

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.001 CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.001

郭琦玲, 王建青, 毛娇艳, 等. 林火干扰下亚热带森林土壤胞外酶化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 94-101.

GUO Qiling, WANG Jianqing, MAO Jiaoyan, et al. Extracellular enzyme stoichiometric characteristics of subtropical forest soil under forest fire disturbance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 94-101.

## 林火干扰下亚热带森林土壤胞外酶化学计量特征

郭琦玲<sup>1,2</sup>, 王建青<sup>1,3</sup>, 毛娇艳<sup>1,2</sup>, 孙嘉雯<sup>1,2</sup>, 黄雨晴<sup>1,2</sup>, 施秀珍<sup>1,3</sup>

(1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350117; 2. 福建师范大学地理科学学院碳中和未来技术学院, 福州 350117;  
3. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350117)

**摘要:** [目的] 森林火灾作为亚热带森林生态系统主要的自然和人为干扰过程, 严重影响土壤生物化学循环过程。为明确土壤胞外酶活性计量特征对林火干扰后恢复过程的响应。[方法] 以亚热带次生林林火干扰后不同恢复阶段的土壤为研究对象, 采用空间替代时间序列的方法选取 7 个次生林恢复阶段的亚热带森林土壤, 并将其分为老龄林 (60~70 a)、中龄林 (30~40 a) 和幼龄林 (<20 a), 通过测定土壤碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 相关的转化酶活性, 揭示林火干扰下亚热带森林土壤胞外酶活性及其化学计量特征的演替规律。[结果] 土壤纤维素水解酶 (CBH) 和  $\beta$ -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性随演替时间显著增加, 其他酶活性无显著增加。相关性分析和冗余分析发现, 土壤 C、N 质量分数是影响土壤胞外酶活性变化的关键因子。此外, 幼龄林、中龄林和老龄林土壤胞外酶 C、N、P 计量比分别为 1 : 0.94 : 1.53、1 : 1.02 : 1.63、1 : 0.99 : 1.47, 表明亚热带地区森林土壤微生物生长受到 P 限制, 且随着林火干扰后恢复年限增加逐渐改善。[结论] 林火干扰后森林土壤 N 转化相关胞外酶活性随恢复时间呈递增趋势, 土壤胞外酶化学计量逐渐趋于稳定, 表明亚热带森林土壤健康状况随着林火干扰恢复过程逐渐改善。

**关键词:** 土壤酶活性; 亚热带森林; 森林土壤; 森林演替

中图分类号: S714.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2025)01-0094-08

## Extracellular Enzyme Stoichiometric Characteristics of Subtropical Forest Soil under Forest Fire Disturbance

GUO Qiling<sup>1,2</sup>, WANG Jianqing<sup>1,3</sup>, MAO Jiaoyan<sup>1,2</sup>, SUN Jiawen<sup>1,2</sup>,  
HUANG Yuqing<sup>1,2</sup>, SHI Xiuzhen<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2. School of Geographical Sciences, School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 3. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

**Abstract:** [Objective] Forest fire, as the primary natural and human-induced disturbance in subtropical forests, seriously affects the soil biochemical cycle. We aimed to clarify the response of soil extracellular enzyme activities to the restoration process following forest fire disturbance. [Methods] We investigated the soils of subtropical secondary forests at different stages of recovery following forest fire disturbances. Subtropical forest soils at seven stages of restoration were analyzed using a spatial substitution time series approach. The forests were categorized into three age groups, including old forests (60—70 years), middle-aged forests (30—40 years), and young forests (<20 years). We aimed to reveal the succession patterns of extracellular enzyme activities and their stoichiometric characteristics following forest fire disturbances by measuring invertase activities related to soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in subtropical forest soils. [Results] The activities of soil cellulose hydrolase (CBH) and  $\beta$ -N-acetylglucosaminidase (NAG) increased significantly with forest stand age, but the activities of other extracellular enzymes did not increase

收稿日期: 2024-07-21 修回日期: 2024-09-23 录用日期: 2024-10-04 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-25

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (32271679); 福建省自然科学基金项目 (2023R1002004, 2024J09029)

第一作者: 郭琦玲 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: qilinguo@qq.com

通信作者: 王建青 (1990—), 男, 教授, 博士, 主要从事森林土壤生态学研究。E-mail: jianqingwang@aliyun.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

significantly with stand age. Correlation analysis and redundancy analysis showed that soil C and N contents were the key factors affecting the change of soil extracellular enzyme activities. In addition, the ratios of soil extracellular enzyme C, N and P were 1 : 0.94 : 1.53, 1 : 1.02 : 1.63 and 1 : 0.99 : 1.47 in young, middle and old forests, respectively, indicating that soil microorganisms in subtropical forest was limited by P, but such P-limitation was improved gradually with forest stand age following forest fire disturbance. [Conclusion] The extracellular enzyme activities related to soil N transformation increased with forest stand age following forest fire disturbances in subtropical forest soils. The stoichiometric characteristics of soil extracellular enzyme gradually tended to be stable, indicating that soil health was progressively improved during the restoration process following forest fire disturbance in subtropical forests.

