

# 嘉陵江流域不同类型植被多样性与 土壤养分和酶活性的关系

杨秉珣, 刘 泉, 王 彬

(绵阳师范学院 资源环境工程学院, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:**基于 2013—2015 年对嘉陵江流域中游(四川段)不同植被类型(混交林、草甸、针叶林、阔叶林、灌丛和裸地)多样性和土壤生境的调查分析数据,采用相关分析法和群落排序法研究不同植被类型土壤养分和酶活性分布特征及其与植被多样性之间的关系。结果表明:嘉陵江流域不同植被多样性指数、丰富度指数、优势度指数和植被盖度基本表现为乔木林>灌木林>草甸>裸地,裸地显著低于其他植被类型( $p<0.05$ )。嘉陵江流域除了裸地和灌丛,其他植被类型土壤 pH 值均显酸性,pH 值与土壤容重变化趋势相一致,基本表现为:裸地>灌木林>乔木林>草甸,裸地显著高于其他植被类型( $p<0.05$ )。嘉陵江流域土壤养分、有效养分含量和酶活性基本表现为乔木林>灌木林>草甸>裸地,裸地显著低于其他植被类型( $p<0.05$ )。相关性分析表明:植被多样性与土壤养分和酶活性密切相关,是造成不同植被类型土壤养分差异的重要原因,土壤养分和酶活性在一定程度上决定了植被丰富度和多样性指数,土壤理化性质在一定程度上决定了植被优势度指数,而土壤全碳和全氮在一定程度上决定了植被盖度。冗余分析结果显示丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度之间均呈正相关,与土壤养分和酶活性呈正相关,与 pH 值和土壤容重呈负相关,这与相关分析的结果相一致。

**关键词:**嘉陵江流域;植被类型;多样性;土壤养分;土壤酶活性

中图分类号:Q142;Q945

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0045-07

## Relationships Between Soil Nutrients, Soil Enzyme Activity and Plant Diversity of Different Types of in Jialing River Basin, Sichuan

YANG Bingxun, LIU Quan, WANG Bin

(School of Resource and Environmental Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China)

**Abstract:** We present a comprehensive analysis of soil nutrients of different types of plant diversity in Jialing River Basin from 2013 to 2015, based on the plant diversity and soil habitat, the relationships between the plant diversity and soil nutrients has been studied by correlation analysis and redundancy analysis. The results are as follows. (1) The plant diversity index, richness index, dominance index and coverage showed the order: arbor> shrub> meadow> bare land, and bare land was significantly lower than other plant types ( $p<0.05$ ). (2) The soil bulk density and pH value had the same variation trend which showed the sequence: bare land> meadow> shrub> arbor, and soils of different plant types were acidic except shrub and bare land. (3) The soil nutrients, available nutrients and soil enzyme activity showed the order: arbor> shrub> meadow> bare land, and bare land was significantly lower than other plant types ( $p<0.05$ ). (4) Correlation analysis showed that the plant diversity had a significantly positive correlation with soil nutrients and enzyme activity, which was the important cause of different plant types of soil nutrient. Soil nutrients and enzyme activity determined the plant richness and diversity to a certain extent, and soil physical and chemical properties determined the plant dominance, while soil total carbon and total nitrogen determined the plant coverage

收稿日期:2015-12-05

修回日期:2016-01-04

资助项目:绵阳师范学院博士科研启动项目(QD2014A002);中国博士后科学资助项目(2014M562338);生态安全与保护四川省重点实验室开放项目“ESP1409 基于 GIS 的龙门山北段区域土地利用景观格局演变及其生态效应评价”

第一作者:杨秉珣(1975—),男,四川绵阳人,讲师,研究方向:水土保持与生态环境。E-mail: Bingxun\_yang@163.com

通信作者:刘泉(1978—),男,江苏丰县人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:人文地理与土地资源。E-mail: Liu\_quan78@126.com

to a certain extent in this study. (5) Redundancy analysis indicated that there was the positive correlation between plant coverage, richness index, diversity index and dominance index, also had a positive correlation with soil nutrients and enzyme activity, while had a negative correlation with pH value and soil bulk density which was the same as the above results.

**Keywords:** Jialing River Basin; plant type; plant diversity; soil nutrients; soil enzyme activity

土壤是地下生态系统中的重要组成部分,重要的自然资源维持着陆地生态系统健康,同时也能够促进植物根系的生长和土壤酶活性等生态过程<sup>[1-2]</sup>;土壤酶活性是土壤有机质和养分转化和循环的动力,它促进土壤有机质的分解、腐殖质的形成、土壤养分循环等过程<sup>[3]</sup>;土壤养分在有机质的分解和转化过程中起着主导作用,影响着土壤生态系统中能量流动和物质循环,并且能够反映出土壤质量及健康状况等<sup>[4]</sup>。植物多样性是影响和决定生态系统结构和功能多样性的重要因素之一,也影响着植物群落结构组成和稳定土壤基质及其养分库<sup>[5-6]</sup>。而土壤和植被作为地上和地下生态系统的一部分,二者相辅相成、互相影响,土壤系统为植被生长提供必需的营养物质,反过来植被的生长又可改善土壤系统的结构和养分<sup>[5-6]</sup>。因此,植物与土壤的关系不仅是植物生态学研究的重要内容,也是整个生态环境研究的重要内容,也是植被恢复重建的重要理论基础。

