

蒋家沟泥石流频发区不同植被类型与土壤养分及酶的关系*

严思维^{1,2} 杜 锐^{1,2} 陈爱民^{1,2} 林勇明^{1,2**} 邓浩俊^{1,2} 张广帅^{1,2} 吴承祯^{1,2,3} 洪 伟^{1,2}

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过程与经营重点实验室 福州 350002

³武夷学院生态与资源工程学院 南平 354300

摘 要 不同植被类型区内的植物群落结构与土壤养分、土壤酶活性具有耦合关系,为揭示泥石流频发区土壤养分及酶活性对地上植被的响应规律,运用野外调查和实验室分析相结合的方法,研究云南蒋家沟泥石流频发区扭黄茅草地 (*Heteropogon contortus*)、坡柳灌丛 (*Salix myrtillacea*) 以及9年、15年和26年新银合欢纯林5种典型样地群落结构、土壤养分、土壤酶活性及其关系。结果显示:植物多样性指数排序为坡柳灌丛>扭黄茅草地>26年新银合欢纯林>15年新银合欢纯林>9年新银合欢纯林;扭黄茅草地和坡柳灌丛的土壤有机质(OM)显著大于不同林龄的新银合欢纯林($P < 0.05$);扭黄茅草地和坡柳灌丛的C:P和N:P大于不同林龄新银合欢纯林;植物多样性指数(辛普森指数、香农-维纳指数)与土壤有机质、蔗糖酶(Invertase)呈现显著的正相关($P < 0.05$);且有机质和蔗糖酶呈现极显著的正相关($P < 0.01$)。本研究表明,多样性指数高的地上植被群落有助于泥石流频发区积累土壤肥力,可一定程度地提高土壤生物活性。(表8图1参36)

关键词 泥石流频发区;植物多样性;土壤有机质;土壤蔗糖酶活性

CLC Q948.113

The effects of vegetation type on soil nutrients and enzymes in Jiangjia Gulley with frequent debris flow*

YAN Siwei^{1,2}, DU Kun^{1,2}, CHEN Aimin^{1,2}, LIN Yongming^{1,2**}, DENG Haojun^{1,2}, ZHANG Guangshuai^{1,2}, WU Chengzhen^{1,2,3} & HONG Wei^{1,2}

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

²Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

³College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China

Abstract Plant community structure, soil nutrients and soil enzyme activity have a coupling relationship in relation to the vegetation types. This research aimed to find the relationship between structure of plant community and soil nutrients and enzymes in an area with frequent debris flow. We took as the main research object of 5 typical vegetation types in the Jiangjia Gulley including *Heteropogon contortus*, *Salix myrtillacea* and *Leucaena leucocephala* of 9 years, 15 years and 26 years. We analyzed the characteristics and correlation of plant diversity with soil nutrients and soil enzyme activity by methods of field investigation and laboratory analysis. The results showed a sequence of plant diversity as *Salix myrtillacea* > *Heteropogon contortus* > 26-year *Leucaena leucocephala* > 15-year *Leucaena leucocephala* > 9-year *Leucaena leucocephala*. The contents of the soil organic matter, the C:N and C:P were all higher in *Heteropogon contortus* and *Salix myrtillacea* than in *Leucaena leucocephala* of all three ages ($P < 0.05$). The Simpson and Shannon-Wiener plant diversity indices showed a significant positive correlation with soil organic matter and *Invertase* ($P < 0.05$). Finally, the organic matter showed an extremely significant positive correlation with *Invertase* ($P < 0.01$). The results indicated that higher plant diversity index in different vegetation communities can help the accumulation of soil fertility and can improve soil biological activity in areas with frequent debris flow.

Keywords areas of debris flow; plant diversity; soil organic matter; soil invertase activity

收稿日期 Received: 2015-06-03 接受日期 Accepted: 2015-08-11

*国家自然科学基金项目(41201564)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), and the Youth Science and Technology Foundation of Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University (6112C039Q)

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

作为植物在一定生境条件下所构成的总体,植物群落(Plant community)与土壤间的关系一直是生态学研究领域的热点问题^[1]。植物多样性是受环境中各种干扰影响的最直观表征,也是植物群落应对各种干扰的主要指示剂^[2],在水土保持、水源涵养及生态系统的固碳过程中起着重要的作用^[3]。一方面,植被通过枯落物的养分归还及根际分泌物对土壤性质产生作用,另一方面,植物也制约着土壤中营养元素的富集和再分配;地表植被覆盖可通过防止或减轻水土流失引起的养分损失,进而间接影响土壤肥力特征;同样,土壤肥力状况也会对植物的生理生态学性状、群落物种组成等产生影响^[4]。因此,研究植被与土壤肥力之间的相互作用关系,有助于了解植被-土壤系统协同演替特征,进而为制定植物多样性保育对策、生态恢复工程措施等提供科学依据。近年来,大量学者已开展植被与土壤间关系的研究,主要涉及了土壤对植被群落类型的影响^[5-6]、坡地植被的土壤特征^[7]、不同植被类型的土壤养分分布特征和肥力评价^[8-9]、植物根系与土壤关系^[10]、灾害点人工治理植被与土壤肥力关系^[11]等方面,而这些研究主要涉及土壤对植被或植被对土壤的单方面影响机制,研究对象侧重于单一类型群落的土壤特性,对于区域内坡地植物多样性与土壤养分以及土壤酶活性间的耦合关系研究甚少,对促进当地水土流失防治、生态系统正向演替以及加强土地管理等方面的指导性尚存不足。

