母表示不同堆积时期同一种土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$), 同列标不同小写字母表示同一堆积滩地下不同土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$), $N = 5$ 。RDS: 近期堆积滩地; MDS: 中期堆积滩地; EDS: 早期堆积滩地。

Uppercase letters in one column indicate significant difference between different deposit periods in the same land use type at $P < 0.05$; lowercase letters in one column indicate significant difference between different land use types in the same deposit shoal at $P < 0.05$, $N = 5$ 。RDS: Recent deposit shoal; MDS: Middle deposit shoal; EDS: Early deposit shoal.

表3 样地土壤养分含量

Table 3 Plot soil nutrient content

样地 Plot	土地类型 Land type	TOC (w/g kg ⁻¹)	TN (w/g kg ⁻¹)	TP (w/g kg ⁻¹)	AP (w/mg kg ⁻¹)	TK (w/g kg ⁻¹)	AK (w/mg kg ⁻¹)	AN (w/mg kg ⁻¹)
RDS (CK)	WL	9.05 ± 3.71Aa	1.15 ± 0.47Aa	0.84 ± 0.43Aa	8.82 ± 4.31Aa	14.87 ± 5.97Aa	13.14 ± 7.09Aa	96.37 ± 26.94Aa
	FL	9.41 ± 2.89Aa	1.18 ± 0.61Aa	0.82 ± 0.39Aa	7.93 ± 2.68Aa	14.35 ± 4.61Aa	9.65 ± 2.98Aa	91.87 ± 31.28Aa
	ML	6.94 ± 0.97Aa	0.98 ± 0.53Aa	0.49 ± 0.26Aa	5.10 ± 4.01Aa	16.47 ± 5.01Aa	13.32 ± 4.62Aa	52.51 ± 28.69Aa
	UL	5.63 ± 0.99Aa	0.54 ± 0.29Aa	0.28 ± 0.15Aa	3.22 ± 2.47Aa	16.80 ± 3.97Aa	6.65 ± 4.37Aa	39.38 ± 16.89Aa
MDS	WL	16.10 ± 4.74Bbc	1.65 ± 0.64Aa	0.85 ± 0.27Aa	11.43 ± 3.89Ab	12.61 ± 3.79Aa	18.58 ± 5.61Bb	157.36 ± 39.82Bc
	FL	19.90 ± 3.45Bc	1.52 ± 0.49Aa	0.84 ± 0.40Aa	8.47 ± 3.98Aab	10.16 ± 3.71Aa	18.30 ± 7.87Bab	162.54 ± 40.28Bc
	ML	10.44 ± 4.01Bab	1.09 ± 0.65Aa	0.51 ± 0.28Aa	5.97 ± 3.78Aab	14.21 ± 6.87Aa	19.07 ± 6.26Bb	76.60 ± 30.12Bb
	UL	6.29 ± 5.62Ba	0.63 ± 0.47Aa	0.19 ± 0.10Aa	2.25 ± 2.19Aa	14.40 ± 3.46Aa	7.06 ± 5.97Ba	17.49 ± 10.29Ba
EDS	WL	8.96 ± 1.02Aa	1.56 ± 0.61Aa	0.84 ± 0.47Aa	13.54 ± 4.86Ab	10.81 ± 2.96Aa	22.29 ± 5.94Bb	78.87 ± 29.16Ba
	FL	9.77 ± 4.21Aa	1.54 ± 0.83Aa	0.81 ± 0.39Aa	13.74 ± 5.42Ab	10.36 ± 5.03Aa	21.51 ± 6.74Bb	180.48 ± 21.79Bb
	ML	8.34 ± 3.27Aa	1.05 ± 0.40Aa	0.60 ± 0.21Aa	5.66 ± 3.42Aa	11.29 ± 3.49Aa	22.07 ± 5.04Bb	65.59 ± 30.01Ba
	UL	6.09 ± 4.27Aa	0.65 ± 0.51Aa	0.25 ± 0.13Aa	2.30 ± 1.97Aa	10.92 ± 6.81Aa	5.74 ± 3.87Ba	39.39 ± 20.07Ba