四川嘉陵江流域地貌类型复杂多变,是我国土地利用类型多样化的重要区域,长期以来受到自然和高强度人类活动的影响,山洪暴发、泥石流灾害以及水质污染等问题日益突出,尤其是严重的水土流失使其生态系统相当脆弱<sup>[7]</sup>。自1998年长江特大洪水灾害以来,该流域的生态环境逐渐引起人们重视,但近年来的研究范围主要集中在该流域土壤侵蚀<sup>[8]</sup>、泥沙变化和变迁<sup>[9]</sup>、遥感植被与气候变化等<sup>[7]</sup>,而对于流域植被多样性及其与土壤养分之间关系的研究却甚少。因此,本文以四川嘉陵江中游流域不同植被类型为研究对象,连续3 a的数据分析不同植被类型土壤养分和酶活性及其对植被的响应,为该流域的综合治理和生态环境的监测评估提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

嘉陵江(102°35′36″—109°01′08″E, 29°17′30″—34°28′11″N)是长江水系中流域面积最大的支流,发源于秦岭南麓,向西南流经陕西、甘肃、四川、重庆4省,于重庆市汇入长江,全长1 120 km,流域面积 $1.598 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,属亚热带季风气候,年均降水 $1.494 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,水土流失较为严重,侵蚀面积占到52.14%,是长

江各大支流中水土流失较严重的区域,整个流域由嘉陵江干流、渠江和涪江3大水系构成。嘉陵江流域的地貌类型复杂多样,地层以中生界侏罗系红色岩层分布最广。土壤类型主要有黄壤土、紫色土、水稻土、冲积土、潮土和红壤等。流域大部分地区属亚热带湿润季风气候,四季分明,雨水充沛,年内降水主要集中在5—10月,其中7—9月降水量可占全年的50%以上,上游年降水量约600~800 mm,中下游约1 000 mm,多年平均径流量约 $7 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。由于复杂的地貌类型、充沛的降水和易侵蚀的土壤等自然环境及强烈的农业生产活动,嘉陵江中下游地区则是长江流域的重点土壤侵蚀地区 and 环境保护区域<sup>[7]</sup>。

### 1.2 试验设计

1.2.1 样地设置 根据嘉陵江中游流域特点和植被划分原则,采用《中国植被图集》的划分标准,将整个流域内的植被景观划分为针叶林、混交林、阔叶林、灌丛、草甸、裸地等6类,布设 $6 \times 3 = 18$ 个样地(面积由植被类型决定)。采用多样性指数、丰富度指数和优势度指数3个指标。多样性指数主要用来反映植物的丰富程度,是植物丰富度和均匀程度的综合反映,多样性指数越高,群落的物种多样性越丰富。均匀度是植物分布均匀程度的反映,在一个群落中,各个种的相对密度越均匀,即各物种的个体数很接近,均匀度值越高。丰富度是群落物种多样性丰富程度的反映,当个体数量一定时,物种数越多。

采样时间为2013—2015年8月中旬(植被生长旺盛期),数据为连续3 a的平均值(定点采样),根据其植被划分,每个植被类型选取3个样地,每个样地布设5个样方,为了保证取样的一致性,所取样的土壤坡度均小于5°,同时保证其海拔和生境基本一致,对于草本和裸地,每个样地面积 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,每个样地按“S”曲线设置5个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方,测定指标主要包括物种数的盖度、高度和密度并计算其重要值和多样性指数;对于灌丛,3个样地面积为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ,样方面积为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ;对于乔木林,3个样地面积为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ ,样方面积为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ;计算公式如下<sup>[10]</sup>:

Patrick 丰富度指数(S)

Shannon-Wiener 多样性指数(H):  $H = -\sum P_i \ln P_i$

Simpson 优势度指数( $D$ ): $D=1-\sum(P_i)^2$   
式中: $S$  代表样方内物种数目; $P_i$  为样方内种的相对  
重要值;相对重要值( $P_i$ )=(相对覆盖度+相对高度

+相对多度)/3。此外,为了比较不同类型植被多样  
性指数间的关系,方差分析和多重比较用来检验它们  
之间的差异显著性。

表 1 嘉陵江中游流域植被景观基本信息

项目	优势物种组成	林地类型	土壤类型	平均海拔	地理位置
针叶林	冷杉、落叶松	寒温带和温带山地针叶林	暗棕土	872	岷县
混交林	冷杉、青冈、毛栗	亚热带山地针叶、落叶阔叶混交林	红壤	523	绵阳
阔叶林	青冈、毛栗	温带落叶阔叶林	暗红壤	1230	广元
灌丛	金银花、凤尾竹	亚热带和热带竹林及竹丛	粘质土	462	绵阳
草甸	狗尾草、虎尾草	禾草、杂类草草甸	草甸土	725	万源
裸地	零散杂草	荒地(盖度 0~5)	灰钙土	638	万源

