

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.041.

雷跻初, 刘小伟, 邓军, 等. 渭北旱塬不同年限撂荒地土壤酶活性及其化学计量变化特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 44-52.

Lei Jichu, Liu Xiaowei, Deng Jun, et al. Characteristics of Changes in Soil Enzyme Activities and Stoichiometric Under Different Abandoned Years in the Dry Area of Northern Weihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 44-52.

渭北旱塬不同年限撂荒地土壤酶活性及其 化学计量变化特征

雷跻初^{1,2}, 刘小伟³, 邓军⁴, 程杰⁵, 程积民⁶, 郭梁^{1,6,7}

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

4.宁夏云雾山国家级自然保护区管理局, 宁夏 固原 756000; 5.国家林业和草原局西北调查规划设计院,

陕西 西安 710048; 6.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 7.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探究渭北旱塬区不同年限撂荒地的土壤养分、胞外酶活性及其化学计量的变化特征及影响因素,以期
为渭北旱塬区撂荒地的改善与管理提供一定的理论依据。[方法]以渭北旱塬不同年限(5 a, 10 a, 20 a, 25 a 和 33 a)
的撂荒地研究对象,测定了土壤养分和参与土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)循环的5种胞外酶活性,随后利用单因素方
差分析、土壤胞外酶化学计量学模型和主坐标分析(PCoA)研究不同撂荒年限下土壤养分和胞外酶活性及其生态化学
计量的变化规律及影响因子。[结果]随着撂荒年限的增加,土壤C和N获取酶活性显著减小,而P获取酶活性显著
增加;土壤C、N和P含量变化与酶活性变化趋势相反。随撂荒年限延长,土壤微生物的C限制得到缓解,P限制逐渐
加强。PCoA拟合环境因子分析结果显示:土壤可溶性有机碳(DOC)、总磷(TP)、速效氮(AN)和速效磷(AP)含量是
驱动酶活性及其计量比变化的关键因子。[结论]撂荒对土壤养分状况具有显著改善作用,但随撂荒时间延长(20 a以
上)会加剧微生物P限制,因此对经过长年撂荒的土地应当适量施用磷肥,以改善其土壤状况。

关键词: 渭北旱塬; 不同撂荒年限; 土壤酶活性; 生态化学计量

中图分类号: X144

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0044-09

Characteristics of Changes in Soil Enzyme Activities and Stoichiometric Under Different Abandoned Years in the Dry Area of Northern Weihe River Basin

Lei Jichu^{1,2}, Liu Xiaowei³, Deng Jun⁴, Cheng Jie⁵, Cheng Jimin⁶, Guo Liang^{1,6,7}

(1. Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 4. Administration Bureau of Ningxia Yunwushan National Nature Reserve, Guyuan,

Ningxia 756000, China; 5. Northwest Surveying Planning and Designing Institute of National Forestry and

Grassland Administration, Xi'an 710048, China; 6. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming

on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 7. Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the variations and drivers of soil nutrient and extracellular
enzyme activities and their stoichiometric characteristics under the abandoned land in the dry area of Northern
Weihe River Basin in order to provide a theoretical basis for the improvement and management of abandoned

收稿日期: 2023-03-02

修回日期: 2023-05-07

资助项目: 国家自然科学基金(41701606); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM-093); 中央高校基本科研业务费(2452020009)资助

第一作者: 雷跻初(1998—), 女, 陕西大荔人, 硕士研究生, 研究方向为草地生态学。E-mail: jcljcl998@163.com

通信作者: 郭梁(1984—), 男, 山东泰安人, 博士, 研究员, 主要从事气候变化与林草生态响应。E-mail: guoliang2014@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

land in this region. [Methods] Soil nutrients and enzyme activities associated with carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) cycles in the lands with different abandoned years (5 years, 10 years, 20 years, 25 years and 33 years) in dry area of Northern Weihe River Basin were measured. Subsequently, The changes and driver factors of them and their stoichiometry were determined by One-way ANOVA, enzyme stoichiometric model, and principal coordinate analysis (PCoA). [Results] With the increase of abandoned years, the activities of C-acquiring enzymes and N-acquiring enzymes decreased, but the activity of P-acquiring enzymes significantly increased. The changes of soil C, N and P contents showed the opposite trend compared with enzyme activities. Moreover, the C-limitation of soil microorganisms alleviated but P-limitation increased with the increase of abandoned years. Further, the results of PCoA fitting environmental factor analysis showed that soil dissolved organic carbon, total phosphorus, available nitrogen and available phosphorus were the key factors driving the change of enzyme activity and its econometric ratio. [Conclusion] Abandonment has a significant improvement on soil nutrient, but P-limited will be aggravated with increasing of abandoned years (more than 20 years). Therefore, appropriate phosphate fertilizer should be applied to a long-term abandoned land to improve its soil condition.