蒋家沟流域地形陡峻,山地海拔高差大,地下水矿化度高,且气候多样(涵盖干热河谷区、中山半湿润区、亚高山湿润区3种气候类型)。在复杂的地质地貌特征和气候特征的双重影响下,该地区生态系统脆弱性、土壤侵蚀严重破碎化明显,流域内泥石流频发。另一方面,长期的毁林开荒、烧炭炼铜、过度放牧、陡坡开垦、开矿弃渣、筑路引水等人为干扰进一步诱发老泥石流沟复活,新泥石流沟丛生,生物多样性锐减,进而加剧了本区生态系统的脆弱化^[12]。基于泥石流频发区日趋恶化的植被-土壤条件,郭灵辉^[10]和王志兵^[13]等探讨了本区土壤抗侵蚀性及土壤团聚性特征,张广帅等分析了不同海拔梯度植物群落与土壤性质的协同演变规律^[14-15],并针对不同土地利用类型下的泥石流滩地肥力特征^[16]进行了报道。然而,在泥石流频发区生态脆弱环境下土壤性质对不同植被群落的响应规律却尚未见报道,区域内植被恢复效果了解不足,不利于后期区域生态恢复工作的开展。鉴于此,我们主要对蒋家沟地区退化坡地上分布的扭黄茅草本、坡柳灌木、不同林龄新银合欢乔木3种群落结构和土壤肥力的关系进行研究,阐明植被-土壤系统间的相互作用关系,进而揭示不同植被类型对土壤肥力的影响机制,为干热河谷地区

脆弱生态系统土地资源的合理利用、植被的快速恢复和生态重建提供一定的理论依据。

1 研究区域

研究区位于云南省昆明市东川区境内的蒋家沟小流域,地理坐标为103°06'-103°13'E、26°13'-26°17'N。蒋家沟属金沙江一级支流小江流域,地表径流量大^[17],为小江泥石流形成区和水源动力补给区。蒋家沟地貌类型为侵蚀中山,海拔1 042-3 269 m,干湿季分明,5-10月为湿季,降水量占全年降水量的88%。低于1 600 m为干热河谷带^[18],这里的多年平均气温在20℃以上,最高气温40.9℃,最低气温-6.2℃;多年平均降水量为693 mm,平均蒸发量为3 638 mm,蒸发量约是降水量的5倍^[19]。在长期的水土流失和泥石流作用下,该区域石漠化严重,土壤为含砾石较高的初育土。

2 研究方法

2.1 野外调查取样

在蒋家沟泥石流频发区,根据流域内地貌条件、植被类型、土地利用状况进行调查,选择中国科学院东川泥石流观测站西侧具有多种植被类型且土地利用频繁的堆积坡面作为研究单元。研究区坡面坡度约为30°,坡向为北东方向,土壤为初育土。在该坡面选取不同林龄新银合欢乔木林地、坡柳灌丛、扭黄茅草地3种植被类型进行样地调查和土壤取样(表1),由于坡柳灌丛和扭黄茅草地样地成片分布且较为接近,故海拔相差较小。3种植被类型除草地以外,其它均为人工栽植。在本研究前期通过大量实地勘察,最后选取9年生、15年生和26年生新银合欢人工恢复林为乔木调查样地,但由于9年生新银合欢连续分布的最大面积仅600多m²(约30 m × 20 m),为了避免影响实验结果,最后均把15年生和26年生林地样地设置为30 m × 20 m;其中15年生和26年生样地间隔约20 m,9年生与15年生、26年生样地间隔约50 m,具体概况见表1。每个林龄划分3个10 m × 10 m样方,在每个小样方内划分3个2 m × 2 m样方进行林下草本层调查以及土壤采样。选取的坡柳地为5年生、平均高度约为1.2 m,样地面积为20 m × 20 m,并从中划分3个5 m × 5 m的样方,采集土样。选取的草地的主要优势种为扭黄茅(*Heteropogon contortus*)和铁扫帚(*Clematis hexapetala*),草地的样地面积为10 m × 10 m,从中划分3个2 m × 2 m的样方,采集土样。在每种植被类型的样方内,按“梅花”型选取5个点,每个点去除地表枯

表1 样地内植被概况

Table 1 Vegetation characteristics of the surveyed plots

样地 Sampling plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 (h/m) Elevation	平均盖度 (r/%) Coverage	主要物种 Main species
扭黄茅草地 <i>Heteropogon contortus</i>	103°08'04"	26°14'34"	1468.2	87.4	扭黄茅、铁扫帚、拟金茅、荩草等 <i>Heteropogon contortus</i> , <i>Clematis hexapetala</i> Pall, <i>Eulaliopsis binata</i> , <i>Arthraxon hispidus</i> , etc.
坡柳灌丛 <i>Salix myrtillicea</i>	103°08'05"	26°14'34"	1418.6	80.7	扭黄茅、菱叶藜、苦蒿、新银合欢幼苗等 <i>Heteropogon contortus</i> , <i>Chenopodium bryoniifolium</i> Bunge, <i>Herba Acroftili Repentis</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> , etc.
新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i>	103°07'57"	26°14'46"	1489.2	80.0	新银合欢幼苗、黄背草等 <i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Themeda triandra</i> , etc.

落物后,取表层土(0-20 cm),然后均匀混合,装入标记好的自封袋内带回实验室分析。

2.2 样品测定

将所取土壤样品去除细根、杂物后置于实验室通风处进行风干,过2 mm土壤筛为测定有效磷、水解氮、过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、pH,过0.149 mm筛用于测定有机质、全氮、全磷。

其中有机质(OM)采用重铬酸钾-外加热法;全氮(TN)为凯氏定氮法;全磷(TP)为碱熔-钼锑抗显色法测定;水解性氮(AN)为碱解-扩散法;有效磷(AP)为盐酸-硫酸浸提法。蔗糖酶(Invertase)为3,5-二硝基水杨酸比色法;脲酶(Urase)采用苯酚钠-次氯酸钠比色法;磷酸酶(Phosphatase)采用磷酸苯二钠比色法;过氧化氢酶(Catalase)为紫外分光光度法,所有土壤酶显色液均在酶标仪(INFINITE M200 Pro)相应波长下进行吸光值测定。另外土壤pH利用pH计(STARTER3100)测定。

2.3 数据处理

植物多样性选取指标为均匀度指数、香农多样性指数和优势度指数,具体计算公式如下:

均匀度指数: $J = H/\log_2 S$

Shannon-Wiener指数: $H = -\sum (P_i \log_2 P_i)$

Simpson指数: $D = \sum (P_i)^2$

式中, $P_i = N_i/N$, N_i 为第*i*个物种个体数, N 为样方内总个体数。

物种的重要值=(相对多度+相对高度+相对盖度)/3

运用Excel 2003进行数据处理及图形绘制。运用单因素(One-way ANOVA)方差分析和LSD进行不同植被类型区间各指标参数的显著性检验和多重比较,用 $P < 0.05$ 或者 $P < 0.01$ 表示;运用双变量相关分析中Pearson相关分析进行植物群落结构和土壤生化指标参数间相关性分析;土壤养分特征对植被群落结构的响应规律运用一元线性回归分析进行拟合,随后进行显著性检验。以上分析均在SPSS19.0下进行。