**Keywords:** soil enzyme activity; subtropical forest; forest soil; forest succession

Received: 2024-07-21

Revised: 2024-09-23

Accepted: 2024-10-04

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

土壤胞外酶主要由土壤微生物、动植物活体分泌或动植物残体分解释放,作为土壤生态系统具有专一性和高效催化活性的物质,维持土壤生态系统代谢和养分循环<sup>[1]</sup>。土壤胞外酶对生态系统碳(C)、氮(N)、磷(P)元素的转化和迁移具有重要的调节作用,其活性是评价土壤质量的重要指标之一<sup>[1]</sup>。土壤微生物通过产生胞外酶与环境进行物质和能量交换,从而改变生态系统中 C、N、P 养分的比例。土壤 C、N、P 转化相关的胞外酶活性化学计量比,反映土壤 C、N、P 养分有效性与微生物营养需求间的生物化学平衡关系,表征土壤微生物的能量和养分限制状况<sup>[2]</sup>。全球整合分析研究<sup>[3]</sup>指出,全球土壤 C、N、P 相关的转化酶活性比值接近 1 : 1 : 1,当该比值发生偏离时,土壤微生物为获取养分而产生胞外酶,被认为受到 C、N 或 P 养分限制。

森林火灾作为亚热带森林生态系统常见的干扰过程,火烧直接影响土壤微生物群落组成,改变植物群落结构、功能性状和土壤养分状况等<sup>[4]</sup>。近年来,由于人类活动和全球变化,森林火灾的发生频率和强度越来越高,严重干扰生态系统生物和非生物过程,进而影响森林生态系统养分循环。有研究<sup>[5]</sup>指出,森林火灾通过改变土壤持水量、pH 等土壤物理化学性质和生物学过程,加速土壤养分循环,直接影响森林恢复过程与健康状况。森林火灾后短期内,土壤微生物量碳氮减少,土壤表层有机质质量分数和速效养分呈递增趋势<sup>[6]</sup>;随着林火干扰后恢复时间的增加(<20 a),土壤活性碳库逐渐增加,有效氮质量分数和有效磷供给速率逐渐恢复到林火干扰前的水平<sup>[4,7]</sup>。林火干扰后的 1 个月内,土壤纤维素酶、过氧化氢酶和脲酶活性显著降低,而酸性磷酸酶活性提高<sup>[8]</sup>。全球整合分析<sup>[9]</sup>表明,森林火灾后 5 a 内土壤水解酶活性降低,而土壤氧化酶活性增强;然而,林火干扰后经过 24 a 的恢复,土壤水解酶和氧化酶活性均得到有效改善<sup>[10]</sup>。因此,土壤胞外酶活性因林火干扰后不同恢复阶段存在较大

差异,迫切需要进一步探究土壤胞外酶对林火干扰后不同恢复阶段的响应规律及其机制。

林火干扰主要发生在亚热带区域,并数倍于北方地区<sup>[11]</sup>。然而,大量林火干扰研究集中在北方森林,较少关注亚热带森林。此外,林火干扰后土壤养分和酶动态变化大多针对短期效应或单一的恢复阶段,而对长期演替规律及其机制研究依然较少。因此,采用空间替代时间序列的方法,以林火干扰后不同恢复阶段的亚热带次生林土壤为研究对象,探究林火干扰后的森林土壤胞外酶化学计量特征,以期为亚热带森林可持续经营管理提供理论科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省武夷山市(27°27'31"~28°04'49"N, 117°37'22"~118°19'44"E),海拔 350~690 m。所在区域属于典型的亚热带季风气候区,年平均气温为 14.2 °C,年平均降水量为 2 583 mm。土壤类型为典型红壤。研究区经重度森林火灾后所有凋落物和地表植被烧为灰烬,树木损毁,通过自然恢复形成次生林。主要乔木有马尾松(*Pinus massoniana*)、山黄皮(*Clausena excavata*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)等,主要灌木包括百两金(*Ardisia crispa*)、狗骨柴(*Diplospora dubia*)、卡氏乌饭(*Vaccinium bracteatum*)及毛冬青(*Ilex pubescens*)等,草本层以狗脊(*Woodwardia japonica*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、华山姜(*Alpinia oblongifolia*)及杜荃山(*Maesa japonica*)等为主。

选择 7 个重度林火干扰后处于不同自然恢复阶段的次生林为研究对象,自然恢复时间包括 71、64、42、35、34、30、18 a,并划分为老龄林(60~70 a)、中龄林(30~40 a)和幼龄林(<20 a)。

### 1.2 样品采集

于 2023 年 3 月在每个林分设置 5 个小区,小区面

积为 20 m×20 m,每个小区间距离>100 m,每个小区选取对角线避开树根采取 9 钻土,混合成 1 个土壤样品,共采集 35 个土壤样品。土壤样品带回实验室,过 2 mm 筛后,一部分保存在 4 °C 冰箱中,用于测定土壤酶活性、微生物生物量碳(MBC)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和可溶性有机碳氮(DOC、DON);另一部分自然风干后用于测定土壤 pH、总碳(TC)和速效磷(AaP)质量分数。

### 1.3 土壤基本理化性质测定

土壤 pH 使用玻璃电极 pH 计(STARTER300, OHAUS, 美国)测定,土水比为 1 : 2.5。烘干法测定土壤含水率(SWC)。MBC 采用氯仿熏蒸后 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸

提,由总有机碳分析仪(TSHIMADZU TOC-VCPH analyzer, 日本 岛津)测定,转换系数为 0.45。DON 和 AaP 分别用 KCl 溶液和 M3 溶液浸提,连续流动分析仪(Skalar San<sup>++</sup>, 荷兰)测定。用元素分析仪(Elemental EL max CNS analyzer, 德国)测定 TC 质量分数。