Keywords: arid area of northern Weihe River Basin; different abandoned years; soil enzymatic activity; ecological stoichiometry

黄土高原气候干旱、降水稀少、植被贫乏,加之不合理的土地利用加剧了土壤侵蚀,以致黄土高原成为我国乃至世界上水土流失最严重的地区之一,严重影响了当地的生态环境与社会经济。因此,我国于 20 世纪 90 年代在黄土高原开展了大量生态修复措施。其中,渭北旱塬坡耕地撂荒是该地区改善土壤条件和恢复退化环境的重要措施^[1]。研究表明,耕地在撂荒后,地上植被盖度得到改善^[2],水土流失情况有所缓解^[3],土壤养分含量显著提高^[4]。然而,长期撂荒在改变地上和地下生物群落的同时也会影响生态系统的养分平衡,加之植物与微生物对养分的竞争所导致的土壤微生物养分限制,又会对植被恢复造成负面影响^[5],不利于土壤质量的改善和生态系统的稳定性维持。因此,监测撂荒地演替过程中土壤微生物养分限制,辨析其关键影响因素,具有重要研究价值。

土壤胞外酶活性较土壤基本理化性质指标能够更灵敏地反映土壤环境变化,参与碳(C)、氮(N)和磷(P)循环的胞外酶活性的相对比例能体现微生物的养分需求,表征微生物的养分限制情况^[6]。土壤微生物主要通过分泌胞外酶转化分解土壤有机质中的 C、N 和 P 等元素,这一过程对土壤养分循环和能量流动具有重要调控作用^[7]。土壤胞外酶作为土壤养分循环的关键驱动力^[8],其中,与 C 循环相关的酶主要有:β-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase, BG)、纤维二糖水解酶(Cellobiohydrolase, CBH);与 N 循环相关的酶有:β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)和亮氨酸氨基肽酶(Leucine

aminopeptidase, LAP);碱性磷酸酶(Aalkaline phosphatase, AKP)是与 P 循环相关的关键酶,它们的活性及化学计量特征能有效反映土壤微生物的能量和养分代谢情况^[9]。土壤理化性质和养分分布在不同撂荒年限和不同土层间均具有差异^[10],这些因素会对土壤酶活性及酶计量比造成直接或间接的影响^[11],进而导致不同撂荒年限的土壤微生物养分限制状况有所不同,但具体影响因子及作用途径和机制尚不明确。为了探究渭北旱塬区不同撂荒年限土壤酶活性及其化学计量变化特征,本研究选取 5 个不同年限撂荒地作为研究对象,通过分析土壤养分和胞外酶活性及生态化学计量随撂荒年限的变化,探究不同撂荒年限下土壤养分的变化及微生物养分限制情况及其驱动因素,旨在为渭北旱塬及黄土高原植被恢复和土地资源科学管理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省彬州市永乐镇高辉村(108°06′18″E, 35°15′01″N),地处黄土高原中部,属典型渭北旱塬残塬沟壑区。该地区平均海拔为 1 040 m,在气候划分上属于温带半干旱气候,年平均温度约 9.7℃,平均无霜期 180 d,年均降水量 561 mm。土壤类型主要为黄绵土,极易受到侵蚀而造成水土流失。当地政府针对水土流失与生态退化进行了长期综合治理,自 20 世纪 90 年代开始实施退耕还林还草生态工程以来,大量坡耕地退耕后形成撂荒地,为本研究

提供了良好的试验平台。

1.2 样地选择与样品采集

本研究通过空间代替时间的方法来探究撂荒年限对土壤酶活性及其化学计量比的影响。在研究区内选择坡向一致、地形相似、位置相邻的已撂荒 5 a, 10 a, 20 a, 25 a 和 33 a 的 5 个不同年限的撂荒地作为试验样地, 每块样地大小为 30 m×30 m, 各样地之间间距超过 50 m, 各样地的坡度坡向等情况见表 1。样地植被类型多为以蒿类、禾草类为主的草本植物, 主要优势种有: 铁杆蒿 (*Lespedeza cuneata*)、本氏针茅 (*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza daurica*) 等。2021 年 9 月在所选样地内进行土壤样品的采集, 每个样地随机选取 3 个间距超过 10 m 的 1 m×1 m 的样方作为重复, 用内径 3.5 cm 的土钻分层采集土壤样品, 取样深度分别为 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 共三层。去除土样中的石块、植物残体、根系和可见的土壤动物后过 2 mm 筛, 将过筛后的土样混合均匀后分为两份, 一份储藏于 4℃ 冰箱内用于土壤微生物生物量及酶活性测定, 另一份自然风干用于土壤理化性质的测定。

表 1 样地概况

Table 1 General situation of the sample plots

撂荒 年限/a	样地 类型	坡向	坡度/ (°)	盖度/ %
5	撂荒农田	阳坡	34	38
10	撂荒农田	阳坡	35	45
20	撂荒农田	阳坡	32	55
25	撂荒农田	阳坡	30	70
33	撂荒农田	阳坡	31	60

1.3 测定指标及方法

用重铬酸钾外加热法测定样品中土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 含量, 可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 采用 TOC 法测定^[12], 采用凯式定氮仪测定总氮 (Total nitrogen, TN) 含量, 总磷 (Total phosphorus, TP) 含量用浓硫酸—高氯酸钼锑抗比色法测定, 用碱解扩散法和 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法分别测量土壤速效氮 (Available nitrogens, AN) 和速效磷 (Available phosphorus, AP), 以上土壤指标测定具体过程参考《土壤农化分析》^[13]。

4℃ 保存的新鲜土样用于测定土壤中 5 种参与 C、N 和 P 循环的酶活性。其中 β-葡萄糖苷酶 (BG) 和纤维二糖水解酶 (CBH) 是与 C 循环相关的酶; β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 和亮氨酸氨基肽酶

(LAP) 是与 N 循环相关的酶, 碱性磷酸酶 (AKP) 是与 P 循环相关的酶; 所有酶活性采用微孔板荧光法测定^[14], 详细的酶活性测定方法见参考文献^[15]。