采用四分法在每个样方内取样(保留 1 kg 左  
右),采用五点取样法,取样深度为 0—20 cm 混合土  
样(除去表层的枯落物层),充分混匀后用无菌塑料袋  
4℃保温箱保存,并迅速带回实验室内分析测定,所取  
土样分为 2 份,一份新鲜土样过 40 目筛后测定土壤  
酶活性,一份自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过  
80 目筛后测定土壤养分和理化性质<sup>[11]</sup>。

1.2.2 土壤样品的测定 土壤酶活性的测定:转化  
酶采用水解还原比色法;蔗糖酶活性采用 3,5-二硝  
基水杨酸比色法;脲酶活性采用苯酚钠比色法;过氧  
化氢酶活性采用高锰酸钾容量法,其活性以 1 g 土壤  
的 0.1 mol/L KMnO<sub>4</sub> 毫升数表示。

土壤 pH 值采用电极电位法(2.5:1 水土比浸提  
液);土壤电导率采样电导法;容重和孔隙度采用环刀  
法;全碳和全氮采用元素分析仪;速效磷采用 NaHCO<sub>3</sub>  
浸提—钼锑抗比色法;碱解氮采用 NaOH—H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 法;  
全钾和有效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法;土壤  
有效锌采用 DTPA 提取—原子吸收光谱法。

2 结果与分析

2.1 嘉陵江流域不同植被多样性

由图 1 可知,嘉陵江流域植被丰富度指数指数变  
化范围为 1~8,其大小依次表现为:混交林>草甸>  
针叶林>阔叶林>灌丛>裸地,混交林和草甸差异并  
不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<$   
0.05),而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );  
多样性指数变化范围为 0.05~0.56,其大小依次表  
现为:混交林>草甸>针叶林>阔叶林>灌丛>裸  
地,混交林和草甸显著高于其他植被类型( $p<$   
0.05),针叶林和阔叶林之间差异不显著( $p>0.05$ ),  
而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );优势度  
指数变化范围为 0.06~0.38,其大小依次表现为:针  
叶林>灌丛>阔叶林>草甸>混交林>裸地,针叶林  
也灌丛之间差异不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植

被类型( $p<0.05$ ),而裸地则显著低于其他植被类型  
( $p<0.05$ );植被盖度变化范围为 2~99,其大小依次  
表现为:混交林>阔叶林>针叶林>灌丛>草甸>裸  
地,混交林、针叶林和阔叶林之间差异并不显著( $p>$   
0.05),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),而裸地则  
显著低于其他植被类型( $p<0.05$ )。

2.2 嘉陵江流域不同植被土壤性质

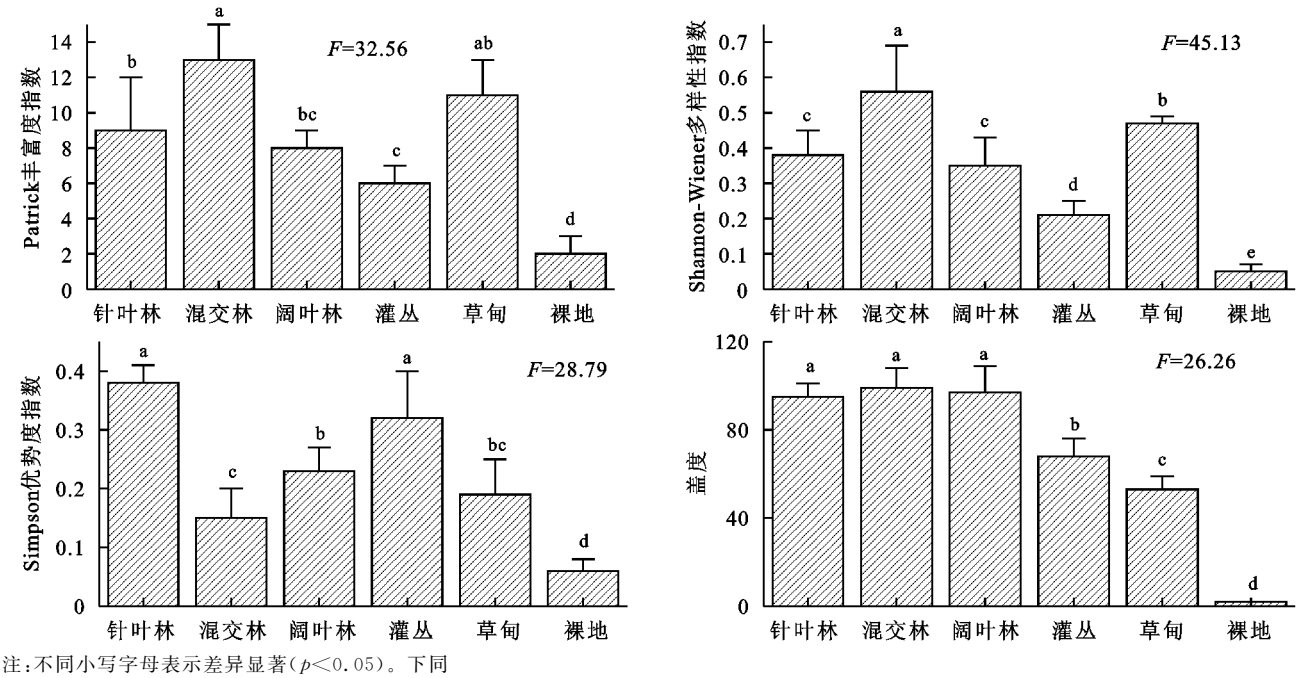
由图 2 可知,嘉陵江流域不同植被土壤理化性质  
具有明显差别,除了裸地和灌丛,嘉陵江流域不同植  
被土壤 pH 值略显酸性,依次表现为:裸地>灌丛>  
针叶林>阔叶林>混交林>草甸;电导率基本与 pH  
值呈相反的变化规律,其变化范围为 72.3~95.3  
μS/cm<sup>2</sup>,依次表现为:混交林>草甸>阔叶林>针叶  
林>灌丛>裸地;土壤容重变化范围为 0.87~1.32  
g/cm<sup>3</sup>,依次表现为:裸地>草甸>灌丛>阔叶林>  
针叶林>混交林;土壤孔隙度变化范围为 36.4%~  
42.3%,依次表现为:混交林>针叶林>灌丛>阔叶  
林>草甸>裸地。