### 1.4 土壤酶活性测定

分别测定 6 种土壤 C、N、P 循环相关的胞外酶活性,其中包括 4 种水解酶和 2 种氧化酶,具体内容见表 1。用伞形酮(MUB)为底物标示水解酶活性,恒温培养后用 Synergy H4 多功能酶标仪(Bio Tek, 美国)测定荧光值;用(L-DOPA)为底物标示氧化酶活性,恒温培养后测定吸光度<sup>[12]</sup>。

表 1 土壤胞外酶种类、缩写、类型及底物

Table 1 Soil extracellular enzyme species, abbreviations, types and substrates

胞外酶	缩写	类型	底物
β-葡萄糖苷酶(β-D-Glucosidase)	βG	碳转化酶	4-MUB-β-D-葡萄糖苷
纤维素水解酶(cellulose hydrolase)	CBH	碳转化酶	4-MUB-β-D-纤维二糖苷
多酚氧化酶(polyphenol oxidase)	PHO	碳转化酶	L-DOPA
过氧化物酶(oxidase)	PEO	碳转化酶	L-DOPA
β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-N-Acetylglucosaminidase)	NAG	氮转化酶	4-MUB-N-acetyl-β-D-葡萄糖胺苷
酸性磷酸酶(acid phosphatase)	AP	磷转化酶	4-MUB-磷酸盐

### 1.5 数据处理

土壤胞外酶化学计量比、矢量长度(Vector L)和矢量角度(Vector A)由经对数转换后的酶活性计算得到,用于评估微生物养分的相对限制程度<sup>[13]</sup>,计算公式为:

$$E_{C:N} = \ln(\beta G + CBH) / \ln NAG \quad (1)$$

$$E_{C:P} = \ln(\beta G + CBH) / \ln AP \quad (2)$$

$$E_{N:P} = \ln NAG / \ln AP \quad (3)$$

$$\text{Vector L} = \text{SQRT} \left\{ \begin{aligned} &[\ln(\beta G + CBH) / \ln AP]^2 + \\ &[\ln(\beta G + CBH) / \ln NAG]^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{Vector A} = \text{DEGREES} \{ \text{ATAN} 2 [\ln(\beta G + CBH) / \ln AP], [\ln(\beta G + CBH) / \ln NAG] \} \quad (5)$$

式中: $E_{C:N}$ 、 $E_{C:P}$ 和 $E_{N:P}$ 分别为 C 转化酶与 N 转化酶活性对数比、C 转化酶与 P 转化酶活性对数比和 N 转化酶与 P 转化酶活性对数比;Vector L 用于量化 C 养分限制的程度;矢量 Vector A 为受到 N、P 养分限

制的程度,该值>45°时,表示受到 P 限制,<45°时,表示受到 N 限制。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)探究土壤理化性质、土壤胞外酶活性及其计量比的演替规律,采用 Duncan 进行事后比较。采用 Pearson 相关分析法和冗余分析(RDA)检测影响土壤胞外酶活性变化的主要环境因子。使用 SPSS 22.0 软件和 R 4.3.1 软件中实现数据统计分析及绘图。图表中数据均为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复年限土壤理化性质变化

由表 2 可知,与老龄林相比,中龄林和幼龄林的土壤 pH 分别降低 6.1%、9.5%。土壤 SWC 随林龄的增加呈先上升后下降趋势。土壤中 MBC、DOC、DON、TC 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 质量分数在幼龄林最高。林火干扰后,不同恢复阶段的土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 AaP 质量分数无明显变化。

表 2 不同恢复阶段森林土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties of forests at different restoration stages