1.4 数据处理与分析

通过酶计量矢量模型计算酶化学计量的向量长度 (Vector length, VL) 和向量角度 (Vector angle, VA), 量化土壤微生物 C、N 和 P 限制, 计算公式如下:

$$x = (BG + CBH) / (BG + CBH + AKP) \tag{1}$$

$$y = (BG + CBH) / (BG + CBH + LAP + NAG) \tag{2}$$

$$VL = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3}$$

$$VA = \text{DEGREES}[\text{ATAN2}(x, y)] \tag{4}$$

式中: x 表示参与 C 和 P 循环酶的相对活性比; y 表示参与 C 和 N 循环酶的相对活性比。向量长度 (VL) 越长, 表明微生物受到的 C 限制越大; 向量角度 (VA) 小于 45° 表示微生物受土壤 N 限制, 角度大于 45° 表示微生物受到土壤 P 限制, 微生物 N 限制随着角度减小而增大, P 限制随着角度增大而增大^[16]。

采用 R4.1.0 软件对试验数据进行统计分析。运用单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 分析不同撂荒年限土壤理化性质、胞外酶活性及其化学计量比差异, 采用 LSD 法多重比较同一土层下各变量在不同撂荒年限间的差异。对酶活性、酶化学计量比与土壤理化性质进行主坐标 (PCoA) 分析, 并利用 vegan 包中 “envfit” 函数将土壤理化因子与 PCoA 轴得分做相关分析以探究影响微生物养分限制的关键土壤因子。

2 结果与分析

2.1 不同撂荒年限土壤养分含量及化学计量比特征

不同撂荒年限下土壤养分含量及化学计量比的结果见表 2, 撂荒年限对土壤 SOC, TN, TP, AN 和 AP 等指标均有显著影响。在 0—10 cm 土层间, 土壤 SOC 和 TN 含量随撂荒年限的增加而显著增加, 撂荒 10 a, 20 a, 25 a 和 33 a 土壤 SOC 含量分别较撂荒 5 a 时增加了 17.62%, 32.47%, 25.55%, 2.90%; 土壤 TN 含量分别增加了 24.45%, 40.42%, 31.91%, 5.32%。土壤 SOC 与 TN 含量均在撂荒 20 a 达到峰值后有所下降, 但总体仍呈现增加的趋势。TP 含量则随撂荒年限的增加而显著减少 ($p < 0.05$)。土壤 AN 与 AP 含量随撂荒年限的增加呈先增后减趋势, 总量上仍较撂荒 5 a 时有所增加。在 10—20 cm 及 20—40 cm 土层间, 土壤 SOC, TN 含量均随撂荒年限的增加呈不显著的下降趋势, TP 则显著减少 ($p < 0.05$)。整体而言, 撂荒显著增加了土壤 SOC 与 TN 含量, 但 TP 含量会随撂荒年限的增加而减小。

随着撂荒年限的增加,土壤 C : N 在各土层中未发生显著改变。土壤 C : P 在 0—10 cm 土层间随撂荒年限的增加而显著增大,在 10—20 cm 土层间随撂荒年限的增加呈不显著的增加趋势,在 20—40 cm 土层中随年限的增加而显著降低。土壤 N : P 变化随撂荒年限变化并不显著。

表 2 不同撂荒年限下土壤养分及其化学计量比在不同土层间的变化特征

Table 2 Changes of soil nutrients and their stoichiometric ratios in different soil layers with different abandoned years