同列标不同大写字母表示不同堆积时期同一种土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$), 同列标不同小写字母表示同一堆积滩地下不同土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$), $N = 5$ 。RDS: 近期堆积滩地; MDS: 中期堆积滩地; EDS: 早期堆积滩地。WL: 林地; FL: 耕地; ML: 草地; UL: 荒地。TOC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; AP: 有效磷; TK: 全钾; AK: 速效钾; AN: 碱解氮。

Uppercase letters in one column indicate significant difference between different deposit periods in the same land use type at $P < 0.05$; lowercase letters in one column indicate significant difference between different land use types in the same deposit shoal at $P < 0.05$, $N = 5$ 。RDS: Recent deposit shoal; MDS: Middle deposit shoal; EDS: Early deposit shoal. WL: Woodland; FL: Farmland; ML: Meadowland; UL: Uncultivated land. TOC: Total organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; TK: Total potassium; AK: Available potassium; AN: Available nitrogen.

系分泌物、植物残体等促进土壤养分增加. 全氮、全磷、全钾在不同堆积时期和不同土地利用类型间均无显著差异 ($P > 0.05$, 下同), 表明植被对土壤氮、磷、钾全养分的作用较小. 林地和耕地的全氮、全磷含量在数量上大于同期堆积滩地的荒地, 这是由于人为施肥导致的, 由此推测随着开发利用时间的增大, 土壤全养分有可能在不同堆积时期产生差异.

2.2 泥石流滩地土壤酶活性的演变特征

仅蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性对堆积时期响应显著 (表3), 全部土壤酶活性对土地类型均响应显著, 林地和耕地的土壤酶活性与同期堆积滩地的差异性最大, 表明堆积时间增长, 土壤酶活性提高, 这是由于地表植被通过根系分泌物等促进土壤养分升高 (前文可知), 改良了土壤酶的生存环境, 从而促进土壤酶活性提高.

2.3 土壤肥力质量演变特征

经因子分析得到相关系数矩阵、特征值序位及贡献率和因子载荷矩阵. 按照特征值 >1 的原则, 共抽取3个主成分,

其特征值分别为11.579、1.559、1.129, 贡献率分别为72.372%、9.743%、7.053%, 累计贡献率达89.168%, 表明第一、二、三主成分已可反映整体特征. 利用SPSS得到各因子载荷值和权重向量 (表5), 结果表明, 主成分1主要支配土壤含水量、孔隙度、有机碳、全氮、全磷、有效磷、速效钾、水解氮、蔗糖酶、纤维素酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶, 主成分2主要支配容重、全钾, 主成分3主要支配pH值 (表5). 计算得各因子隶属度值 (表6), 利用公式 (1) 计算得各样地土壤肥力质量综合指数得分 (图2). 对同一堆积时期滩地不同土地利用方式的土壤肥力质量评分取算术平均值发现, 土壤肥力质量表现出EDS (0.54) $>$ MDS (0.53) $>$ RDS (0.31) 的特征, 表明在人类开发利用和恢复治理下, 泥石流堆积滩地土壤肥力质量得到一定程度恢复, 这是因为随着堆积时间变长, 人类对土地的栽种、耕作活动增强, 自然状态下草地、荒地地表植被覆盖度逐渐增大, 促进土壤养分和土壤酶活性等升高, 进而导致土壤肥力质量增大. 随着堆积时间的增长, 土壤肥力质量恢复表现出先快后慢甚至停滞的趋势, 这与不合理的开发利用