2.3 嘉陵江流域不同植被土壤养分

由表 2 可知,嘉陵江流域不同植被土壤养分具有  
明显差异,不同植被类型土壤全碳变化范围为 11.37  
~19.56 g/kg,依次表现为:混交林>阔叶林>针叶  
林>灌丛>草甸>裸地,混交林和阔叶林差异并不显  
著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),而  
裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );全氮变化  
范围为 1.24~1.69 g/kg,依次表现为:混交林>阔  
叶林>针叶林>草甸>灌丛>裸地,混交林显著高于  
其他植被类型( $p<0.05$ ),针叶林、阔叶林、灌丛和草  
甸之间差异并不显著( $p>0.05$ ),而裸地则显著低于  
其他植被类型( $p<0.05$ );全钾变化范围为 28.26~  
55.64 g/kg,依次表现为:混交林>阔叶林>针叶林  
>灌丛>草甸>裸地,混交林显著高于其他植被类型  
( $p<0.05$ ),针叶林和阔叶林之间差异并不显著( $p>$   
0.05),而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );

碱解氮变化范围为 41.25~69.26 mg/kg,依次表现为:混交林>阔叶林>针叶林>灌丛>草甸>裸地,混交林、针叶林和阔叶林显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );速效磷变化范围为 23.63~49.25 mg/kg,依次表现为:阔叶林>混交林>针叶林>灌丛>草甸>裸地,混交林和阔叶林之间差异不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );有效钾变化范围为

35.21~66.98 mg/kg,依次表现为:混交林>阔叶林>针叶林>灌丛>草甸>裸地,混交林和阔叶林显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),针叶林、灌丛和草甸之间差异不显著( $p>0.05$ ),而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );有效锌变化范围为 11.24~16.95 mg/kg,依次表现为:混交林>阔叶林>针叶林>灌丛>裸地>草甸,混交林和阔叶林之间差异不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),裸地和草甸之间差异不显著( $p>0.05$ )。