土壤理化性质	土层深度/cm	撂荒年限/a				
		5	10	20	25	33
SOC/(g · kg ⁻¹)	0—10	16.91±2.92Ba	19.89±0.75ABa	22.40±1.4Aa	21.23±1.43ABa	17.4±0.05Ba
	10—20	12.73±0.59Aa	11.69±1.24Ab	11.62±1.7Ab	12.07±1.78Ab	10.21±0.08Ab
	20—40	11.74±1.61Aa	9.56±0.7ABb	9.00±0.72Bb	6.21±0.57BCc	8.77±0.88Cc
TN/(g · kg ⁻¹)	0—10	0.94±0.17Ca	1.17±0.07ABCa	1.32±0.12Aa	1.24±0.07ABa	0.99±0.01BCa
	10—20	0.70±0.04Aa	0.67±0.05Aa	0.66±0.05Ab	0.69±0.11Ab	0.58±0.05Ab
	20—40	0.64±0.09Aa	0.55±0.03ABb	0.49±0.04ABc	0.34±0.04Cc	0.48±0.07BCc
TP/(g · kg ⁻¹)	0—10	0.71±0.05Aa	0.68±0.01Aa	0.67±0.01Aa	0.60±0.01Ba	0.52±0.02Ca
	10—20	0.70±0.03Aa	0.66±0.02ABa	0.61±0.03BCb	0.58±0.01Ca	0.50±0.02Da
	20—40	0.64±0.02Aa	0.56±0.01BCb	0.59±0.01Bb	0.52±0.04CDb	0.50±0.01Da
DOC/(mg · kg ⁻¹)	0—10	31.68±4.27Aa	29.08±1.36ABa	28.38±0.62ABa	26.75±4.48ABa	23.54±0.98Ba
	10—20	17.57±1.29ABb	19.67±1.13Ab	19.69±2.37Ab	14.75±0.85Bb	17.38±0.35ABb
	20—40	16.42±1.43Ab	12.00±0.15BCc	12.72±0.16BCc	12.06±0.65Cb	15.01±1.64ABc
AN/(mg · kg ⁻¹)	0—10	8.98±0.85Aa	9.57±0.17Aa	7.66±0.20Aa	5.42±0.30ABa	9.73±1.98Ba
	10—20	7.09±0.37Bb	5.47±0.04Aa	4.87±0.11Bb	3.38±0.16Bb	5.50±0.47Cb
	20—40	4.44±0.88Ab	4.20±0.02Ab	3.61±0.78Ac	2.87±0.027Ab	3.88±0.21Ab
AP/(mg · kg ⁻¹)	0—10	7.43±0.59Ba	8.27±0.48ABa	9.90±0.3Aa	10.10±1.82Aa	8.97±0.81ABa
	10—20	6.73±0.54Da	7.30±0.46CDab	8.93±0.15Ab	8.47±0.06ABa	7.77±0.06BCb
	20—40	6.43±0.38Ca	6.63±0.38Cb	8.67±0.32Ab	8.43±0.15ABa	7.67±0.15Bb
pH	0—10	8.23±0.08Aa	8.26±0.05Aa	8.24±0.03Aa	8.25±0.07Aa	8.26±0.03Ab
	10—20	8.31±0.07Aa	8.28±0.02Aa	8.28±0.06Aa	8.32±0.06Aa	8.31±0.04Aab
	20—40	8.34±0.01Aa	8.35±0.01Aa	8.30±0.04Aa	8.35±0.07Aa	8.35±0.04Aa
C : N	0—10	17.97±0.22Aa	17.11±0.47Aa	16.97±1.16Aa	17.14±0.17Aa	17.43±0.08Aa
	10—20	18.12±0.39Aa	17.48±0.94Aa	17.48±1.27Aa	17.60±1.5Aa	17.57±1.61Aa
	20—40	18.31±0.24Aa	17.51±0.41Aa	18.25±0.25Aa	18.43±0.8Aa	18.27±1.04Aa
C : P	0—10	23.56±2.83Ca	29.43±1.41Ba	33.65±2.09ABa	35.57±2.48Aa	33.24±1.41ABa
	10—20	18.28±1.26Aa	17.7±1.28Ab	18.97±3.19Ab	20.97±3.34Ab	20.51±1.06Ab
	20—40	18.15±2.01Aa	17.03±1.01Ab	15.16±1.48ABb	12.00±1.62Bc	17.47±1.72Ac
N : P	0—10	1.31±0.17Ba	1.73±0.12Aa	1.99±0.19Aa	2.07±0.13Aa	1.91±0.09Aa
	10—20	1.01±0.09Aa	1.01±0.04Ab	1.08±0.13Ab	1.19±0.19Ab	1.17±0.09Ab
	20—40	0.99±0.1Aa	0.97±0.05Ab	0.83±0.09ABb	0.65±0.1Bc	0.96±0.13Ab

注:不同大写字母表示变量在相同土层不同撂荒年限间差异显著,不同小写字母表示变量在相同撂荒年限不同土层间差异显著($p<0.05$),下同。

2.2 不同撂荒年限的土壤酶活性变化

撂荒年限和土层深度对 C、N 和 P 获取的胞外酶活性均具有显著影响(图 1)。对 0—10 cm 土层而言,表征 C 循环的酶(BG+CBH)和 N 循环的酶(NAG+LAP)活性在撂荒前期逐年增加,在撂荒 20 a 达到最大值后开始显著下降,总体呈现出显著的下降趋势。随着撂荒年限的增加,表征 P 循环的酶(AKP)的活性则呈现升高趋势。在 10—20 cm 土层,随着撂荒年限的增加,土壤 BG+CBH,NAG+

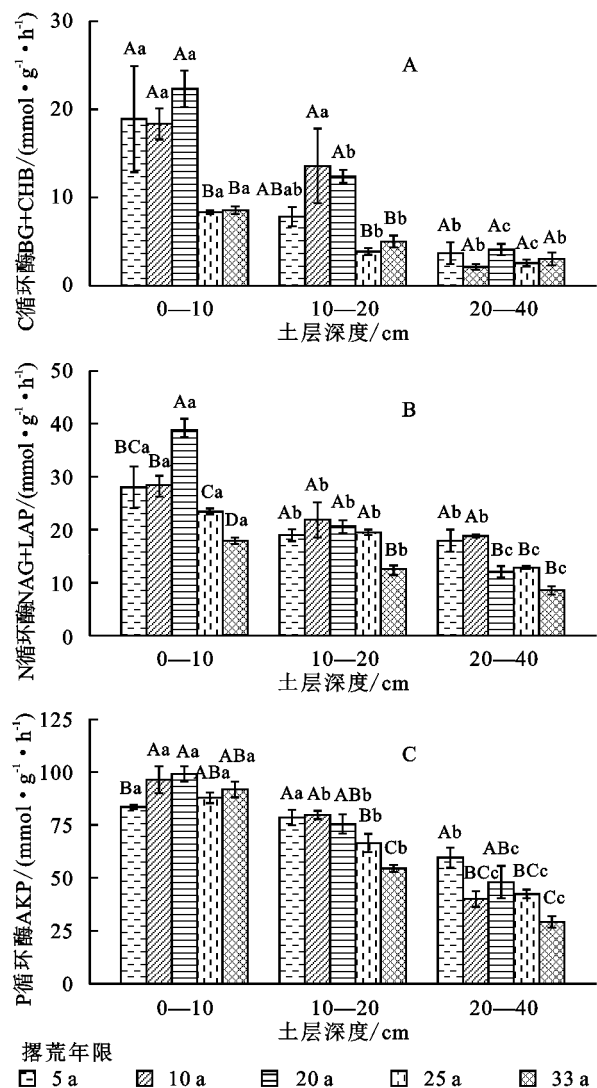
LAP 酶呈现出先增后减的变化趋势,与浅层(0—10 cm)土壤酶活性变化趋势具有一致性,AKP 酶活性随着撂荒年限的增加而显著降低。在更深层土壤(20—40 cm)间,各类土壤胞外酶活性均随着撂荒年限的增加而显著降低,相较于表层,深层土壤酶活性普遍偏低。