表4 样地土壤酶活性
Table 4 Plot soil enzyme activities

样地 Plot	土地类型 Land type	蔗糖酶 Invertase (w/g kg ⁻¹ h ⁻¹)	纤维素酶 Cellulase (w/mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	脲酶 Urease (w/mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase (w/mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	过氧化氢酶 Catalase (w/mL g ⁻¹ min ⁻¹)
RDS (CK)	林地 Woodland	0.57 ± 0.37Aa	16.56 ± 5.97Aa	1.95 ± 0.81Aa	63.15 ± 16.38Ac	89.13 ± 5.49Ab
	耕地 Farmland	0.66 ± 0.29Aa	13.31 ± 5.87Aa	1.47 ± 0.46Aa	43.1 ± 16.28Abc	91.13 ± 14.27Ab
	草地 Meadowland	0.17 ± 0.13Aa	14.97 ± 6.06Aa	1.54 ± 0.30Aa	26.26 ± 6.21Aab	92.88 ± 10.42Ab
	荒地 Uncultivated land	0.15 ± 0.09Aa	6.77 ± 4.71Aa	1.31 ± 0.41Aa	13.6 ± 8.67Aa	43.15 ± 12.79Aa
MDS	林地 Woodland	2.67 ± 0.27Cc	16.54 ± 4.61Ab	4.82 ± 1.05Bb	84.47 ± 20.19Bc	91.04 ± 4.98Ab
	耕地 Farmland	2.48 ± 0.56Cc	18.62 ± 6.37Ab	4.90 ± 0.67Bb	68.3 ± 11.97Bbc	88.27 ± 13.27Ab
	草地 Meadowland	1.09 ± 0.51Cb	6.29 ± 4.13Aa	1.55 ± 0.67Ba	45.33 ± 11.07Bb	86.95 ± 12.37Ab
	荒地 Uncultivated land	0.18 ± 0.07Ca	6.08 ± 5.01Aa	0.84 ± 0.37Ba	17.96 ± 10.39Ba	46.76 ± 20.14Aa
EDS	林地 Woodland	1.33 ± 0.62Bbc	17.00 ± 3.61Abc	5.50 ± 0.97Bb	69.94 ± 9.67Bb	77.32 ± 11.87Ab
	耕地 Farmland	1.70 ± 0.51Bc	19.97 ± 4.61Ac	4.99 ± 1.01Bb	77.49 ± 7.81Bb	73.23 ± 18.67Aab
	草地 Meadowland	0.77 ± 0.37Bab	9.28 ± 4.67Aab	2.30 ± 0.71Ba	54.45 ± 9.86Bb	73.51 ± 13.57Aab
	荒地 Uncultivated land	0.16 ± 0.11Ba	5.76 ± 3.89Aa	1.30 ± 0.29Ba	18.09 ± 9.76Ba	49.81 ± 16.87Aa

同列标不同大写字母表示不同堆积时期同一种土地利用方式间差异显著, 同列标不同小写字母表示同一堆积滩地下不同土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$), $N = 5$. RDS: 近期堆积滩地; MDS: 中期堆积滩地; EDS: 早期堆积滩地.

Uppercase letters in one column indicate significant difference between different deposit periods under the same land use type at $P < 0.05$; lowercase letters in one column indicate significant difference between different land use types in the same deposit shoal at $P < 0.05$, $N = 5$. RDS: Recent deposit shoal; MDS: Middle deposit shoal; EDS: Early deposit shoal.

表5 土壤肥力质量因子载荷值
Table 5 Factor loading values for soil fertility quality

项目 Item	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	因子载荷值 Factor loading value	因子权重 Factor weight
含水率 Water content	0.882	-0.282	-0.070	0.929	0.062
pH	-0.743	-0.262	0.412	0.889	0.059
容重 Bulk density	-0.896	0.368	-0.125	0.977	0.065
孔隙度 Bulk porosity	0.900	-0.342	0.113	0.969	0.064
有机碳 Total organic carbon	0.703	0.421	-0.518	0.969	0.064
全氮 Total nitrogen	0.983	0.122	0.066	0.993	0.066
全磷 Total phosphorus	0.893	0.275	0.238	0.964	0.064
有效磷 Available phosphorus	0.889	-0.157	0.315	0.956	0.063
全钾 Total potassium	-0.639	0.538	0.430	0.940	0.062
速效钾 Available potassium	0.803	0.020	0.212	0.831	0.055
水解氮 Available nitrogen	0.902	0.094	-0.119	0.915	0.061
蔗糖酶 Invertase	0.901	0.168	-0.314	0.969	0.064
纤维素酶 Cellulase	0.849	0.091	0.300	0.905	0.060
脲酶 Urease	0.920	-0.241	-0.019	0.951	0.063
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.977	-0.024	0.070	0.980	0.065
过氧化氢酶 Catalase	0.623	0.687	0.241	0.958	0.063