3 结果与分析

3.1 地上植物群落结构分析

各样地灌草群落植被调查如表2所示,不同林龄新银合欢中新银合欢幼苗所占比例较大,重要值分别为54.72%、30.52%和30.82%;除有少部分扭黄茅外,新银合欢群落较为简单,存在着发展为单一优势群落的趋势,不利于当地

表2 灌草丛植被调查

Table 2 Vegetation characteristics of shrubs and bushes

样地类型 Sampling plot	植被 Vegetation	属 Genus	科 Family	习性 Habit	相对盖度 Relative coverage	相对多度 Relative abundance	相对高度 Relative height	重要值 Importance value
9 a新银合欢林地 <i>Leucaena leucocephala</i> of 9 years	新银合欢幼苗 <i>Leucaena leucocephala</i>	银合欢属 <i>Leucaena Benth</i>	豆科 Leguminosae	灌木 Shrub	75.57	21.48	67.11	54.72
	黄背草 <i>Themeda triandra</i>	菅属 <i>Themeda</i>	禾本科 Gramineae	草本 Herbaceous	11.38	19.01	25.39	18.59
	小叶荩草 <i>Arthraxon lancifolius</i>	荩草属 <i>Arthraxon Beauv</i>	禾本科 Gramineae	草本 Herbaceous	0.54	34.00	0.13	11.56
	多花芫子梢 <i>Campylotropis polyantha</i>	芫子梢属 <i>Campylotropis Bunge</i>	豆科 Leguminosae	草本 Herbaceous	10.83	19.43	3.42	11.23
	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	扭黄茅属 <i>Heteropogon contortus</i>	牧草科 Andropogon	草本 Herbaceous	1.68	6.07	3.95	3.90
	其他 Other							0.00
新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i>	新银合欢幼苗 <i>Leucaena leucocephala</i>	银合欢属 <i>Leucaena Benth</i>	豆科 Leguminosae	灌木 Shrub	27.44	8.70	55.41	30.52
	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	扭黄茅属 <i>Heteropogon contortus</i>	牧草科 Andropogon.	草本 Herbaceous	47.77	12.43	24.14	28.11
	剑麻 <i>Agave sisalana</i>	龙舌兰属 <i>Agave</i>	龙舌兰科 Agave	灌木 Shrub	13.55	64.74	0.24	26.18
	黄背草 <i>Themeda triandra</i>	菅属 <i>Themeda</i>	禾本科 Gramineae	草本 Herbaceous	11.24	14.13	20.21	15.19
	其他 Other							0.00
	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	扭黄茅属 <i>Heteropogon contortus</i>	牧草科 Andropogon	草本 Herbaceous	78.57	31.52	58.07	56.05
26 a新银合欢林地 <i>Leucaena leucocephala</i> of 26 years	新银合欢幼苗 <i>Leucaena leucocephala</i>	银合欢属 <i>Leucaena Benth</i>	豆科 Leguminosae	灌木 Shrub	17.85	44.72	29.91	30.82
	黄背草 <i>Themeda triandra</i>	菅属 <i>Themeda</i>	禾本科 Gramineae	草本 Herbaceous	3.59	23.76	12.02	13.12
	其他 Other							0.00

续表2 灌草丛植被调查
Table 2 Vegetation characteristics of shrubs and bushes

样地类型 Sampling plot	植被 Vegetation	属 Genus	科 Family	习性 Habit	相对盖度 Relative coverage	相对多度 Relative abundance	相对高度 Relative height	重要值 Importance value
坡柳灌丛 <i>Salix myrtillacea</i>	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	扭黄茅属 <i>Heteropogon contortus</i>	牧草科 Andropogon	草本 Herbaceous	78.45	20.34	19.13	39.3
	苦蒿 <i>Acroptilon repens</i>	顶羽菊属 <i>Acroptilon Cass</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herbaceous	14.45	38.98	19.85	24.43
	新幼 <i>Leucaena leucocephala</i>	银合欢属 <i>Leucaena Benth</i>	豆科 Leguminosae	灌木 Shrub	1.65	13.56	6.38	7.2
	菱叶藜 <i>Chenopodium bryoniifolium</i>	藜属 <i>Chenopodium</i>	藜科 Chenopodiaceae	草本 Herbaceous	2.06	5.08	10.93	6.03
	凌霄花 <i>Campsis grandiflora</i>	凌霄属 <i>Campsis</i>	紫葳科 Bignoniaceae	草本 Herbaceous	0.83	3.39	9.56	4.59
	牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	稃属 <i>Eleusine</i>	禾本科 Gramineae	草本 Herbaceous	0.04	1.69	10.93	4.22
	波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i>	山蚂蝗属 <i>Desmodium Desv.</i>	豆科 Leguminosae	草本 Herbaceous	0.83	3.39	8.2	4.14
	婆婆纳 <i>Veronica didyma</i>	婆婆纳属 <i>Veronica</i>	玄参科 Scrophulariaceae	草本 Herbaceous	0.41	3.39	6.83	3.54
	扁蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	蓼属 <i>Chenopodium</i>	蓼科 Chenopodiaceae	草本 Herbaceous	0.83	6.78	2.73	3.45
	剑麻 <i>Agave sisalana</i>	龙舌兰属 <i>Agave</i>	龙舌兰科 Agave	灌木 Shrub	0.41	1.69	2.73	1.61
	其他 Other							1.47
扭黄茅草地 <i>Heteropogon contortus</i>	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	扭黄茅属 <i>Heteropogon contortus</i>	牧草科 Andropogon	草本 Herbaceous	78.45	20.34	19.13	54.4
	铁扫帚 <i>Clematis hexapetala</i>	铁线莲属 <i>Clematis</i>	毛茛科 Ranunculaceae	草本 Herbaceous	14.45	38.98	19.85	17.02
	小叶荩草 <i>Arthraxon lancifolius</i>	荩草属 <i>Arthraxon Beauv</i>	禾本科 Gramineae	草本 Herbaceous	1.65	13.56	6.38	8.39
	新银合欢幼苗 <i>Leucaena leucocephala</i>	银合欢属 <i>Leucaena Benth</i>	豆科 Leguminosae	灌木 Shrub	2.06	5.08	10.93	4.77
	苦蒿 <i>Acroptilon repens</i>	顶羽菊属 <i>Acroptilon Cass</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herbaceous	0.83	3.39	9.56	3.32
	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	地榆属 <i>Sanguisorba</i>	蔷薇科 Rosaceae	草本 Herbaceous	0.04	1.69	10.93	3.23
	九头狮子草 <i>Peristrophe japonic</i>	观音草属 <i>Peristrophe</i>	爵床科 Acanthaceae	草本 Herbaceous	0.83	3.39	8.2	2.99
	假杜鹃 <i>Barleria cristata</i>	假杜鹃属 <i>Barleria</i>	爵床科 Acanthaceae	草本 Herbaceous	0.41	3.39	6.83	2.24
	刺蓼 <i>Polygonum senticosum</i>	蓼属 <i>Chenopodium</i>	蓼科 Chenopodiaceae	草本 Herbaceous	0.83	6.78	2.73	2.24
	其他 Other							1.4