2.3 不同撂荒年限土壤酶化学计量比变化

对不同撂荒年限下的酶化学计量比进行分析,结果表明:撂荒年限对酶化学计量具有显著影响。整

体上,C和N酶活性比($C:N_{EEA}$)、C和P酶活性比($C:P_{EEA}$)和N和P酶活性比($N:P_{EEA}$)在不同撂荒年限土壤中的变化范围分别为0.25~0.87,0.20~

0.67,0.69~0.80(图2),且均随着撂荒年限的增加呈显著的降低趋势($p<0.05$),这与土壤各类胞外酶活性变化趋势基本一致。



注:不同大写字母表示变量在相同土层不同撂荒年限间差异显著,不同小写字母表示变量在相同撂荒年限不同土层间差异显著($p<0.05$),下同。

图1 不同撂荒年限土壤酶活性在不同土层中的变化

Fig. 1 Changes of soil enzyme activities in different soil layers with different abandoned years

撂荒年限显著影响土壤微生物养分限制特征(图3)。其中,向量长度(变化范围0.114~0.427)和夹角(变化范围63.27°~75.23°)在不同撂荒年限间差异显著($p<0.05$),表明撂荒年限影响了土壤微生物养分限制。在不同土层间,随撂荒年限的增加,向量长度总体呈减小趋势(图3A),表明微生物受到C限制的程度随撂荒年限的增加而减弱。不同撂荒年限下的土壤酶化学计量在不同土层间的向量角度均大于45°,且随撂荒年限的增加而增加,这表明微生物受到强烈的P限制,且其限制程度随撂荒年限增加呈现出增加趋势(图3B,C)。

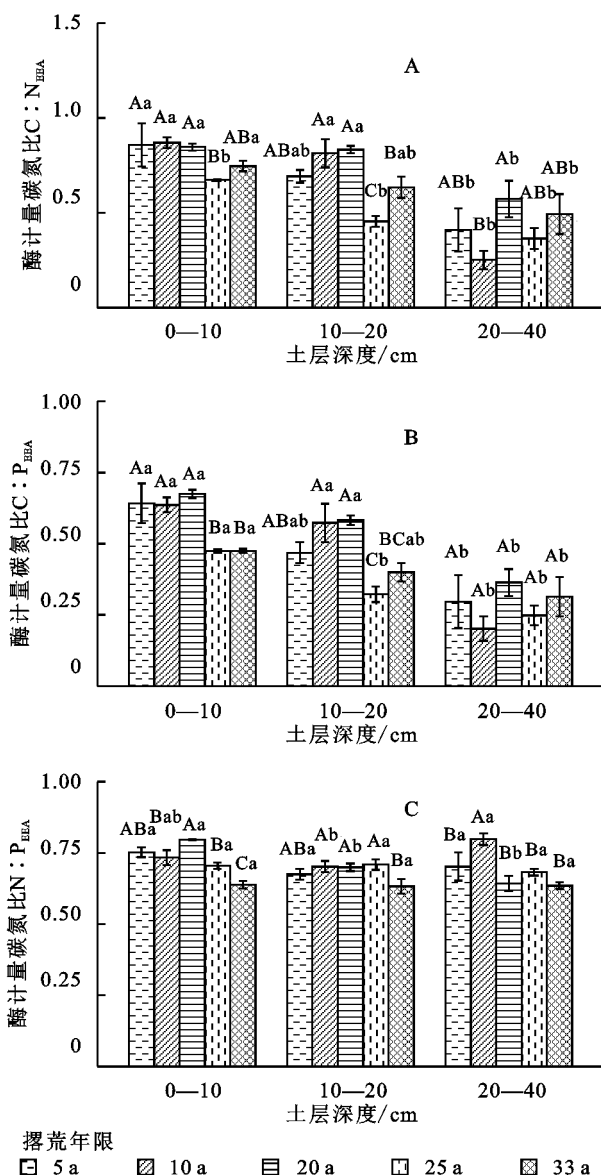


图2 不同撂荒年限土壤酶计量在不同土层中的变化

Fig. 2 Changes of soil enzyme stoichiometry in different soil layers with different abandoned years

2.4 不同撂荒年限土壤理化因子对土壤酶活性及其化学计量比的影响

分别以土壤酶活性及酶计量比为响应变量,以土壤理化性质为解释变量进行主坐标(PCoA)分析后,将土壤理化因子与PCoA轴得分做相关分析,得到各土层间影响不同撂荒年限土壤微生物养分限制的关键因子,结果如图4所示。在0—10 cm土层间,影响土壤酶活性及其化学计量比的土壤理化因子为DOC、AN和TP(图4A,D);在10—20 cm土层间,影响土壤酶活性的主要土壤理化因子为TP、AN和AP(图4B),影响土壤酶化学计量比的主要土壤理化