表6 土壤肥力质量因子隶属度值

Table 6 Soil fertility quality factor membership values

样地 Plot	土地类型 Land type	SMC	pH	BD	BP	TOC	TN	TP	AP	TK	AK	AN	蔗糖酶 Invertase	纤维素酶 Cellulase	脲酶 Urease	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
RDS (CK)	WL	0.07	0.50	0.41	0.43	0.24	0.54	0.98	0.46	0.29	0.45	0.48	0.36	0.76	0.24	0.51	0.92
	FL	0.08	0.87	0.42	0.46	0.26	0.58	0.95	0.40	0.37	0.24	0.46	0.20	0.53	0.14	0.46	0.96
	ML	0.04	0.12	0.10	0.11	0.09	0.39	0.45	0.20	0.05	0.46	0.21	0.01	0.65	0.15	0.20	1.00
	UL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.07	0.00	0.05	0.13	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
MDS	WL	0.71	1.00	0.46	0.49	0.73	1.00	1.00	0.64	0.63	0.78	0.86	1.00	0.76	0.85	0.80	0.96
	FL	0.66	0.94	0.63	0.67	1.00	0.88	0.98	0.44	1.00	0.76	0.89	0.92	0.91	0.87	0.86	0.91
	ML	0.32	0.62	0.28	0.30	0.62	0.50	0.48	0.26	0.39	0.81	0.36	0.37	0.04	0.15	0.50	0.88
	UL	0.16	0.50	0.06	0.06	0.05	0.08	0.00	0.00	0.51	0.08	0.00	0.01	0.02	0.00	0.07	0.07
EDS	WL	0.61	0.69	0.84	0.89	0.23	0.92	0.98	1.00	0.90	1.00	0.38	0.47	0.79	1.00	0.85	0.69
	FL	1.00	0.54	1.00	1.00	0.29	0.90	0.94	0.80	0.97	0.95	1.00	0.62	1.00	0.89	1.00	0.60
	ML	0.40	0.42	0.34	0.36	0.19	0.46	0.62	0.24	0.24	0.99	0.30	0.25	0.25	0.31	0.64	0.61
	UL	0.03	0.31	0.28	0.30	0.03	0.10	0.09	0.00	0.89	0.00	0.13	0.01	0.00	0.10	0.07	0.13

RDS: 近期堆积滩地; MDS: 中期堆积滩地; EDS: 早期堆积滩地. WL: 林地; FL: 耕地; ML: 草地; UL: 荒地. SMC: 土壤含水率; BD: 容重; BP: 孔隙度; TOC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; AP: 有效磷; TK: 全钾; AK: 速效钾; AN: 碱解氮.

RDS: Recent deposit shoal; MDS: Middle deposit shoal; EDS: Early deposit shoal. WL: Woodland; FL: Farmland; ML: Meadowland; UL: Uncultivated land. SMC: Soil water content; BD: Bulk density; BP: Bulk porosity; TOC: Total organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; TK: Total potassium; AK: Available potassium; AN: Available nitrogen.

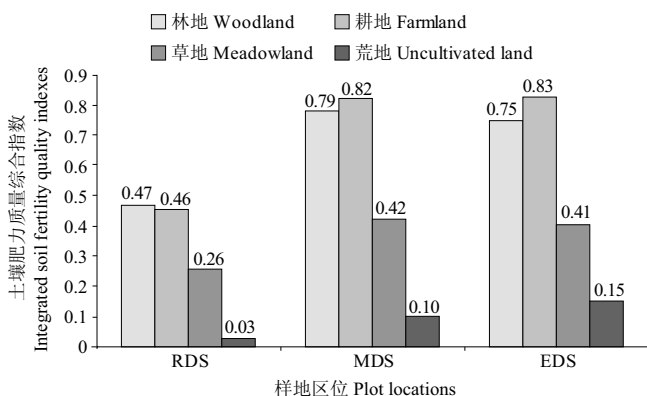


图2 土壤肥力质量综合指数.