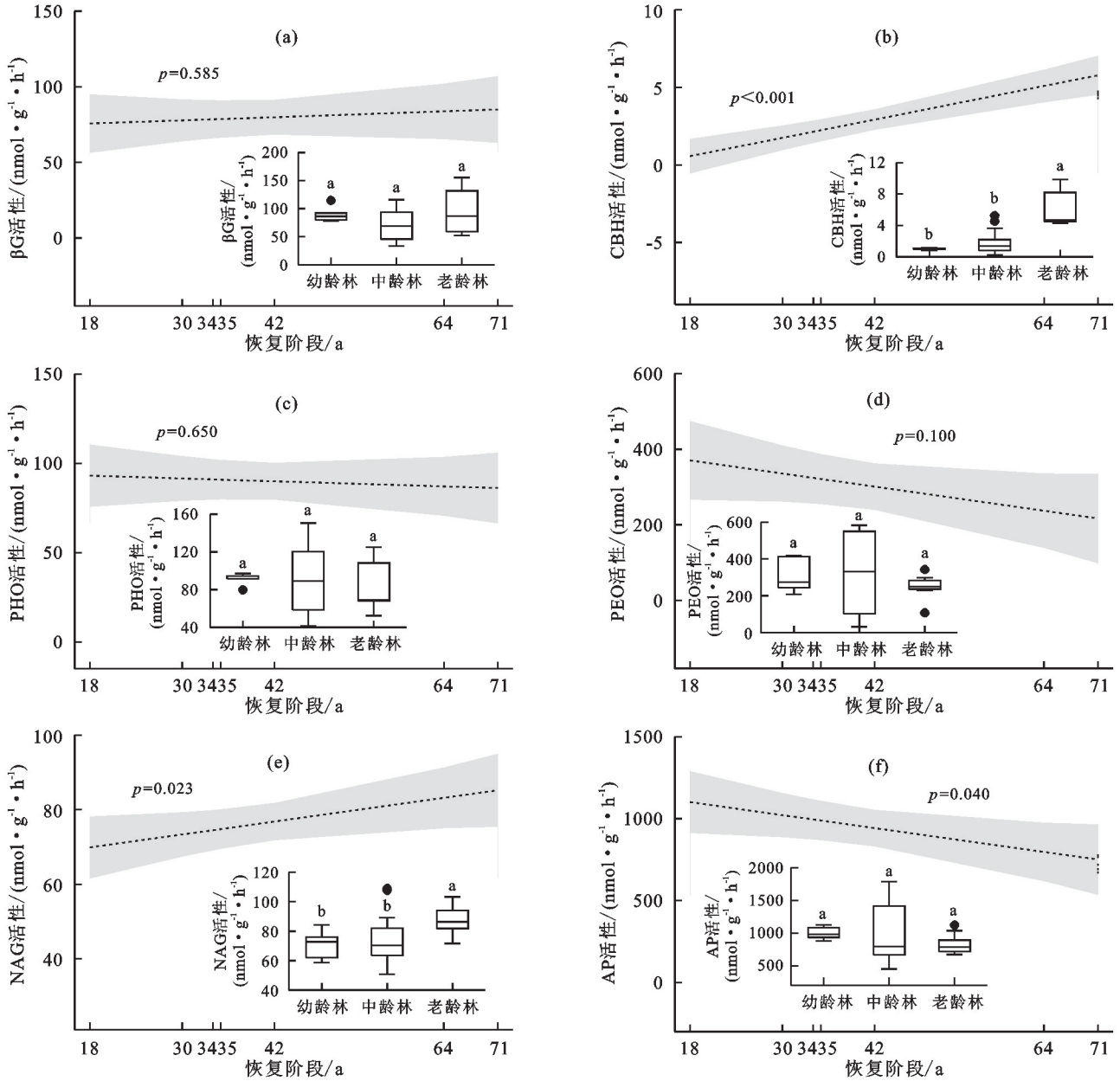
恢复阶段	pH	SWC/%	DOC/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	MBC/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	DON/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	TC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	AaP/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
幼龄林	5.01±0.08b	17.68±0.31a	300.53±7.89a	834.18±37.64a	35.44±2.00a	2.82±0.25a	4.76±0.79a	34.15±1.56a	2.44±0.33a
中龄林	5.19±0.21b	14.86±1.60b	224.98±44.89b	582.63±109.76b	24.90±3.64b	0.50±0.22b	4.36±0.72a	27.00±5.04b	3.60±1.86a
老龄林	5.53±0.18a	16.41±1.10a	218.93±21.80b	647.07±123.74b	21.68±3.22b	0.52±0.17b	5.09±1.38a	27.13±2.91b	3.16±0.73a

注:SWC、DOC、MBC、DON、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TC、AaP 分别为土壤含水率、可溶性有机碳、微生物生物量碳、可溶性有机氮、硝态氮、铵态氮、总碳、速效磷;同列不同字母表示不同恢复阶段差异性显著( $p < 0.05$ )。

### 2.2 不同恢复阶段土壤胞外酶活性和酶计量比变化

由图 1 可知,随着演替时间增加,土壤胞外酶活性呈不同的变化趋势。与老龄林相比,幼龄林和中龄

林土壤 CBH 活性分别降低 5.0、2.4 倍;土壤 NAG 活性分别下降 35.6%、30.8%。然而,土壤氧化酶 PHO、PEO 及 AP 活性没有显著变化。



注:箱体顶部和底部线段表示数据最大值和最小值;中部线段表示中位数;外部实心点表示离群值。图中不同字母表示不同恢复阶段差异性显著( $p<0.05$ )。下同。

图 1 林火干扰后亚热带次生林土壤胞外酶活性

Fig.1 The activities of extracellular enzymes in subtropical secondary forest after forest fire disturbance

由图 2 可知,随着次生林恢复时间的增加,土壤  $E_{C:N}$  呈下降趋势;土壤  $E_{C:P}$  呈先下降后增加趋势。与老龄林相比,幼龄林和中龄林土壤  $E_{N:P}$  分别降低 9.7%和 7.3%。

矢量分析表明,土壤胞外酶化学计量比 Vector L 为 1.03~1.33,表现为先减少后增加的变化趋势。土壤胞外酶化学计量比 Vector A 均  $>45^\circ$ ,老龄林比幼龄林和中龄林分别高 4.1%和 3.2%(图 3)。

### 2.3 土壤胞外酶活性及其计量比的影响因子

相关分析表明,土壤碳转化相关的胞外酶  $\beta G$  活性

与 DOC 呈显著正相关; $\beta G$  和 CBH 活性与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  均呈显著正相关,土壤胞外酶 PHO 活性与土壤理化性质 (pH、SWC、AaP) 呈显著负相关,PEO 活性与 TC 呈显著正相关。然而,土壤磷转化相关的胞外酶 AP 活性与 DOC 和 DON 呈显著正相关,而与 pH 呈显著负相关。 $E_{C:N}$  与 DOC 和 DON 呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关; $E_{C:P}$  与 DOC 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈显著正相关, $E_{N:P}$  与 pH 呈显著正相关,与 DON 呈显著负相关。Vector L 与 DOC 和 DON 呈显著正相关,Vector A 与 DON