注:不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ )。下同

图 1 嘉陵江流域不同植被多样性

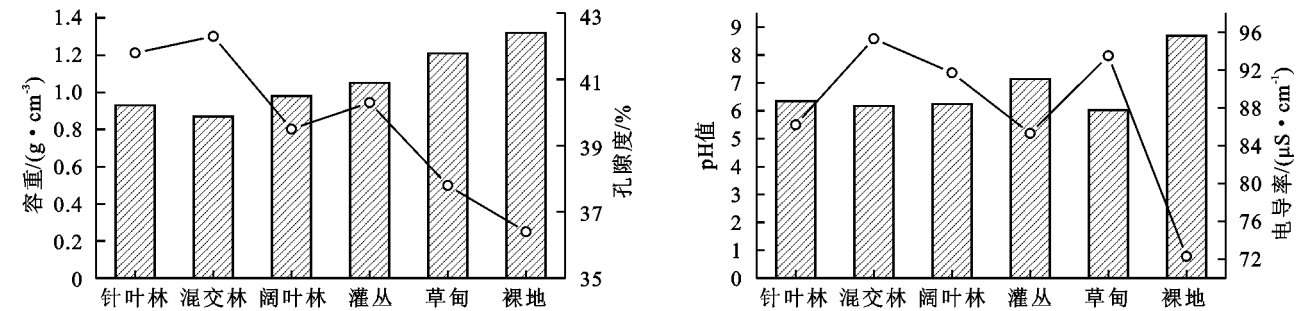


图 2 嘉陵江流域不同植被土壤性质

表 2 嘉陵江流域不同植被土壤养分

项目	全碳 TC/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮 TN/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全钾 TK/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解氮 AN/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷 AP/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效钾 AK/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效锌 AZ/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
针叶林	16.78±2.25b	1.54±0.26b	42.18±3.69b	55.25±6.23c	34.17±2.56b	43.29±6.69c	13.58±1.02b
混交林	19.56±3.14a	1.69±0.37a	55.64±4.68a	69.26±8.24a	46.59±3.17a	66.98±825a	16.95±1.65a
阔叶林	18.25±1.58a	1.62±0.15b	43.57±5.12b	64.79±6.96b	49.25±2.05a	55.37±7.14b	15.17±2.36a
灌丛	15.13±2.03b	1.51±0.29b	41.23±4.85b	51.26±8.25cd	31.16±2.89b	42.15±6.25c	12.15±1.58b
草甸	15.08±2.69b	1.53±0.34b	38.47±6.25c	48.32±7.15d	26.58±3.69c	44.38±7.03c	10.37±1.05c
裸地	11.37±1.52c	1.24±0.19c	28.26±3.77d	41.25±6.28e	23.63±2.14d	35.21±5.21d	11.24±2.35bc
F 值	56.23	35.17	63.85	62.17	52.44	45.89	53.78

2.4 嘉陵江流域不同植被土壤酶活性

由图 3 可知,嘉陵江流域不同植被土壤酶活性具有明显差异,不同植被类型土壤脲酶活性变化范围为 2.5~6.9 mg/(g · 24 h),依次表现为:阔叶林>针叶林>灌丛>混交林>草甸>裸地,混交林和阔叶林显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),混交林和灌丛之间差异不显著( $p>0.05$ ),裸地和草甸之间差异不显著( $p>0.05$ );土壤转化酶活性变化范围为 2.6~6.3 mg/(g · 24 h),依次表现为:混交林>阔叶林>针叶林>灌丛>草甸>裸地,混交林、阔叶林和针叶林之间差异并不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),草甸和灌丛之间差异不显著( $p>0.05$ ),

而裸地则显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );土壤蔗糖酶活性变化范围为 0.8~2.8 mg/(g · 24 h),依次表现为:混交林>针叶林>阔叶林>草甸>灌丛>裸地,混交林和针叶林之间差异并不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),草甸和裸地之间差异不显著( $p>0.05$ ),显著低于其他植被类型( $p<0.05$ );土壤过氧化氢酶活性变化范围为 2.6~4.5, 0.1 mol/(L · h · g),依次表现为:针叶林>混交林>阔叶林>灌丛>草甸>裸地,混交林、混交林和针叶林之间差异并不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),草甸和裸地之间差异不显著( $p>0.05$ ),显著低于其他植被类型( $p<0.05$ )。