Fig. 2 Integrated soil fertility quality indexes.

方式如栽种桉树、过度耕种等有关. 3种堆积时期滩地的耕地和林地土壤肥力质量均最大, 草地次之, 荒地最差, 这是因为不同土地利用方式下人类活动和地表植被等存在差异, 导致土壤结构、质地、土壤养分和土壤生物学特性变化, 进而引起土壤肥力质量评分不同.

3 讨论与结论

蒋家沟流域的泥石流近期堆积滩地大多是近1-3年泥石流堆积形成的, 且该滩地不同土地利用方式间绝大多数土壤理化性质和土壤酶活性差异不显著, 因此本文认为近期堆积滩地的土壤肥力质量与新堆积的泥石流迹地相似, 在一定程度上可以代表泥石流滩地土壤肥力质量的初始值. 因此, 利用中期和早期滩地与近期滩地相比较, 可以探究时间序列上泥石流滩地土壤肥力质量的演变特征.

本研究表明, 随堆积时间增长, 泥石流滩地的土壤肥力质量增大, 在增速上表现出先快后慢甚至停滞的趋势, 这点可从早期和中期堆积滩地土壤养分、土壤酶活性变化趋势得到印证. 植物通过根系的分泌作用和吸收作用等, 促进土壤

腐殖质化和粘化, 提高土壤酶^[20-21]和土壤微生物活性^[22-23], 加快土壤养分分解^[24], 从而促进土壤生物和地表植物吸收、利用和固定土壤养分, 形成相对稳定的“植被-土壤”系统, 最终起到保持水土、提高土壤肥力质量的作用^[12]. 然而不合理的栽种和耕作方式对土壤养分产生影响, 进而引起土壤肥力质量继续发生变化. 当地林地以幼龄桉树纯林为主, 有研究表明桉树对土壤养分的消耗较大^[25-26], 且桉树连作抑制土壤酶活性^[27], 这导致早期堆积滩地林地土壤C、N、P元素含量和相关酶活性较低. 因此, 为防治泥石流滩地林地土壤肥力质量继续退化, 当地需要优化林分结构, 改变其纯林的栽种模式.

前人研究发现长期耕作而忽略土壤养分归还, 可导致土壤养分降低^[28-29], 进而抑制土壤酶活性, 本文中早期堆积滩地中耕地的土壤有机碳含量和蔗糖酶活性下降印证了这一点. 由此推测, 随着耕作时间的加长, 泥石流滩地耕地的土壤肥力质量可能会进一步降低. 因此, 为减缓耕地土壤肥力质量退化, 在耕地区需合理配施肥料, 运用秸秆还田等土壤养护措施提高有益微生物和土壤酶活性^[30-31], 避免连作并优化耕种方式以提高土壤质量^[32-35]. 王道杰等指出稻田是改善泥石流滩地土壤环境最有效的方式^[8], 但由于蒋家沟流域主沟沟槽的供水能力有限, 导致目前蒋家沟主沟内水稻栽种面积较小, 因此为实现土地的更好利用和土地质量的更大提高, 尚需研发和实施多种生态恢复措施.