呈显著正相关,二者均与 pH 呈显著负相关(图 4)。

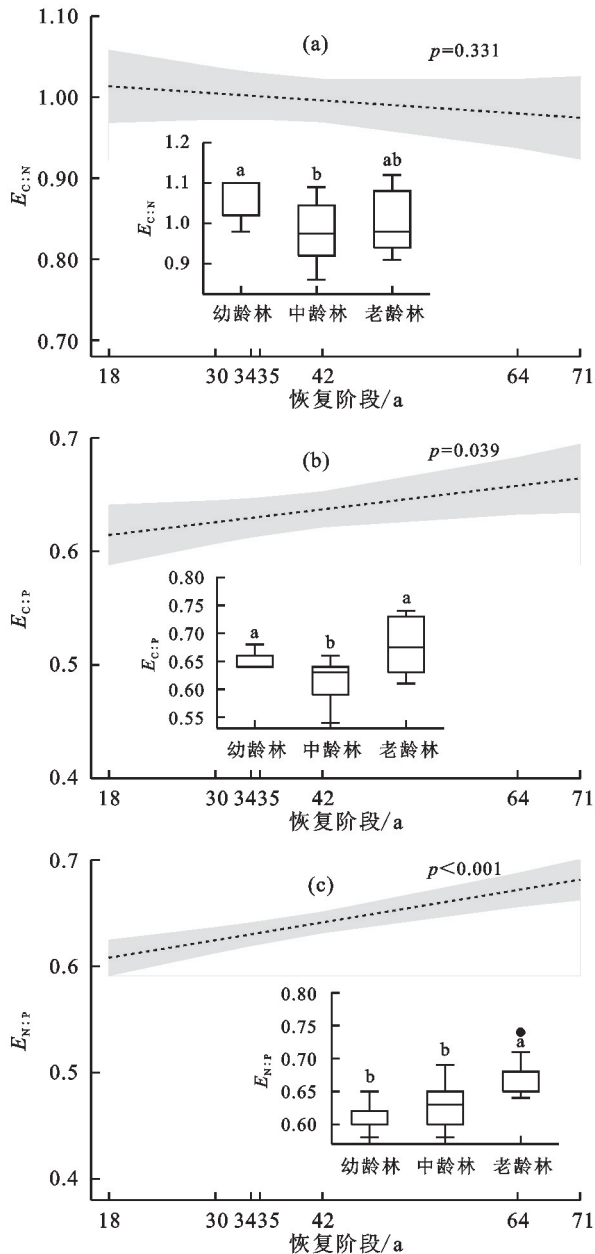


图 2 林火干扰后亚热带次生林土壤胞外酶化学计量比

Fig.2 Soil extracellular enzyme stoichiometric ratios in subtropical secondary forest after forest fire disturbance

土壤 TC 和 DOC 作为驱动土壤胞外酶活性变异的主要环境因子,土壤理化性质和养分质量分数共同解释土壤胞外酶活性变异程度的 91.9%(图 5)。

### 3 讨论

#### 3.1 林火干扰后亚热带森林土壤胞外酶活性特征

森林火灾作为森林生态系统的重要干扰过程,直接影响土壤微生物活性及其生长繁殖过程,进而改变土壤生物化学循环过程,导致土壤胞外酶活性的变化。本研究发现,随着林火干扰后演替时间的增加,土壤  $\beta$ G、CBH、NAG 活性呈增加趋势,与 DONG 等<sup>[14]</sup>在亚热带马尾松林不同林龄间土壤酶活性变化

的研究结果一致。因为森林火灾后,土壤表层温度升高,有机质分解速度加快,植被层和凋落物层未完全燃烧的有机残体及地下根系腐烂引起林火干扰后土壤有机碳质量分数增加<sup>[4]</sup>。火烧后的灰分为恢复初期的森林土壤提供充足氮源,促进植被恢复和土壤有机质积累,刺激土壤微生物的生长繁殖和活性,有利于土壤胞外酶活性保持在较高水平<sup>[15]</sup>。涂程伟等<sup>[16]</sup>研究发现,杉木人工林土壤氧化酶(PEO 和 PHO)活性在 25 a 林龄林分达到最高,显著高于 10、17 a 林龄林分。而本研究中,土壤氧化酶活性并未随演替时间发生显著变化,可能是由于动植物残体等有机质在土壤中积累后,需要较长时间乃至 20 a 左右时才形成稳定的惰性碳库,而氧化酶表现出较高的分解活性,并且在此之后始终维持在稳定水平。

土壤胞外酶参与土壤多个生物化学反应过程,其活性受土壤 pH、湿度、养分质量分数及土壤微生物群落等因素的影响<sup>[17]</sup>。本研究发现,DOC 和 DON 质量分数是影响土壤胞外酶活性最重要的因素,与 GUO 等<sup>[18]</sup>的研究结果相似。随着森林恢复,地上凋落物和地下细根投入增加,土壤微生物可用资源的质量和数量不断提高,土壤胞外酶活性随之增加<sup>[15]</sup>。因此,本研究进一步研究发现,DOC、TC 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与 C 转化相关酶呈显著正相关(图 4)。土壤底物资源直接影响胞外酶活性,土壤微生物为维持自身 C : N 稳定,促进土壤 DON 的分解并同化吸收更多底物资源<sup>[19]</sup>,C 转化相关的胞外酶活性相应提高。SWC 与 PHO 活性呈显著负相关,与赵婧等<sup>[17]</sup>的研究结果一致,随着森林土壤水分体积分数的增加,土壤环境易处于还原状态,从而抑制土壤氧化酶活性。因此,林火干扰后亚热带森林土壤胞外酶活性变化主要取决于森林土壤底物资源和环境的变化。