表3 新银合欢林地的基本概况
Table 3 Basic characteristics of the *Leucaena leucocephala* stands

林龄(<i>t/a</i>) Age	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔(<i>h/m</i>) Elevation	平均坡度(<i>a/°</i>) Average slope	平均树高(<i>h/m</i>) Average Height	平均胸径(<i>h/cm</i>) Average DBH
9	103°08'01"	26°14'41"	1399.1	28.5	7.38	5.28
15	103°08'00"	26°14'43"	1352.4	33.9	9.72	7.43
26	103°07'49"	26°14'53"	1314.9	26.8	12.15	10.21

生物多样性的保护. 坡柳灌丛主要以扭黄茅、苦蒿和新银合欢幼苗(新幼)占优势, 分别为39.30%、24.43%和7.2%; 扭黄茅草地则以扭黄茅、铁扫帚、小叶荩草占较大优势, 分别为54.4%、17.02%和8.39%. 表3为不同林龄新银合欢林地的基本概况.

3.2 不同植被类型植物多样性特征

对不同样地下植物多样性指数的分析(表4)可知, 不同林龄新银合欢林地间的植被多样性指数呈现出由林龄增大而递增趋势, 且26年生和15年生的植被多样性变化较大; 扭黄茅草地和坡柳灌丛间各项指数关系差异不大, 大小关系

表4 不同样地的植物多样性指数

Table 4 Plant diversity indices for the plots of 5 vegetation types

类型 Sampling plot	优势度指数 Simpson	香农维纳指数 Shannon-Wiener	均匀度指数 Pielou
9 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 9 years	0.3103	0.5012	0.5115
15 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 15 years	0.3202	0.5235	0.5802
26 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 26 years	0.4559	0.6967	0.8293
扭黄茅草地 <i>Heteropogon contortus</i>	0.7281	1.4812	0.8805
坡柳灌丛 <i>Salix myrtilleacea</i>	0.7422	1.5254	0.8811

表现为坡柳灌丛的优势度指数、香农维纳指数、均匀度指数均略大于扭黄茅草地；从整体来看，植物多样性各个指数体现出灌木群落>草地群落>乔木群落的趋势。

3.3 不同植被类型土壤性质及其生态化学计量特征

对不同样地土壤性质分析(表5)可知,扭黄茅草地和坡柳灌丛的土壤有机质含量大于新银合欢纯林且含量差异显著($P < 0.05$),9年的新银合欢纯林全磷、有效磷含量大于其余4种样地,且与扭黄茅草地和坡柳灌丛差异显著($P < 0.05$),其余含量则无显著差异性;在扭黄茅草地和坡柳灌丛之间,除全氮为坡柳灌丛大于扭黄茅草地外,有机质、水解氮、全磷、有效磷均表现为扭黄茅草地大于坡柳灌丛,但差异性均不显著。不同林龄新银合欢纯林养分含量间,26年

新银合欢纯林养分含量普遍低于其他林龄新银合欢纯林。

不同样地土壤生态化学计量比的变化规律明显,碳氮比和氮磷比呈现出扭黄茅草地和坡柳灌丛大于各个林龄新银合欢纯林,且关系显著;扭黄茅草地和坡柳灌丛之间碳氮比和碳磷比均为扭黄茅草地大于坡柳灌丛,且无显著关系。不同样地间土壤N:P变化规律不明显;不同林龄新银合欢间的化学计量也无显著差异性。

3.4 不同植被类型土壤酶活性

对不同样地土壤胞外酶活性和土壤pH的结果(表6)表明,3种植被类型间过氧化氢酶无明显规律,9年新银合欢纯林最大,而26年新银合欢纯林最小;而磷酸酶的含量则为不同林龄新银合欢纯林>坡柳灌丛>扭黄茅草地。脲酶的含量呈现出坡柳灌丛最高;蔗糖酶含量最高的为坡柳灌丛,其次为扭黄茅草地,二者显著大于各个林龄的新银合欢纯林。所有植被类型的土壤pH均呈现出碱性的特征,但扭黄茅草地的pH偏中性。

3.5 植物多样性与土壤养分、土壤酶活性的关系

通过Pearson相关性分析对植物多样性、土壤养分和土壤酶活性分析(表7)可得,土壤养分与地上植物群落结构之间,有机质和优势度指数、香农维纳指数呈现显著正相关($P < 0.05$),其线性回归拟合如图1所示;水解氮和均匀度指数、植被盖度极呈现显著负相关($P < 0.01$),全磷与均匀度指数呈现显著的负相关($P < 0.05$)。全氮和有效磷则与植被的4种

表5 不同样地的土壤性质和化学计量比

Table 5 Soil properties and stoichiometric conditions for the plots of 5 vegetation types