与相关研究结论^[8-9, 36-37]相似, 本研究中土地利用方式不同造成相关土壤肥力质量因子含量产生变化, 从而引起土壤肥力质量的差异. 泥石流滩地的林地和耕地属于生态恢复中的人工治理方式, 草地和荒地属于自然恢复方式. 本研究中, 与草地和荒地中的低盖度杂草及稀疏灌木比较, 人类活动通过土地管理并栽种乔木和农作物等可以快速提高地表植被覆盖度, 从而起到涵养水分和提高土壤养分含量以及土壤酶活性的作用, 有效提高了人工治理区土壤肥力质量, 这与王道杰等^[8]、张广帅等^[9]在本区前期工作中得出的研究结论相同. 不同堆积时期草地和荒地的土壤肥力质量变化较小,

表明自然恢复速率较慢,所需时间较长,因此,在泥石流滩地生态恢复和开发利用初期可以优先考虑人工治理方式。

参考文献 [References]

- 杜荣桓,康志成,陈循谦,朱平一. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆:科学技术文献出版社,1987: 8-9 [Du RH, Kang ZC, Chen XQ, Zhu PY. A comprehensive investigation and control planning for debris flow in the Xiaojiang river basin of Yunnan province [M]. Chongqing: Scientific and Technological Literature Press Chongqing Branch, 1987: 8-9]
- Turk JK, Graham RC. Soil carbon and nitrogen accumulation in a forested debris flow chronosequence, California [J]. *Am J Soil Sci Soc*, 2009, **73** (5): 1504-1509
- Turk JK, Goforth BR, Graham RC, Kendrick KJ. Soil morphology of a debris flow chronosequence in a coniferous forest, southern California, USA [J]. *Geoderma*, 2008, **146** (1-2): 157-165
- Sohn YK. Coarse-grained debris-flow deposits in the Miocene fan deltas, SE Korea: a scaling analysis [J]. *Sed Gel*, 2000, **130** (1): 45-64
- 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 [Xie XJ, Wei FQ. Characteristics of soil particle fractal dimension under different coverage grassland of the area with high-frequency debris flow [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, **25** (4): 202-206]
- 王道杰, 周麟, 谢洪, 王士革. 开发利用对泥石流滩地土壤肥力特性的影响[J]. 土壤通报, 2004, **35** (1): 16-20 [Wang DJ, Zhou L, Xie H, Wang SG. Effects of exploitation on the soil fertility properties of debris flow waste-shoal land in the Longdong Ravine, Sichuan province [J]. *Chin J Soil Sci*, 2004, **35** (1): 16-20]
- 谢贤健. 泥石流频发区土壤有机质空间变异特征[J]. 中国水土保持科学, 2014, **12** (3): 53-58 [Xie XJ. Spatial characteristics of soil organic content in a frequent debris flow area [J]. *Soil Water Conserv Sci China*, 2014, **12** (3): 53-58]
- 王道杰, 崔鹏, 朱波, 韦方强. 云南蒋家沟泥石流滩地土壤肥力特性[J]. 水土保持通报, 2003, **23** (6): 7-11 [Wang DJ, Cui P, Zhu B, Wei FQ. Soil fertility properties of debris flow waste-shoal land in Jiangjia Gully of Yunnan province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2003, **23** (6): 7-11]
- 张广帅, 邓浩俊, 杜锐, 林勇明, 马瑞丰, 王道杰. 泥石流滩地不同土地利用类型土壤肥力质量综合评价[J]. 福建林学院学报, 2014, **34** (3): 214-219 [Zhang GS, Deng HJ, Dun K, Lin YM, Ma RF, Wang DJ. Comprehensive estimation of soil fertility in different land use types of debris flow waste-shoal land [J]. *J Fujian Coll For*, 2014, **34** (3): 214-219]
- 谭万沛. 泥石流扇的类型与土地利用模式[J]. 地理学与国土研究, 2000, **16** (1): 71-75 [Tan WP. Debris flow fan types and land-use models [J]. *Geogr Terr Res*, 2000, **16** (1): 71-74]
- 胡发德, 田连权. 云南蒋家沟泥石流滩地开发[J]. 山地研究, 1997, **15** (2): 114-118 [Hu FD, Tian LQ. Exploitation of debris flow waste-shoal land in Jiangjia Ravine, Yunnan province [J]. *Mount Res*, 1997, **15** (2): 114-118]
- 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004 [Tang KL. Soil and water conservation in China [M]. Beijing: Science Press, 2004]