土壤 CBH 和 NAG 活性随演替时间增加而增加。然而,亚热带杉木林年龄序列土壤胞外酶的研究<sup>[20]</sup>表明,CBH、 $\beta$ G、NAG 和 AP 的活性呈单峰变化,且在林龄为 8 a 时达到最高。本研究中,土壤胞外酶活性的变化特征与此不同,天然次生林演替过程中植被逐渐恢复,相比单一种植的人工林植物多样性更高。植物多样性与土壤胞外酶活性之间关系密切,随着植物多样性提高,凋落物数量和组成更丰富,土壤养分发生变化,促进土壤微生物群落产生胞外酶活性。刘俊第等<sup>[21]</sup>研究发现,森林火灾发生 1 a 后,土壤水解酶活性仍然显著低于干扰前。由于林火干扰后短时间内土壤胞外酶活性变异性较大,森林火灾后需要经过长期自然演替与恢复,才能改善土壤胞外酶活性,从而提升森林土壤质量。

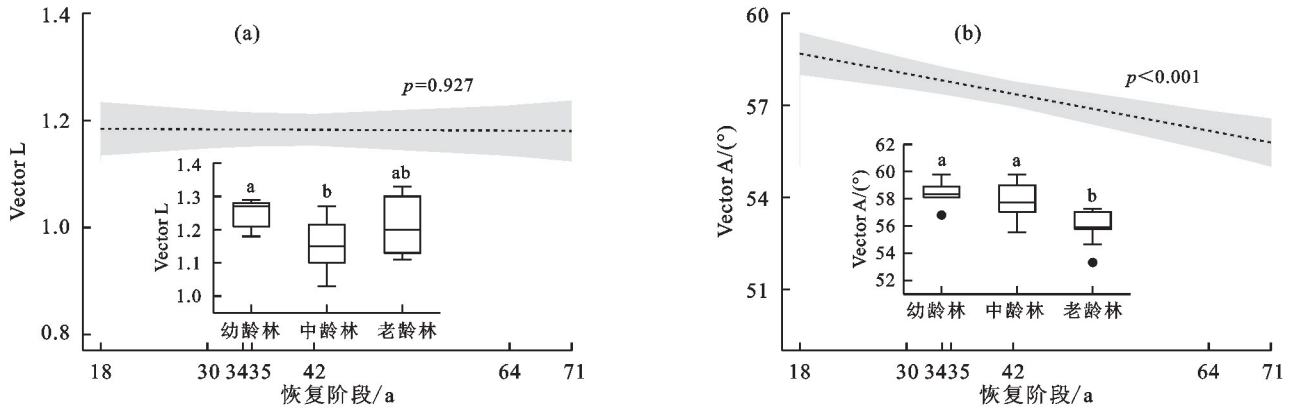
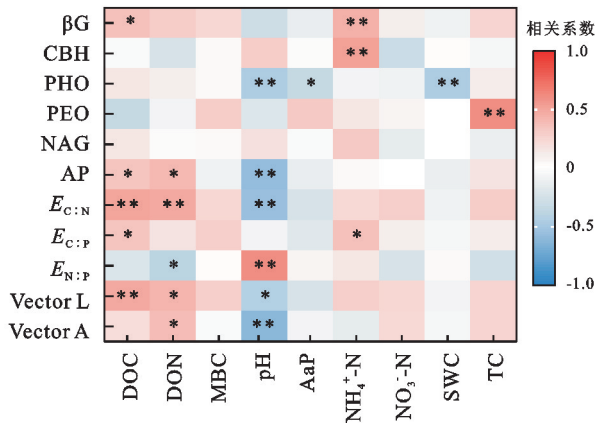


图 3 林火干扰后亚热带次生林土壤胞外酶矢量长度和矢量角度

Fig.3 Soil extracellular enzyme vector length and vector angle in subtropical secondary forest after forest fire disturbance

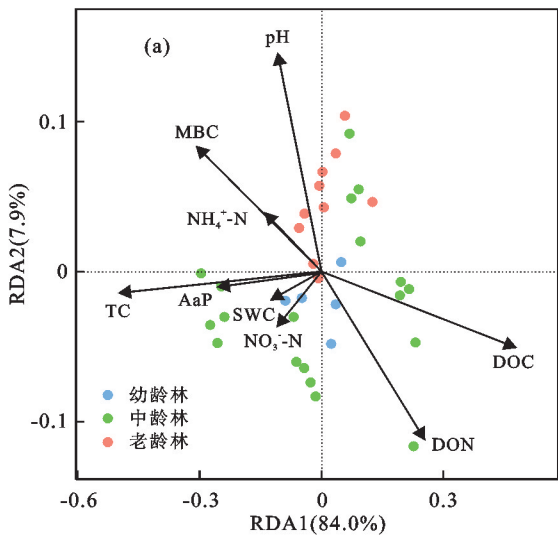


注: \*、\*\* 分别表示  $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 。下同。

图 4 林火干扰后亚热带次生林土壤胞外酶活性及其计量比的相关性

Fig.4 Correlations between soil extracellular enzyme activities and stoichiometric ratios in subtropical secondary forest after forest fire disturbance