因子为 DOC 和 AN;在 20—40 cm 土层间,影响土壤酶活性的主要土壤理化因子为 TP,影响土壤酶化学计量比的主要土壤理化因子为 AP。

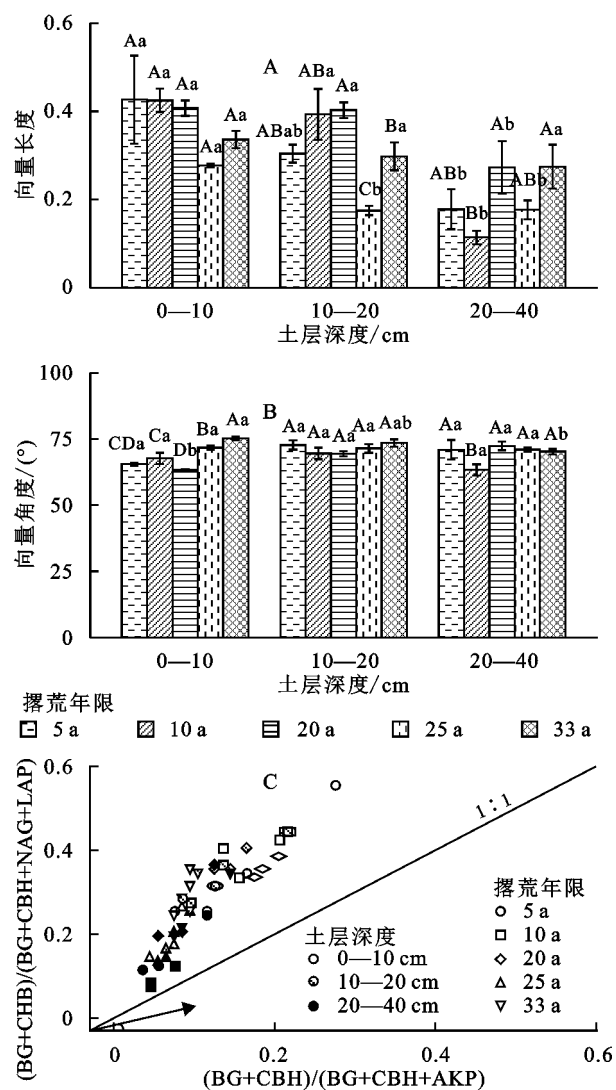


图 3 不同撂荒年限土壤酶化学计量的向量长度 (VL) 和角度 (VA) 及其计量关系

Fig. 3 Vector length (VL), angle (VA) of soil enzyme stoichiometry and their relationship in different soil layers different with different abandoned years

3 讨论

3.1 不同撂荒年限对土壤养分的影响

本研究选取了土壤 SOC、TN 和 TP 等指标来反映渭北旱塬地区不同年限撂荒地土壤养分的演变规律(表 2),发现土壤养分含量在不同退耕年限之间存在显著差异($p < 0.05$)。在撂荒前期(5~20 a),土壤 SOC 和 TN 含量显著增加,与前人研究结果基本一致^[17]。这可能是由于撂荒前期,耕地刚刚停止施肥,土壤有机质及其他养分含量高,增加了地上植物物种多样性和植被覆盖度。同时地上植物凋落物的腐烂

分解增加了土壤养分含量,故而土壤 C 和 N 含量呈上升趋势。但 SOC 和 TN 含量在撂荒 20 a 达到峰值后又呈现下降趋势,这种动态变化可能是由地上群落在植被演替过程中的变化引起的,有研究表明地上物种多样性和地上生物量在撂荒中期时达到最高,而后下降^[18],这与本研究中土壤 SOC 和 TN 的变化趋势一致,说明在撂荒后期地上生物量减少,导致土壤有机质输入量降低,造成土壤 SOC 和 TN 含量在撂荒 20 a 后下降,但仍高于撂荒初期的土壤养分含量。土壤 TP 含量随着撂荒年限的增加而逐年降低,这可能是由于恢复过程植物的生长繁殖造成了土壤 P 含量的大量消耗,但凋落物分解过程中向土壤输入的 P 含量较低,导致土壤 TP 含量下降。

撂荒地土壤 SOC、TN 和 TP 等由表层到下层呈现逐层递减的趋势,且表层土壤养分含量显著高于下层,这与前人研究结果一致^[19]。这是因为表层土壤受植被枯落物养分归还的影响,因此这些养分在土壤中存在表聚现象。综合来看,渭北旱塬坡耕地撂荒至 33 a,土壤 C 和 N 含量随着撂荒年限的增加呈现先增后减但总体增加的趋势,而土壤 P 含量则显著减少。

撂荒年限影响土壤养分变化,不同撂荒年限的土壤 C、N 和 P 化学计量比也反映了这种变化。但在本研究中,不同土层间的土壤 C:N 变化并不显著,这与现有的研究结果基本一致^[20-21]。结果表明,土壤 C 和 N 含量间存在内稳态^[22],因此土壤 C:N 在不同撂荒年限间的变化相对稳定。而土壤 C:P 和 N:P 总体上呈现增加趋势,意味着土壤 P 随着撂荒年限的增加而愈发匮乏,从侧面反映出土壤微生物受到了强烈的 P 限制。