- Rippl W. Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy-transport-reaction (ETR) model [J]. *Ecol Mod*, 1995, **78** (1/2): 61-76
- 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 吕晓男. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 60-65 [Xu JM, Zhang GL, Xie ZM, Lü XN. Indicators and evaluation of soil quality [M]. Beijing: Science Press, 2010: 60-65]
- 王道杰, 崔鹏, 朱波, 韦方强. 蒋家沟高含沙水流泥沙特性与泥石流滩地的改良[J]. 山地学报, 2003, **21** (6): 745-751 [Wang DJ, Cui P, Zhu B, Wei FQ. Sediment properties of hyper concentrated flow and the improved effects of on debris flow waste-shoal land in the Jiangjia Ravine [J]. *J Mount Sci*, 2003, **21** (6): 745-751]
- 严旭升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1998: 123-174 [Yan XS. Research method of soil fertility [M]. Beijing: Agriculture Press, 1998: 123-174]
- 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 271-340 [Guan SY. Soil enzymes and its methodology [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 271-340]
- 刘世梁, 傅伯杰, 陈利顶, 丘君, 吕一河. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较[J]. 长江流域资源与环境, 2003, **12** (5): 422-426 [Liu SL, Fu BJ, Chen LD, Qiu J, Lv YH. Comparison of two quantitative methods in assessing soil quality in different land uses [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2003, **12** (5): 422-426]
- 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 1999, **19** (2): 174-178 [Zhang QF, Song YC, You WH. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang province [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (2): 174-178]
- 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 林仲桂, 宋光桃, 陈志阳, 赵林峰. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. 生态学报, 2014, **34** (10): 2693-2701 [Yang N, Zou DS, Yang MY, Lin ZG, Song GT, Chen ZY, Zhao LF. Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with Purple Soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (10): 2693-2701]
- 李林海, 邱丽萍, 梦梦. 黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 应用生态学报, 2012, **23** (12): 3355-3360 [Li LH, Qiu LP, Meng M. Responses of soil enzyme activities to re-vegetation in gully Loess Plateau of Northwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23** (12): 3355-3360]
- 薛莲, 刘国彬, 戴全厚, 党小虎, 周萍. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J]. 自然资源学报, 2007, **22** (1): 20-27 [Xue J, Liu GB, Dai QH, Dang XH, Zhou P. Effect of different vegetation restoration models on soil microbial biomass in Eroded Hilly Loess Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2007, **22** (1): 20-27]
- 张勇, 杜华栋, 张振国, 冯川. 黄土丘陵区自然植被恢复下土壤微生物学质量演变特征[J]. 水土保持研究, 2014, **21** (1): 6-17 [Zhang Y, Du HD, Zhang ZG, Feng C. Evolution characteristics of soil biological property in Loss Hilly Region under natural vegetation restoration [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2014, **21** (1): 6-17]
- 王丽艳, 韩有志, 张成梁, 裴宗阳. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J]. 生态学报, 2011, **31** (21): 6429-6441 [Wang LY, Han YZ, Zhang CL, Pei ZY. Reclaimed soil

- properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (21): 6429-6441]
- 25 胡曰利, 吴晓芙, 王尚明, 陈孝, 杨伟东. 桉树人工林地有机物和养分库的衰退及防治[J]. 中南林学院学报, 2000, **20** (4): 36-40 [Hu YL, Wu XF, Wang SM, Chen X, Yang WD. The degradation and protection of soil organic matter and nutrient pool under artificial *Eucalyptus* forest [J]. *J Centr South For Univ*, 2000, **20** (4): 36-40]
 - 26 Molinero J, Pozo J. Impact of a *Eucalyptus* (*Eucalyptus globulus* Labill.) plantation on the nutrient content and dynamics of coarse particulate organic matter (CPOM) in a small stream [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **528** (1): 143-165
 - 27 Ferreira VE, Gulis V, Pozo JG. *Eucalyptus* plantations affect fungal communities associated with leaf-litter decomposition in Iberian streams [J]. *Archiv Fuer Hydro*, 2006, **166** (4): 467-490
 - 28 马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 王江磊. 黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应[J]. 生态学报, 2013, **33** (19): 6238-6334 [Ma ZM, Lv YH, Sun FX, Wang JL. Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (19): 6238-6334]
 - 29 王莉, 张强, 牛西午, 杨治平, 张建杰. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15** (4): 53-56 [Wang L, Zhang Q, Niu XW, Yang ZP, Zhang JJ. Effects of different land-uses on soil physical and chemical properties in the Loess Plateau of Shanxi Province [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2007, **15** (4): 53-56]
 - 30 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 胡树平. 玉米秸秆深翻还田对土壤有益微生物和土壤酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28** (7): 138-143 [Sa RL, Gao JL, Yu XF, Hu SP. Effect of straw-deep incorporation on soil beneficial microorganism and soil enzyme activities [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2014, **28** (7): 138-143]
 - 31 刘定辉, 舒丽, 陈强, 陈尚洪, 陈红琳, 朱钟麟. 秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17** (2): 158-161 [Liu DH, Shu L, Chen Q, Chen SH, Chen HL, Zhu ZL. Effects of straw mulching and little- or zero-tillage on microbial diversity and biomass C and N of alluvial soil in Chengdu Plain, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, **17** (2): 158-161]
 - 32 孟品品, 刘星, 邱慧珍, 张文明, 张春红, 王蒂, 张俊莲, 沈其荣. 连作马铃薯根际土壤真菌种群结构及其生物效应[J]. 应用生态学报, 2012, **23** (11): 3079-3086 [Meng PP, Liu X, Qiu HZ, Zhang WM, Zhang CH, Wang D, Zhang JL, Shen QR. Fungal population structure and its biological effect in rhizosphere soil of continuously cropped potato [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23** (11): 3079-3086]
 - 33 刘苹, 赵海军, 万书波, 任海霞, 李瑾, 杨力, 于淑芳. 连作对花生根系分泌物化感作用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19** (3): 639-644 [Li P, Zhao HJ, Wan SB, Ren HX, Li J, Yang L, Yu SF. Effect of continuous cropping on allelopathy of peanut root exudates [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2011, **19** (3): 639-644]
 - 34 邢会琴, 肖占文, 闫吉智, 马建仓, 孟嫣. 玉米连作对土壤微生物和土壤主要养分的影响[J]. 草业科学, 2011, **28** (10): 1777-1780 [Xing HQ, Xiao ZW, Yan JZ, Ma JC, Meng Y. Effects of continuous cropping of maize on soil microbes and main soil nutrients [J]. *Pratac Sci*, 2011, **28** (10): 1777-1780]
 - 35 王俊华, 胡君利, 林先贵, 朱安宁, 戴珏, 王军涛, 李晶. 耕作方式对潮土碳氮磷转化相关微生物学性状的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (5): 868-872 [Wang JH, Hu JL, Lin XG, Zhu AN, Dai Y, Wang JT, Li J. Effects of tillage mangement on microbiological characteristics related to transformation of carbon, nitrogen, and phosphorus in luvu-aquic soil [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (5): 868-872]
 - 36 徐佩, 王玉宽, 邓玉林. 岷江不同土地利用方式下紫色土有机碳总储量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13** (2): 205-208 [Xu P, Wang YK, Deng YL. Soil organic carbon storage of purplish soil in different land uses in the Minjiang River, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (2): 205-208]
 - 37 王树起, 韩晓增, 乔云发, 王守宇, 许艳丽. 不同土地利用方式对三江平原湿地土壤酶分布特征及相关肥力因子的影响[J]. 水土保持学报, 2007, **21** (4): 150-153, 192 [Wang SQ, Han XZ, Qiao YF, Wang SY, Xu YL. Characteristics of soil enzyme activity and fertility under different types of land use in wetland of Sanjiang Plain [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **21** (4): 150-153, 192]