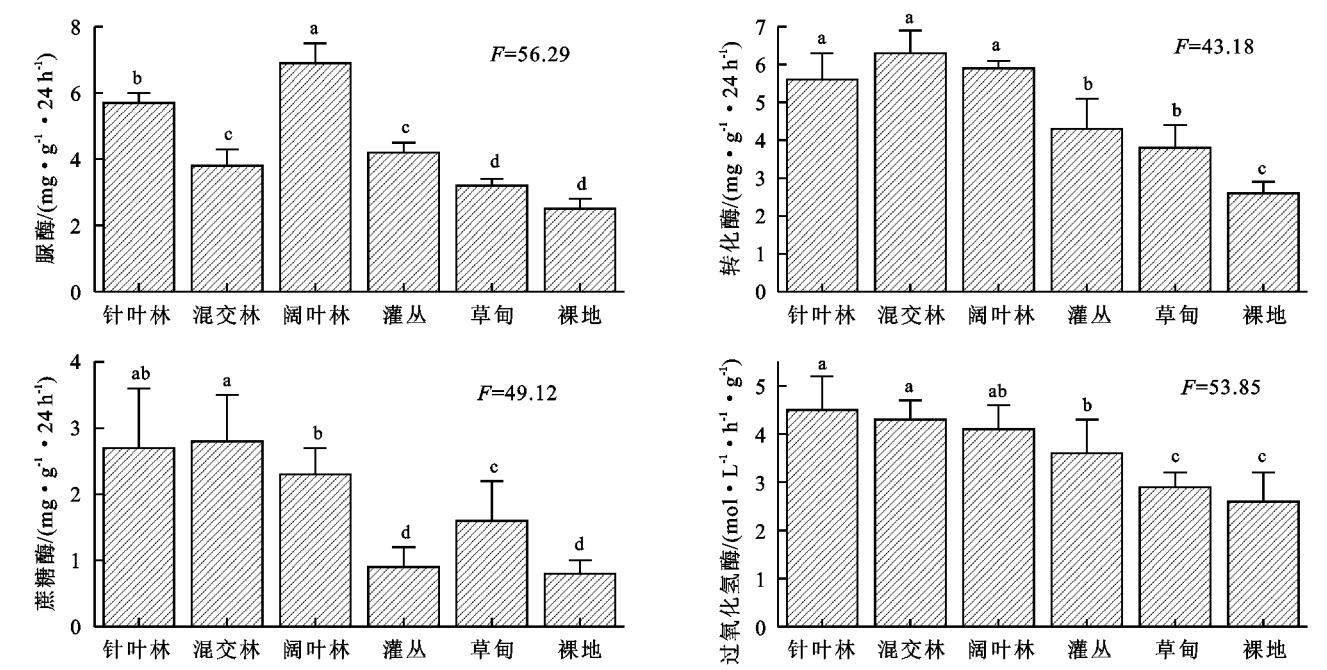


图 3 嘉陵江流域不同植被土壤酶活性

2.5 嘉陵江流域不同植被多样性与土壤养分的相关分析

为进一步研究嘉陵江流域植被多样性与土壤养分因子之间的关系,将各土壤养分因子与植被多样性分别进行 Pearson 相关分析,结果见表 3,由表可知,影响丰富度指数的主要因子是土壤 pH 值、全碳、全氮、有效养分和土壤酶活性;影响多样性指数的主要因子是土壤 pH 值、电导率、全碳、全氮、全钾、有效养分和土壤酶活性;影响优势度指数的主要因子是土壤 pH 值、电导率和容重;影响植被盖度的只有因子是土壤容重、全碳和全氮。由此可见,植被多样性与土壤养分和酶活性密切相关,是造成不同植被类型土壤养分差异的重要原因,其中土壤养分和酶活性在一定程度上决定了植被丰富度和多样性指数,土壤理化性质在一定程度上决定了植被优势度指数,而土壤全碳

和全氮在一定程度上决定了植被盖度。

2.6 嘉陵江流域不同植被多样性与土壤养分的冗余分析

冗余分析(RDA)能够客观反映群落与环境因子的相互关系,环境因子是引起植物分布差异的主要原因,为了尽可能多的把嘉陵江流域植物多样性与土壤环境因子结合在一起,更好地揭示植物多样性与土壤环境因子之间的相互关系,将植被丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度作为响应变量(Response variables),土壤理化因子、土壤养分和土壤酶活性等 15 项环境因子作为解释变量(Explaining variables),利用多元统计分析的手段(主要是 RDA),提取能够明显解释影响群落变化的指标。作为一种直接梯度排序的方法,RDA 可以在独立保持各变量对环境的贡献率的基础上,在不同的变量组合形式下进行单个变量的特征描述,并且将研

究对象和环境因子排序在一个图上(图 3 和表 4)。RDA 图能直观地显示各变量之间的相关关系,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴的相关性,箭头连线的长度表示某个环境因子与响应变量相关程度,连线越长,其相关性和贡献率越大。不同箭头夹角大小代表着响应变量与环境因子相关性程度,箭头与排序轴或者箭头与箭头之间的夹角代表着某个环境因子与排序轴或者某两个环境因子的相关性,夹角大于 90 度,则呈负相关。RDA 排序图的前 2 个排序轴特征值分别为 0.695, 0.196,第一排序轴可反映不同群落多样性与土壤因子的梯度变化特征,不同群落多样性与环境因子 2 个排序轴的相关性均为 1.000,前 2 个排序轴的特征值(变量解释率)占到了 99.25%,蒙特卡罗检验分析环境因子对群落

多样性的影响达到显著性(第一轴  $p<0.001$ ,  $F=6.98$ ; 第二轴  $p<0.001$ ,  $F=5.74$ ),因此,RDA 排序图能够很好的解释环境因子(主要是土壤养分各指标)对群落多样性的影响,同时,排序轴特征值均小于真实的特征值,可以用于解释变异程度。结果显示丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度之间均呈正相关,与土壤养分和酶活性呈正相关,与 pH 值和土壤容重呈负相关;沿着 RDA 的第 1 排序轴,随着显著性影响因子(土壤养分各指标)的增加,丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度逐渐增加,沿第 2 排序轴,随着土壤容重和 pH 值的增加,丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度逐渐降低,这与 Pearson 相关分析的结果基本一致。

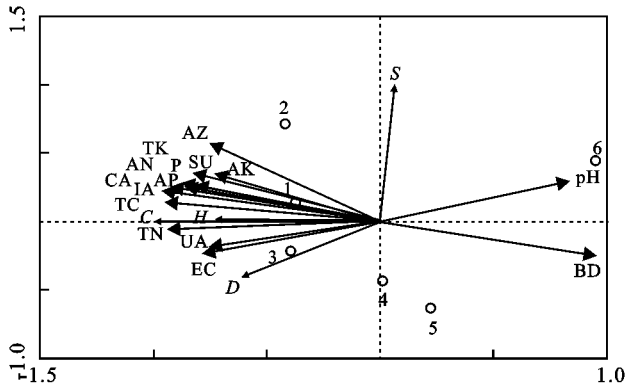
表 3 嘉陵江流域不同植被多样性与土壤养分的相关分析

项目	Patrick 丰富度指数(S)	Shannon-Wiener 多样性指数(H)	Simpson 优势度指数(D)	植被盖度(C)
pH 值	-0.856**	-0.912**	-0.785**	-0.602*
电导率(EC)	0.510*	0.358	0.678**	0.547*
容重(BD)	-0.631*	-0.787**	-0.816**	-0.689**
孔隙度(P)	0.235	0.356	0.520	0.639*
全碳(TC)	0.869**	0.874**	0.514	0.841**
全氮(TN)	0.912**	0.817**	0.496	0.699**
全钾(TK)	0.623*	0.756**	0.368	0.524
碱解氮(AN)	0.697**	0.756**	0.415	0.510
速效磷(AP)	0.723**	0.615*	0.503	0.487
有效钾(AK)	0.819**	0.756**	0.588*	0.369
有效锌(AZ)	0.855**	0.632*	0.489	0.536*
脲酶(UA)	0.795**	0.812**	0.617*	0.365
转化酶(IA)	0.912**	0.855**	0.615*	0.501
蔗糖酶(SU)	0.637*	0.814**	0.432	0.367
过氧化氢酶(CA)	0.811**	0.756**	0.301	0.544