3.2 林火干扰后亚热带森林土壤胞外酶化学计量特征  
土壤胞外酶化学计量比作为土壤微生物养分利用和需求的的重要评价指标,指示土壤微生物的养分限制。



本研究中,土壤 C、N、P 转化相关酶对数比在幼龄林、中龄林和老龄林中分别为 1 : 0.94 : 1.53、1 : 1.02 : 1.63、1 : 0.99 : 1.47,逐渐趋近于全球平均值 1 : 1 : 1<sup>[3]</sup>,表明林火干扰后随着演替时间的增加,森林土壤养分有效性增强,土壤养分限制程度减弱。本研究中,所有林分土壤胞外酶 C : N : P 的结果表明,研究区内 P 转化酶活性较高,即 P 素相对缺乏,且 Vector A 均  $> 45^\circ$ ,进一步说明该土壤受到 P 限制,主要是由于亚热带区域土壤呈酸性,土壤中游离态的 P 易与游离铁铝离子结合形成沉淀,甚至进一步形成闭蓄态的磷,难以被土壤微生物利用<sup>[22]</sup>。相比演替前期 ( $< 40$  a),老龄林的土壤胞外酶 C : N : P 和 Vector A 均明显降低,  $E_{N:P}$  则增加,表明研究区内 P 限制程度有所缓解。可能是因为随着演替时间的增加,土壤 pH 提高, P 固定相对减弱,土壤中 AaP 质量分数有所增加,缓解微生物 P 限制,与 pH 是介导土壤胞外酶计量比的关键因子的结论一致<sup>[23]</sup>。亚热带森林林火干扰后随着演替时间的增加,土壤胞外酶化学计量趋于平衡,土壤 P 养分限制程度减弱,土壤健康状况改善。

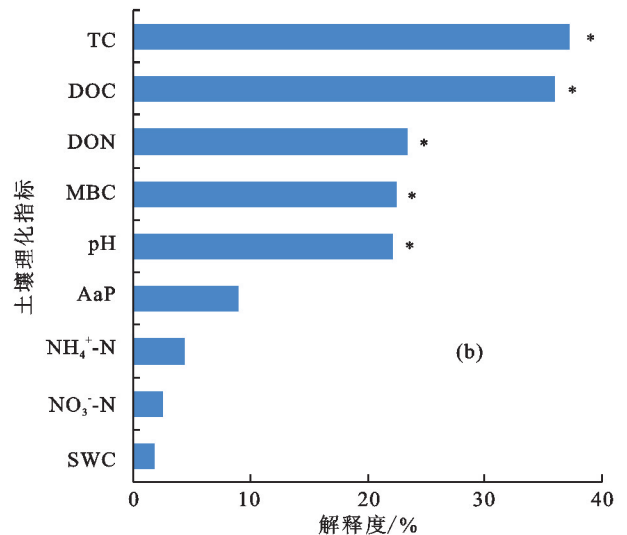


图 5 林火干扰后不同恢复阶段土壤胞外酶活性的冗余分析及其解释度

Fig.5 Redundancy analysis and the explained variations of soil extracellular enzyme activities at different restoration stages after forest fire disturbance

本研究土壤  $E_{C:N}$  平均值为 0.98~1.06, 低于全球平均值 1.41。  $E_{C:P}$  和  $E_{N:P}$  平均值为 0.61~0.68, 分别大于全球平均值 0.62、0.44<sup>[3]</sup>。 Vector L > 1 且呈先减小后增大变化趋势, 表明研究区土壤微生物生长代谢受到 C 限制, 限制程度随演替时间呈先下降后上升的变化趋势。  $E_{C:N}$  和  $E_{C:P}$  随时间的变化趋势与 Vector L 相同, 表明研究区始终处于 C 限制阶段。 土壤微生物的资源分配策略倾向于分泌更多与匮乏的养分相关的酶, 以满足自身养分需求<sup>[24]</sup>, 在 P 限制的土壤中, 微生物由于对 P 的需求而促进 C 同化, 导致微生物的相对 C 限制<sup>[25]</sup>。

#### 4 结论

土壤 N 转化相关的胞外酶活性随着林火干扰后演替时间呈递增趋势。 土壤 P 转化相关的胞外酶活性高于土壤 C、N 转化相关的转化酶活性。 林火干扰后森林土壤胞外酶 C、N、P 计量比为 1 : 0.94 : 1.53 ~ 1 : 0.99 : 1.47, 且矢量角度随着演替过程呈降低趋势, 表明该区域森林土壤 P 限制随着林火干扰后的演替过程逐渐减弱。 因此, 预防和减少森林火灾对亚热带森林生态系统的干扰, 对于维持亚热带森林土壤生态系统养分循环过程和森林生态系统的可持续发展具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] XU Y X, DU A P, WANG Z C, et al. Effects of different rotation periods of eucalyptus plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 456: e117683.
- [2] ZHOU L H, LIU S S, SHEN H H, et al. Soil extracellular enzyme activity and stoichiometry in China's forests[J]. *Functional Ecology*, 2020, 34(7): 1461-1471.
- [3] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(11): 1252-1264.
- [4] CHENG Y, LUO P, YANG H, et al. Fire effects on soil carbon cycling pools in forest ecosystems: A global meta-analysis[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 895: e165001.
- [5] HOLDEN S R, ROGERS B M, TRESEDER K K, et al. Fire severity influences the response of soil microbes to a boreal forest fire[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): e035004.
- [6] ELAKIYA N, KEERTHANA G, SAFIYA S. Effects of forest fire on soil properties[J]. *International Journal of Plant and Soil Science*, 2023, 35(20): 8-17.
- [7] 孔健健, 张亨宇, 荆爽. 大兴安岭火后演替初期森林土壤磷的动态变化特征[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1515-1523.
- [8] KONG J J, ZHANG H Y, JING S. Dynamic characteristics of forest soil phosphorus in the early succession after fire in Great Xing'an Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(6): 1515-1523.
- [8] 田荣, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林土壤微生物及酶活性的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 695-701.
- [9] TIAN R, CHEN Q B, LI J Q, et al. Effects of prescribed burning on soil microbes and enzyme activities in *Pinus yunnanensis* forests [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 695-701.
- [9] PEI J M, WAN J R, WANG H, et al. Changes in the activity of soil enzymes after fire[J]. *Geoderma*, 2023, 437: e116599.
- [10] 王丽红, 辛颖, 赵雨森, 等. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中土壤微生物量及酶活性[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 184-189.
- [10] WANG L H, XIN Y, ZHAO Y S, et al. Soil microbial biomass and enzyme activity in the process of vegetation restoration in burned area of great Xing'an Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 184-189.
- [11] FANG K Y, YAO Q C, GUO Z T, et al. ENSO modulates wildfire activity in China[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: e1764.
- [12] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [13] MOORHEAD D L, SINSABAUGH R L, HILL B H, et al. Vector analysis of coenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 93: 1-7.
- [14] DONG H Y, GE J F, SUN K, et al. Change in root-associated fungal communities affects soil enzymatic activities during *Pinus massoniana* forest development in subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: e118817.
- [15] FENG C, MA Y H, JIN X, et al. Soil enzyme activities increase following restoration of degraded subtropical forests[J]. *Geoderma*, 2019, 351: 180-187.
- [16] 涂程伟, 彭彩云, 柳莘玉, 等. 华西雨屏区不同林龄杉木人工林土壤酶活性的动态变化[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(7): 91-95.
- [16] TU C W, PENG C Y, LIU P Y, et al. Seasonal dynamics of soil enzyme activities in *Cunninghamia lanceolata* forest of different ages in rainy area of western China [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(7): 91-95.