3.2 不同撂荒年限对土壤酶活性及化学计量变化的影响与关键驱动因子

胞外酶在有机质分解和养分循环中起着重要的作用,能在一定程度上反映微生物的生长和代谢过程中的能量(C)和养分限制(N 和 P)情况^[7]。本研究中,在撂荒前期(前 20 a),随着撂荒年限的增加,参与土壤 C、N 和 P 循环的胞外酶活性显著增加,这与王兴等^[23]对黄土高原农田撂荒过程中酶活性变化特征的研究结果一致。有研究表明,胞外酶活性与有机质的分解有关^[24],因此耕地撂荒后进入自然恢复阶段转化为草地后,植物凋落物等有机质输入量增加,土壤有机质逐年累积,增加了土壤微生物的养分来源,进而刺激微生物分泌大量的胞外酶^[25]。在撂荒 20 a 以后,群落演替至稳定阶段,地面植被及物种多样性开始降低,且随着撂荒年限的增加土壤养分含量下降,限制了土壤微生物的生长代谢,因此土壤胞外酶活性也随之降低。

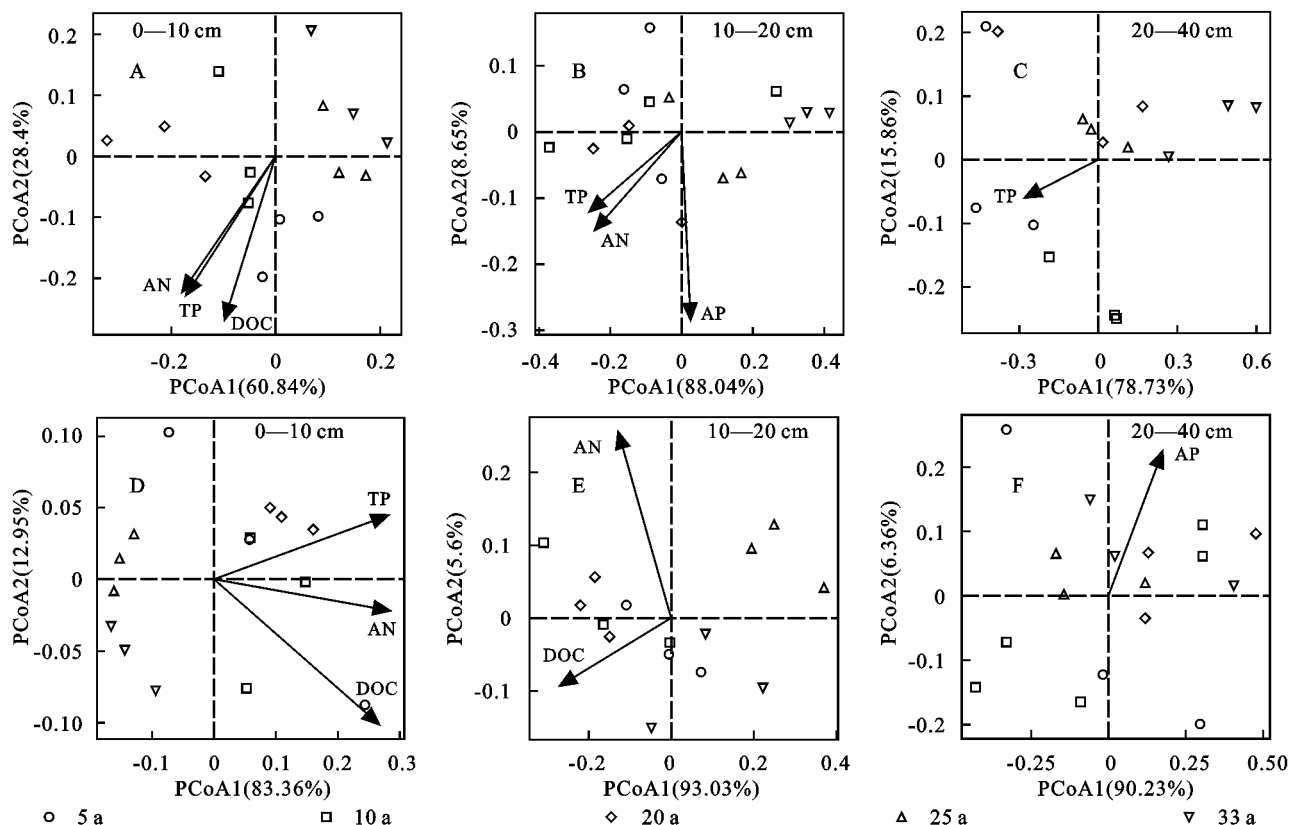


图 4 不同撂荒年限土壤酶活性及其化学计量比与土壤养分及其计量比的主坐标分析

Fig. 4 Principal coordinate analysis (PCoA) displaying the relationships among the soil enzymes and their stoichiometric ratios, and soil nutrients and their stoichiometric ratios in different abandoned years

土地利用的转变会改变植被盖度和土壤理化性质,微生物代谢受到生物和非生物因子的调节,进而对土壤酶活性及其化学计量比产生影响^[26]。本研究发现 TP、AN、AP 和 DOC 显著影响土壤酶活性及其化学计量比,说明在不同撂荒年限间这 4 个因素在调节黄土丘陵区撂荒地土壤酶活性及酶计量比的变化中发挥了主要的驱动作用(图 4)。在本研究中,酶化学计量的向量长度随撂荒年限的变化说明微生物受到 C 限制的程度随着撂荒年限的增加得到了一定程度的缓解,这说明表明耕地撂荒会显著提高土壤 SOC 含量,进而缓解了微生物 C 限制。酶化学计量的向量角度变化表明,随撂荒年限的增加,微生物受 P 限制的程度也随之增加。这是由于黄土高原生物生长对 P 元素吸收利用率不高^[27],同时随撂荒年限的增加而增加的土壤 C:P 和 N:P 也说明了土壤 P 含量较之 C 和 N 含量的相对不足,进一步加剧了微生物受到 P 限制的情况。Xiao 等^[28]的研究表明,在黄土高原次生演替过程中,土壤养分含量与微生物 C 和 P 限制显著相关,这与本研究结果一致。