类型 Sampling plot	有机质OM (w/g kg ⁻¹)	全氮TN (w/g kg ⁻¹)	水解氮AN (w/mg kg ⁻¹)	全磷TP (w/g kg ⁻¹)	有效磷AP (w/mg kg ⁻¹)	C:N	C:P	N:P
9 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 9 years	49.39 ± 3.60b	4.34 ± 0.22a	264.65 ± 32.33a	1.03 ± 0.06a	106.39 ± 3.63a	6.62 ± 0.50b	27.84 ± 1.15b	4.27 ± 0.34a
15 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 15 years	52.84 ± 3.77b	5.09 ± 0.40a	256.26 ± 31.17a	0.93 ± 0.03ab	47.17 ± 5.76b	6.04 ± 0.10b	33.00 ± 1.49b	5.47 ± 0.30a
26 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 26 years	41.22 ± 3.45b	3.63 ± 0.25a	152.53 ± 13.32a	0.88 ± 0.09ab	61.09 ± 4.08b	6.58 ± 0.24b	27.14 ± 2.03b	4.12 ± 0.25a
扭黄茅草地 <i>Heteropogon contortus</i>	95.84 ± 5.37a	4.06 ± 0.28a	162.09 ± 13.71a	0.83 ± 0.02b	55.08 ± 2.07b	13.88 ± 1.17a	66.62 ± 2.56a	4.90 ± 0.44a
坡柳灌丛 <i>Salix myrtilleacea</i>	91.05 ± 3.19a	4.51 ± 0.10a	157.24 ± 22.8a	0.82 ± 0.02b	44.74 ± 7.13b	11.70 ± 0.20a	64.45 ± 0.91a	5.51 ± 0.03a

字母不同表示不同群落类型间差异显著($P < 0.05$)。

Lowercase letters in the same column indicate significant different at 0.05 level.

表6 不同样地的土壤酶活性和pH

Table 6 Soil enzyme activity and pH conditions in the plots of 5 vegetation types

类型 Sampling plot	过氧化氢酶 Catalase (λ/mL g ⁻¹ min ⁻¹)	磷酸酶 Phosphatase (λ/mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	脲酶 Urase (λ/mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	蔗糖酶 Invertase (λ/g kg ⁻¹ h ⁻¹)	pH
9 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 9 years	13.47 ± 1.54a	90.00 ± 4.38ab	12.13 ± 1.12a	2.06 ± 0.56b	8.25 ± 0.19a
15 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 15 years	11.13 ± 1.20a	105.35 ± 6.13a	26.65 ± 1.24a	1.67 ± 0.40b	8.43 ± 0.28a
26 a新银合欢纯林 <i>Leucaena leucocephala</i> of 26 years	6.47 ± 3.32a	94.38 ± 3.10ab	19.76 ± 1.97a	1.96 ± 1.90b	8.11 ± 0.10a
扭黄茅草地 <i>Heteropogon contortus</i>	10.57 ± 1.28a	62.20 ± 7.62b	14.60 ± 1.83a	4.94 ± 0.54a	7.51 ± 0.15b
坡柳灌丛 <i>Salix myrtilleacea</i>	8.61 ± 1.20a	82.68 ± 9.36ab	28.53 ± 5.81a	5.47 ± 0.33a	8.10 ± 0.09a

字母不同表示不同群落类型间差异显著($P < 0.05$)。

Lowercase letters in the same column indicate significant different at 0.05 level.

指标无显著相关性. 土壤胞外酶与地上植物群落结构之间, 过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶与植物多样性均没有显著的相关性; 蔗糖酶则与Simpson指数、香农维纳指数有极显著的正相关 ($P < 0.01$); 其线性回归拟合如图1所示. 在土壤养分与土壤生物胞外酶活性之间, 有机质与蔗糖酶间呈现极显著的正相关 ($P < 0.01$).

表7 植物多样性指数、土壤养分和土壤酶活性三者的关系
Table 7 The correlation of plant diversity with soil nutrient and soil enzyme activity

项目 Item	优势度指数 Simpson	香农维纳指数 Shannon-Winner	均匀度指数 Pielou	盖度 Coverage	有机质 OM	全氮 TN	水解氮 AN	全磷 TP	有效磷 AP	过氧化氢酶 Catalase	磷酸酶 Phosphatase	脲酶 Urase	蔗糖酶 Invertase
优势度指数 Simpson	1	0.992**	0.895*	0.818	0.903*	-0.274	-0.814	-0.875	-0.539	-0.12	-0.845	0.187	0.961**
香农维纳指数 Shannon-Winner		1	0.833	0.74	0.948*	-0.172	-0.735	-0.836	-0.52	-0.048	-0.835	0.193	0.986**
均匀度指数 Pielou			1	0.969	0.635	-0.521	-0.981**	-0.939*	-0.631	-0.442	-0.737	0.23	0.742
盖度 Coverage				1	0.517	-0.713	-0.985**	-0.832	-0.457	-0.355	-0.771	0.017	0.642
有机质 OM					1	0.066	-0.493	-0.697	-0.453	0.116	-0.794	0.142	0.962**
全氮 TN						1	0.647	0.215	-0.205	0.021	0.501	0.518	-0.093
水解氮 AN							1	0.872	0.541	0.456	0.676	-0.174	-0.637
全磷 TP								1	0.847	0.582	0.616	-0.479	-0.746
有效磷 AP									1	0.812	0.184	-0.77	-0.425
过氧化氢酶 Catalase										1	-0.182	-0.694	0.082
磷酸酶 Phosphatase											1	0.342	-0.798
脲酶 Urase												1	0.175
蔗糖酶 Invertase													1

*: 在0.05上相关性显著; **: 在0.01相关性极显著.
* Significant correlation at 0.05 level; ** Significant correlation at 0.01 level.