注: \*\* 相关性在 0.01 水平上显著(双尾), \* 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

表 4 RDA 排序结果

排序轴	轴 1	轴 2
特征值	0.695	0.196
变量累积百分比		
物种数据	69.5	89.1
物种—环境关系	69.5	89.1
蒙卡罗检验	499	499
p 值	<0.001	<0.001
F 值	6.98	5.74
物种—环境相关性	1.000	1.000
变量解释	99.25	
所有特征值之和	1.000	
所有典范特征值之和	1.000	



注: 1 为针叶林;2 为混交林;3 为阔叶林;4 为灌丛;5 为草甸;6 为裸地。  
注:S 为 Patrick 丰富度指数;H 为 Shannon-Wiener 多样性指数;D 为 Simpson 优势度指数;C 为植被盖度;EC 为电导率;BD 为土壤容重;P 为孔隙度;TC 为全碳;TN 为全氮;TK 为全钾;AN 为碱解氮;AP 为速效磷;AK 为有效钾;AZ 为有效锌;UA 为脲酶;IA 为转化酶;SU 为蔗糖酶;CA 为过氧化氢酶。

图 4 嘉陵江流域不同植被多样性与土壤养分的 RDA 排序图

### 3 讨论与结论

嘉陵江流域作为长江上游支流,这使得它与其他流域有显著的区别,植物对该区土壤水分、养分具有重要的作用。土壤养分决定着嘉陵江流域生态系统的生产力及其动态变化,在一定程度上代表了该地区的主要生态循环过程,而生态系统的主要“构件”物种多样性对土壤养分变化的响应直接影响着生态系统的功能和稳定性<sup>[5-6]</sup>。针对嘉陵江流域生态系统多样性与系统稳定性的研究表明,多样性较低并不意味着系统的稳定性低,恰好一些结构简单、单种群为主构建的群落具有较高的稳定性(针叶林、阔叶林和混交林),这可能归结于生态系统独特的生境条件。

本研究结果表明,除了裸地和灌丛,嘉陵江流域不同植被土壤 pH 值略显酸性,不同土地利用类型土壤整体呈酸性(pH 值 $<7.0$ ),土壤 pH 值的变化规律与土壤养分变化规律相反,这说明土壤 pH 值对土壤养分和有效养分影响较大,可能是由于地上植物通过增加有机酸的分泌以促进植物对养分的吸收,而 pH 值的降低增加了有机酸的溶解,进而增加了土壤养分和有效养分含量,而冗余分析的结果显示土壤 pH 值和容重与土壤养分和酶活性均呈负相关,并且与植物多样性各指标之间也呈一定的负相关。大量研究表明土壤全碳与全氮呈显著正相关<sup>[12-13]</sup>,本研究发现不同类型土壤全碳与全氮呈极显著线性正相关性,土壤养分之间、土壤养分与有效养分均呈现出一定的相关性(RDA 图)。本研究得出不同植被类型土壤养分、有效养分、酶活性和植被多样性指数呈现出一致性的变化规律。表明了土壤有机质作为碳源和其他营养成分的来源,有利于微生物及酶活性活性的提高;而土壤酶活性、微生物数量与土壤有效含量之间呈显著或极显著负相关,主要是由于植物生长吸收了部分营养元素,同时植物生长导致植物根际微生物活性有所升高,这与前人的研究结果一致<sup>[14-15]</sup>。综合表 2 的结果表明,植物通过吸收地下土壤养分得以生长,而土壤微生物活动和代谢影响土壤养分及酶活性,它们之间可以看做相互作用和影响的有机整体。嘉陵江流域土壤养分、有效养分含量和酶活性基本表现为乔木林 $>$ 灌木林 $>$ 草甸 $>$ 裸地(综合表 2 和图 3),主要是由于土壤中的有机质主要来自于地表枯枝落叶层的分解补充与积累,乔木林凋落物量多,受人为扰动少,植被盖度和生物量相对较高,土壤有机质积累多分解少,因此有机质含量较高;灌木林分结构相对单一,但由于其枯枝落叶层较草甸更为丰富,因此其有机质含量高于草甸和裸地;草甸和裸地则受人类活动的影