- [17] 赵婧,段磊磊,王铭,等.水文管理措施对长白山区恢复泥炭地土壤酶活性的影响[J].生态学杂志,2022,41(5):948-954.  
ZHAO J, DUAN L L, WANG M, et al. Effects of hydrological managements on soil enzyme activities during peatland restoration in the Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 948-954.
- [18] GUO D L, OU Y S, ZHOU X H, et al. Response of soil enzyme activities to natural vegetation restorations and plantation schemes in a landslide-prone region [J]. Forests, 2022, 13(6): e880.
- [19] KUZYAKOV Y, XU X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: Mechanisms and ecological relevance [J]. The New Phytologist, 2013, 198(3): 656-669.
- [20] 卢安琪,陈志杰,李雪,等.不同林龄杉木人工林土壤微生物生物量与酶活性特征的影响机制[J].生态学杂志, 2025, 44(1): 11-20.  
LU A Q, CHEN Z J, LI X, et al. Characteristics and influencing mechanisms of soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(1): 11-20.
- [21] 刘俊第,林威,王玉哲,等.火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响[J].生态学报, 2018, 38(15): 5374-5382.  
LIU J D, LIN W, WANG Y Z, et al. Effects of fire on soil enzyme activities and organic carbon fractions in *Pinus massoniana* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [22] 陈佳,姚成硕,林勇明,等.武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价[J].山地学报, 2021, 39(2): 194-206.  
CHEN J, YAO C S, LIN Y M, et al. Soil enzyme activity difference in woodlands, and soil fertility quality evaluation in Mount Wuyi, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(2): 194-206.
- [23] 宋思宇,陈亚梅,汪涛,等.不同林龄的西藏林芝云杉人工林土壤酶活性及化学计量比特征[J].应用与环境生物学报, 2023, 29(1): 178-185.  
SONG S Y, CHEN Y M, WANG T, et al. Characteristics of soil enzyme activity and stoichiometry in a *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* plantation with different ages [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(1): 178-185.
- [24] ALLISON S D, WEINTRAUB M N, GARTNER T B, et al. Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function [M]// Soil Enzymology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 229-243.
- [25] WARING B G, WEINTRAUB S R, SINSABAUGH R L. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. Biogeochemistry, 2014, 117(1): 101-113.
- (上接第 93 页)
- [24] 李鲁华,李世清,翟军海,等.小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J].西北植物学报, 2001, 21(1): 1-7.  
LI L H, LI S Q, ZHAI J H, et al. Review of the relationship between wheat roots and water stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 1-7.
- [25] 王孟本,柴宝峰,李洪建,等.黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J].林业科学, 1999, 35(2): 7-14.  
WANG M B, CHAI B F, LI H J, et al. Soil water holding capacity and soil available water in plantations in the loess region [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(2): 7-14.
- [26] SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Towards moss biocrust effects on surface soil water holding capacity: Soil water retention curve analysis and modeling [J]. Geoderma, 2021, 399: e115120.
- [27] 李增尧,赵兴凯,朱清科.陕北黄土区陡坡坡面因子对土壤水分的影响[J].排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 798-805.  
LI Z Y, ZHAO X K, ZHU Q K. Effects of farmland slope on soil moisture in semi-arid Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(9): 798-805.
- [28] 侯贵荣,余新晓,刘自强,等.不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征[J].水土保持学报, 2017, 31(3): 209-215.  
HOU G R, YU X X, LIU Z Q, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil moisture in typical forest land in Beijing Mountain region under different rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 209-215.
- [29] 何其华,何永华,包维楷.干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J].山地学报, 2003, 21(2): 149-156.  
HE Q H, HE Y H, BAO W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas [J]. Mountain Research, 2003, 21(2): 149-156.
- [30] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J].应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.  
QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 715-720.