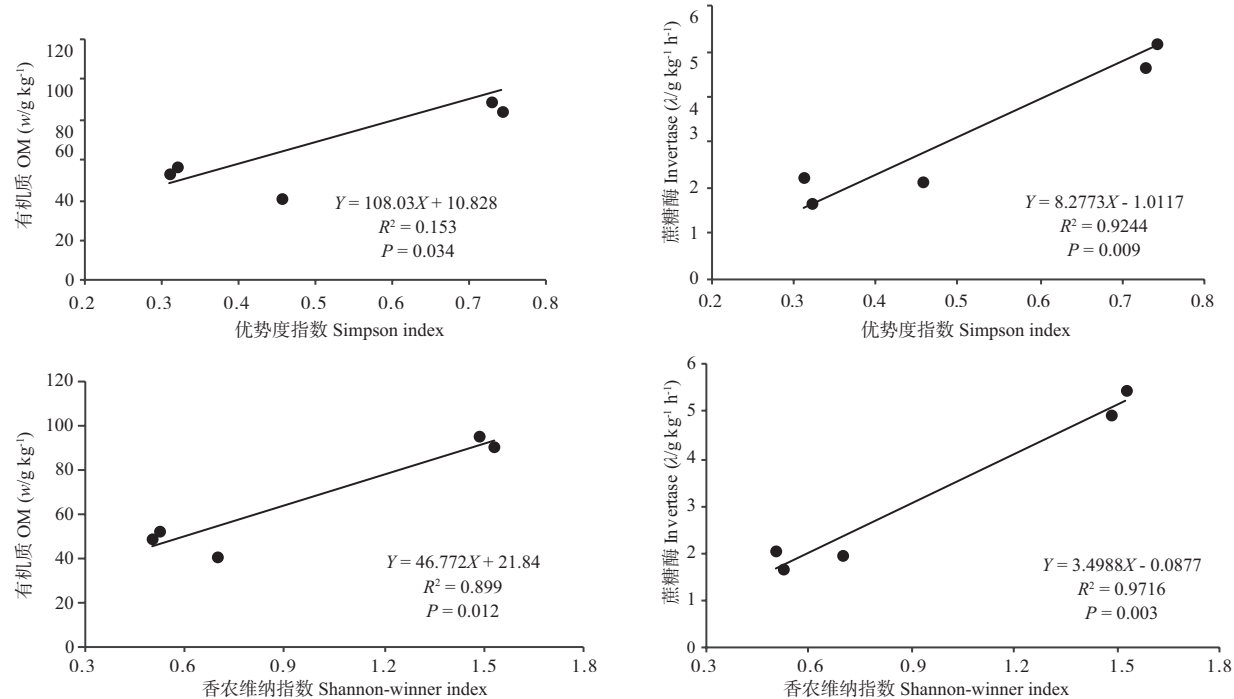


图1 植被多样性与有机质和蔗糖酶间的关系.
Fig. 1 Relationship of vegetation diversity with nutrient and invertase.

3.6 植物多样性与土壤C:N:P化学计量特征的关系

对植物多样性与土壤C:N:P化学计量特征的分析表明, C:N、C:P均与优势度指数呈现显著正相关($P < 0.05$); 且C:N、C:P均与香农维纳指数指数呈现极显著正相关($P < 0.01$), 其线性回归拟合表8所示。而N:P与植物多样性指数各项指数均没有显著的相关性。

表8 植物多样性指数与化学计量线性回归拟合

Table 8 Correlation between plant diversity and stoichiometry

变量X	变量Y	回归方程	R^2	P
Variable X	Variable Y	Regression equation		
优势度指数 Simpson	C:N	$y = 15.870x + 0.8492$	0.8829	0.016*
香农维纳指数 Shannon-Winner	C:N	$y = 6.688x + 2.6400$	0.9223	0.006**
优势度指数 Simpson	C:P	$y = 88.236x - 1.3090$	0.8796	0.018*
香农维纳指数 Shannon-Winner	C:P	$y = 37.705x + 8.1557$	0.9448	0.005**

*: 在0.05上相关性显著; **: 在0.01相关性极显著。

*Significant correlation at 0.05 level; **Significant correlation at 0.01 level.

4 结论与讨论

4.1 土壤养分对地上植物群落结构的响应

有研究表明, 不同的植被类型对土壤养分有着重要的影响^[20], 且植物多样性随着土壤肥沃程度的增加而增加^[21]。本研究表明, 扭黄茅草地、坡柳灌丛、9年新银合欢纯林、15年新银合欢纯林、26年新银合欢纯林5种不同样地下, 土壤的有机质与优势度指数、香农维纳指数呈现明显的正相关(表7)。这与前人的关于植被与养分变化趋势的研究结果^[22]一致, 这种趋势与植被多样性高、盖度大的群落特征密切相关: 一方面其减少了研究区域内的土壤侵蚀和养分的流失; 另一方面, 大量植物残体、根系等分泌物的存在也增加了向土壤输入有机质的量, 而土壤养分的大量提升又促进植物生长发育^[21]。

本文研究表明成熟(15年)新银合欢纯林的氮元素含量大于坡柳灌丛和扭黄茅草地氮元素含量。这与翁伯琦等人得出植被恢复过程中氮含量为林地>灌木>草地的研究结果^[23]一致。而26年新银合欢纯林的全氮、水解氮含量却普遍最小。这与胡娟娟关于植被恢复过程中均显著提高氮元素含量的结论^[3]相悖。造成这种现象的原因, 一方面可能是由于9年和15年新银合欢其根系属于发育阶段, 根系发展尚未成熟, 根瘤菌固氮能力及的土壤中N含量足够供应该时期的新银合欢氮素需求; 而26年新银合欢根系已成熟, 根瘤菌活性可能较9年和16年低, 且土壤硝化作用产生的氮素为植物根系大量吸收, 土壤的氮消耗大于氮积累, 导致全氮、水解氮的含量减小^[10]; 另一方面, 研究区域所属的干热河谷蒸发量较大, 土壤对植被的承载力低, 自我调节能力弱, 对外界扰动反馈敏感, 易滑坡, 导致新银合欢老林的土壤养分普遍不足^[24]; 再加上新银合欢单一纯林的人工群落也不利于该区域养分的循环和积累。灌丛和扭黄茅草地由上世纪90年代当地群众的弃耕地演变而成, 发育至今, 其生长良好, 扰动少, 碳氮含量较老龄(26年)新银合欢纯林高, 其每年大量的凋落