响,地表没有积累的枯枝落叶层,有机质含量最低。

Pearson 相关性分析表明(表 3),影响丰富度指数的主要因子是土壤 pH 值、全碳、全氮、有效养分和土壤酶活性;影响多样性指数的主要因子是土壤 pH 值、电导率、全碳、全氮、全钾、有效养分和土壤酶活性;影响优势度指数的主要因子是土壤 pH 值、电导率和容重;影响植被盖度的只有因子是土壤容重、全碳和全氮。由此可见,植被多样性与土壤养分和酶活性密切相关,是造成不同植被类型土壤养分差异的重要原因,其中土壤养分和酶活性在一定程度上决定了植被丰富度和多样性指数,土壤理化性质在一定程度上决定了植被优势度指数,而土壤全碳和全氮在一定程度上决定了植被盖度,这与白永飞等<sup>[16]</sup>和李新荣等<sup>[17]</sup>研究结果一致。主要是因为随着植被覆盖度的增加,植物生长产生的枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累、矿化,植物残体腐解过程中所产生酸类物质又促进土壤中难溶性物质向有效方向转化,供植物吸收利用,最终使土壤中的有机质含量、氮含量及土壤酶活性都有不同程度的增加,土壤养分及酶活性反过来又促进植物的生长<sup>[5-6]</sup>。尽管本研究中土壤养分和酶活性在调查样地和样地之间存在的差异在一定程度上反映了生境的异质性,但该区生境异质性的差异决定了生态因子,尤其是土壤生境资源在时空分布格局上的差异性,这种异质性也是维持物种多样性共存的重要生态学机制,反过来,这些生境因子的有效性均受到土壤养分有效性和酶活性的共同调控<sup>[17]</sup>。因此,以土壤养分和酶活性为主导进行各生境因子综合集成研究,对进一步认知嘉陵江流域生物多样性维持机理和保育具有重要的意义。冗余分析(RDA)作为一种直接梯度分析方法,最大的优势在于能独立保持环境因子对不同群落变化的贡献率,对其外部环境也呈现出显著的反馈作用。综合图 4 中环境因子箭头、连线长度和夹角情况,多样性对土壤养分和酶活性反应均比较敏感,这些敏感指标反映了对其生境的指示作用,也能够表征该区生态系统的敏感性,但还需要深入研究不同群落多样性与生态因子之间的内在联系,进而揭示该区植物群落分布结构和格局的根本原因。

#### 参考文献:

- [1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011,478(7367):49-56.
- [2] Grime J P. Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.

- tiantong evergreen broad-leaved forest, Zhejiang, China I. Leaf anatomical characters[J]. *Acta Phytocological Sinica*, 2001, 25(1):90-98.
- [19] Prusty B A K, Mishra P C, Azeez P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. *Ecotoxicity and Environmental Safety*, 2005, 60(2):228-235.
- [20] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands; their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, 99(3):347-360.
- [21] Sabin L D, Hee Lim J, Teresa Venezia M, et al. Dry deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(39):7528-7538.
- [22] Free-Smith P H, Sophy H, Goodman A. The uptake of particulates by an urban woodland; Site description and particulate composition[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1):27-35.
- [23] 石辉, 王会霞, 李秧秧, 等. 女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察[J]. *生态学报*, 2011, 31(5):1471-1477.
- [24] 贾彦, 吴超, 董春芳, 等. 7 种绿化植物滞尘的微观测定[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(11):2362-2366.
- [25] 王建辉, 刘奕清, 邹敏. 永川城区主要绿化植物的滞尘效应[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(3):1079-1084.
- [26] 刘璐, 管东生, 陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力[J]. *生态学报*, 2013, 33(8):2604-2614.
- [27] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3):487-492.
- [28] 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 等. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(6):2361-2367.
- [29] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, et al. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees[J]. *Environmental pollution*, 2013, 183:64-70.
- [30] Smith W H. Pollutant uptake by plants[C]// Treshow M. *Air Pollution and Plant Life*. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [31] Davidson C I, Wu Y L. Dry deposition of particles and vapors[J]. *Advances in Environmental Science*, 1990, 3(1):103-216.
- [32] Gao J H, Wang D M, Zhao L, et al. Airborne dust detainment by different plant leaves: Taking Beijing as an example[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2):94-99.
- [33] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3):115-123.

~~~~~

(上接第 51 页)

- [3] Lavelle P, Spain A V. *Soil ecology*[M]. Springer Science & Business Media, 2001.
- [4] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands[J]. *Nature*, 2013, 502(7473):672-676.
- [5] Pauli H, Gottfried M, Dullinger S, et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits[J]. *Science*, 2012, 336(6079):353-355.
- [6] Bagchi R, Gallery R E, Gripenberg S, et al. Pathogens and insect herbivores drive rainforest plant diversity and composition[J]. *Nature*, 2014, 506(7486):85-88.
- [7] 胥晓, 郑伯川, 陈友军. 嘉陵江流域植被景观的空间格局特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3):373-378.
- [8] 许炯心, 孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因[J]. *山地学报*, 2007, 25(2):153-159.
- [9] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. *地理科学*, 2006, 26(4):432-437.
- [10] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4):231-239.
- [11] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2):44-46.
- [13] 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.
- [14] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(6):1299-1305.
- [15] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4):557-563.
- [16] 白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6):641-647.
- [17] 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3):257-261.