物归还土壤, 也能为土壤提供了丰富的有机质和氮^[25-26]。因此, 在本研究区域内灌草群落更适用于当地的水土涵养和植被恢复。

4.2 土壤生态化学计量比对地上植物群落结构的响应

土壤中的C:N:P化学计量特征对生物固氮、植被演替以及生物多样性都有一定的影响^[27]。土壤碳氮比能影响土壤分解速度, 而土壤碳磷比通常被认为是土壤磷素矿化能力的标志, 对植物生长发育具有重要影响^[27-28]。本研究表明, 土壤C:N与植被多样性指数(优势度指数、香农维纳指数)均呈显著正相关, 即地上植物群落多样性影响着土壤中碳元素和氮元素的构成比例。究其原因, 不同林龄的新银合欢纯林C:N比值较低, 则其分解速度较快, 矿化水平较高, 造成土壤有机层的有效氮含量相对较高。而扭黄茅草地和坡柳灌丛的C:N比值较高, 分解速度也就越慢, 养分积累能力相对较强, 有利于土壤良性发展。本研究中, C:P与植物多样性各个指数均呈显著正相关, 这与王建林关于高寒草原土壤碳氮比与植被盖度的研究结果^[29]相一致。总体而言, 灌草群落所覆盖的区域具有更高植物多样性和土壤养分含量, 而人为种植不同林龄新银合欢纯林更适合研究区域的背景条件。

4.3 土壤生物胞外酶活性对地上植物群落结构的响应

植物可直接或间接地影响土壤胞外酶的含量^[30-31]。已有研究表明, 蔗糖酶是表征土壤碳素循环和土壤生物化学性质的酶, 对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用^[32]。本研究表明蔗糖酶与植物多样性指数(优势度指数、香农维纳指数)均呈现出显著的正相关性; 灌草群落中土壤蔗糖酶的活性相对较高, 而不同林龄新银合欢的土壤蔗糖酶活性相对较低, 且各个林龄间的差异不显著, 这与杨承栋等研究得出灌木和草本植物种类和多样性的提高能使促进土壤酶活性, 进而提高土壤肥力的结论^[33]相一致; 而蔗糖酶与有机质间极显著的正相关关系印证有机质高的土壤蔗糖酶活性强的结论^[34]。但本研究中, 植物多样性指数与过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶的活性均无显著相关性(表7), 与前人得出物种多样性增加可引起大多数土壤酶活性升高的结论^[35]相反。究其原因, 一方面可能是由于本研究区内各群落形成年龄组成不同, 群落成熟度较差, 造成植被对土壤养分含量和土壤酶活性的促进作用较弱, 凋落物和根系种类、数量和质量通过影响土壤动物和微生物的营养源, 改变了土壤酶的活性^[36], 表现出明显的随机性; 另一方面, 新银合欢对土壤养分的需求过大以及研究区坡地土壤承载能力不足, 造成不同林龄土壤酶活性与植被多样性的变化趋势存在差异, 最终导致其相关性不显著。因此, 对其生态学过程与群落成熟度的关系有待于进一步深入研究。

本研究仅对土壤肥力与植物多样性关系初步关系进行分析, 未开展动态性监测研究, 故要进一步认识该地区土壤养分与植物多样性的相互关系, 还需进行长期性的监测。鉴于以上研究结果, 在泥石流频发区脆弱山地生态系统的恢复过程中, 应当充分考虑植被与土壤之间的关系, 选择适应性较好、水土保持能力较强、利于土壤养分循环的本地物种, 以促进区域内土壤—植被系统的良性发展。

参考文献 [References]

- Guisan A, Zimmermann NE. Predictive habitat distribution models in ecology [J]. *Geol Model*, 2000, **135**: 297-313
- White PS. Pattern, Process and natural disturbance in vegetation [J]. *Bot Rev*, 1979, **45**: 229-299
- 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 [Hu CJ, Guo L. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration [J]. *Ecol Environ*, 2012, **21** (9): 1640-1646]
- 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): 1-4 [Wang GL, Liu GB, Xu MX. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of Loess Hilly Region [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2002, **22** (1): 1-4]
- Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia [J]. *J Veg Sci*, 2001, **12**: 53-60
- Kosmas C, Gerontidis S, Marathanou M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece) [J]. *Catena*, 2000, **40**: 51-68
- 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (6): 1561-1568 [Liu Y, Song TQ, Cai DS, Zeng FP, Peng WX, Du H. Soil fertility characteristics under different land use patterns in depressions karst hills [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25** (6): 1561-1568]
- 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 马克明. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2003, **23** (3): 414-420 [Liu SL, Fu BJ, Lv YH, Chen LD, Ma KM, Du H. Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (3): 414-420]
- 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2014, **34** (9): 2297-2307 [Li JP, Xu BF, Su ZY, Sun YD, Hu YQ. Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (9): 2297-2307]
- 郭灵辉, 王道杰, 张云红, 陈东. 蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系[J]. 中国水土保持, 2010, **12**: 46-49 [Guo LH, Wang DJ, Zhang YH, Chen D. The relationship between soil nutrient distribution and fine root of plantation of *Leucaena leucocephala* in the area with high-frequency debris flow [J]. *Soil Water Conserv China*, 2010, **12**: 46-49]
- 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]
- 林勇明. 金沙江小流域景观格局变化与土壤侵蚀的耦合作用[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2008 [Lin YM. Study on interactions of landscape change and soil erosion in the typical watershed of Jinsha River [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2008]
- 王志兵, 汪稔, 郑郎, 吕士展. 蒋家沟泥石流源区土壤团聚体微结构与结构性[J]. 中国水土保持科学, 2010, **8** (6): 27-31 [Wang ZB, Wang N, Zheng Y, Lü SZ. Microstructure and structural character of soil aggregates in triggering area of Jiangjiagou torrent stream, Yunnan Province [J]. *Soil Water Conserv. China*, 2010, **8** (6): 27-31]
- 张广帅, 邓浩俊, 俞伟, 林勇明, 马瑞丰, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (4): 646-654 [Zhang GS, Deng HJ, Yu W, Lin YM, Ma RF, Wang DJ, Wu CZ, Hong W. Vertical gradient analysis of soil environmental factors and vegetation community in mountain areas of frequent debris flow: a case study in the Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (4): 646-654]
- 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016, **36** (3) DOI: 10.5846/stxb201405060892 [Zhang GS, Deng HJ, Du K, Lin YM, Ma RF, Yu W, Wang DJ, Wu CZ, Hong W. Soil stoichiometry characteristic at different elevation gradient of the mountain in the area with high frequency debris flow—A case study in Xiaojiang watershed, Yunnan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (3) DOI: 110.5846/stxb201405060892]
- 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 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, Du 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 For Environ*, 2014, **34** (3): 214-219]
- 林勇明, 崔鹏, 王道杰, 葛永刚, 柯春燕. 泥石流频发区人工新银合欢林群落特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, **7** (6): 63-67 [Lin YM, Cui P, Wang DJ, Ge YG, Ke CY. Community characteristic of plantation of *Leucaena leucocephala* in the area with high-frequency debris flow [J]. *Soil Water Conserv China*, 2009, **7** (6): 63-67]
- 张有富. 云南蒋家沟泥石流区干热退化山地引种拟金茅的技术与效果[J]. 山地学报, 2000, **18** (6): 563-567 [Zhang YF. Technology and effect of introduction of *Heteropogon contortus* in the dry-hot mountain areas of frequent debris flow, Yunnan [J]. *J Mount Sci*, 2000, **18** (6): 563-567]
- 崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应: 以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学, 2005, **3** (3): 60-64 [Cui P, Wang DJ, Wei FQ. Model and effect of ecological restoration of dry-hot valley: a case study of the CAS Dongchuan debris flow observation station [J]. *Soil Water Conserv China*, 2005, **3** (3): 60-64]
- 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, **27** (2): 603-612 [Wei XR, Shao MA. Distribution of slope soil nutrients at a small watershed on the gully region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (2): 603-612]
- 张华彬. 蓟县不同防护林植物多样性及其土壤理化性质研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011 [Zhang HB. Research on Plant Diversity and soil Physical and chemical Properties under different Shelter forests in Jixian [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011]
- Brosofske KD, Chen J, Crow TR. Understory vegetation and site factors:

- Implications for a managed Wisconsin landscape [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **146**: 75-87
- 23 翁伯琦, 郑祥洲, 丁洪, 王煌平. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, **24** (12): 3610-3616 [Weng BQ, Zheng XZ, Ding H, Wang HP. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24** (12): 3610-3616]
 - 24 柴宗新, 范建容. 金沙江干热河谷植被恢复的思考[J]. *山地学报*, 2001, **19** (4): 381-384 [Cai ZX, Fan JR. Study on the restoration of vegetation in arid-hot valleys along the Jinshajiang River [J]. *J Mount Sci*, 2001, **19** (4): 381-384]
 - 25 张萍, 郭辉军, 刀志灵, 龙碧云. 高黎贡山土壤微生物生化活性的初步研究[J]. *土壤学报*, 2000, **37** (2): 275-279 [Zhang P, Guo HL, Dao ZL, Long BY. Preliminary study on soil biochemical activities in Gaoligong Mountains [J]. *Acta Pedol Sin*, 2000, **37** (2): 275-279]
 - 26 史衍玺, 唐克丽. 人为加速侵蚀下土壤治疗的生物学特性变化[J]. *水土保持学报*, 1998, **14** (1): 28-40 [Shi YX, Tang KL. Changes of biological characteristics of soil quality under man-made accelerated erosion [J]. *J. Soil Water Conserv*, 1998, **14** (1): 28-40]
 - 27 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, **28** (8): 37-47 [Wang SQ, Yu GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *J Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (8): 37-47]
 - 28 吴建国, 韩梅, 裴伟, 艾丽, 常学向. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究[J]. *草业学报*, 2007, **16** (6): 39-46 [Wu JQ, Hang M, Chang W, Ai L, Chang XX. The mineralization of soil nitrogen and its influenced factors under alpine meadows in Qilian Mountains [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2007, **16** (6): 39-46]
 - 29 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. *草业学报*, 2014, **23** (2): 9-19 [Wu JL, Zhong ZM, Wang ZH, Yu CQ, Shen ZX, Zhang XZ, Hu XX, Dacizhuoga. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems on the Qinhai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2014, **23** (2): 9-19]
 - 30 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986 [Guan SY. *Soil Enzyme and Study Methods* [J]. Beijing: Agriculture Press, 1986]
 - 31 Castellano SD, Dick RP. Influence of cropping and sulfur fertilization transformations of sulfur in soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, **1**: 283-285
 - 32 王平, 马忠明, 包兴国, 孙景玲, 王德权, 杜少平. 长期不同施肥方式对小麦玉米间作土壤蔗糖酶活性的影响[J]. *农业现代化研究*, 2009, **30** (5): 611-614 [Wang P, Ma ZM, Bao XG, Sun JL, Wang DQ, Du SP. Effect of chemical fertilizer and organic fertilizer long-term application on soil *Invertase* activity in wheat and maize intercropping system [J]. *Reas Agric Modern*, 2009, **30** (5): 611-614]
 - 33 杨承栋, 焦如珍. 杉木人工林根际土壤性质变化的研究[J]. *林业科学*, 1999, **35** (6): 2-9 [Yang CD, Jiao RZ. Research on the change of soil properties in Chinese fir plantation roots [J]. *Sci Silv Sin*, 1999, **35** (6): 2-9]
 - 34 魏雅丽, 郭芬芬, 陈安强, 南岭, 刘刚才. 元谋干热河谷植被恢复对土壤酶活性的影响特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30** (1): 100-106 [Wei YL, Guo FF, Chen AQ, Nan L, Liu GC. Effects of vegetation restoration on soil enzyme activity in Yuanmou dry-hot vally, China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, **30** (1): 100-106]
 - 35 肖德荣, 田昆, 张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J]. *生态学报*, 2008, **28** (7): 3116-3124 [Xiao DR, Tian K Zhang LQ. Relationship between plant diversity and soil fertility in Napahai wetland of Northwestern Yunnan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (7): 3116-3124]
 - 36 Hooper DU, Bignell DE, Dangerfield JM, Brussaard L, Wall DH, Wardle D. Interactions between above and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: patterns, mechanisms, and feedbacks [J]. *Bioscience*, 2000, **50** (12): 1049-1061