研究发现,随着土层深度的加深,影响土壤酶活性的因子逐层减少。这主要与凋落物和细根残体在土壤中的垂直分布密切相关^[29],因为表层土壤较深

层土壤含有更多的微生物,会加速植物枯落物的分解,导致土壤中的 DOC 含量较高,故而 DOC 成为表层土壤(0—10 cm,10—20 cm 土层)酶活性随撂荒年限变化的关键驱动因子,这与 DOC 在不同土层间的分布情况(表 2)相符。同时,土壤 DOC 的含量会影响土壤微生物可利用 C 的供给情况^[30],本研究中土壤 DOC 含量随着撂荒年限的增加而逐年减少(表 2),促使微生物需要分泌更多的 C 获取酶来维持自身养分平衡,从而使 C 循环酶即(BG+CBH)活性在撂荒前期随着撂荒年限的增加而增加(图 1A)。

撂荒后土壤 N:P 在各土层均随撂荒年限的增加而显著增加(表 2),这表明在植被恢复期间 P 是该生态系统的主要限制因素^[31],且土壤酶矢量模型结果也表明微生物受到了较为强烈的 P 限制,这也与土壤 TP 含量是限制酶活性和酶计量比的主要因子这一结果吻合。这可能是由于自然演替过程中,随着植被多样性的提高,植物群落对土壤养分的需求量变得更大,导致微生物可利用的养分不足^[32],进而促使微生物分泌更多的胞外酶来缓解由于植物竞争引起的养分限制情况。P 元素之所以会成为限制酶活性的关键因子,是因为在生态系统中,C 和 N 都可以通过生物途径来进行外源补充,但 P 元素的含量主要

与成土母质有关^[1],且其扩散到土壤中的速率较低,随撂荒年限的变化并不显著。但长时间的植被生长会消耗更多的 P,这就导致微生物 P 限制随着撂荒年限的增加而不断加剧。

4 结 论

(1) 撂荒能够显著提高土壤 C 和 N 含量,随撂荒年限增加土壤 SOC 和 TN 含量呈现先增后减的趋势,且二者均在撂荒 20 a 时达到峰值后下降,但总体上仍显著增加;土壤 P 含量随撂荒年限的增加显著降低。

(2) 撂荒显著改变了土壤酶活性:随着撂荒年限的增加,土壤 C 获取(BG+CBH)、N 获取酶(NAG+LAP)活性显著降低,P 获取酶(AKP)活性在 0—10 cm 土层间显著增加,但在更深土层(10—20 cm, 20—40 cm)间显著降低。

(3) 撂荒可以缓解土壤微生物受 C 限制的程度,但随着撂荒年限的增加,微生物受到 P 限制的程度反而加剧。土壤 DOC、TP 和 AN 含量是驱动酶活性及其计量比变化的关键因子。

综上,本研究通过探究胞外酶活性及其化学计量比与撂荒年限的关系,揭示了自然撂荒条件下植被恢复过程中的微生物养分限制特征。研究表明,撂荒对土壤状况具有改善作用,且浅层土壤中的表现更为显著,但撂荒时间过久(20 a 以上)就会加剧微生物 P 限制,因此对经过长年撂荒的土地应当适量施用磷肥,以期改善其土壤状况。

参考文献:

- [1] Cui Y, Fang L, Guo X, et al. Natural grassland as the optimal pattern of vegetation restoration in arid and semi-arid regions: Evidence from nutrient limitation of soil microbes [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 648: 388-397.
- [2] 乔文静,戴银月,张伟,等.黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系[J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5687-5698.
- Qiao W J, Dai Y Y, Zhang W, et al. Relationship between the vegetation community and soil nutrient and enzyme activity during the restoration of abandoned land in the Loess Hilly Region[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5687-5698.
- [3] 崔晓临,雷刚,王涛,等.退耕还林还草工程实施对洛河流域土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 68-73.
- Cui X L, Lei G, Wang T, et al. Impacts of grain for green project on soil erosion in Luohe river basin of northern Shaanxi Province, China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 68-73.
- [4] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 63-68.
- Deng J C, Gao P, Mu X M, et al. Impacts and advice of the grain for green project to ecological environment on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 63-68.
- [5] 赵晓单,曾全超,安韶山,等.黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1541-1551.
- Zhao X D, Zeng Q C, An S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics of grassland soils and plant roots relative to enclosure history on the Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1541-1551.
- [6] Guo Z, Zhang X, Green S M, et al. Soil enzyme activity and stoichiometry along a gradient of vegetation restoration at the Karst Critical Zone Observatory in Southwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(16): 1916-1927.
- [7] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. *Nature*, 2009, 462(7274): 795-798.
- [8] 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.
- [9] 钟泽坤,杨改河,任成杰,等.黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 411-421.
- Zhong Z K, Yang G H, Ren C J, et al. Effects of farmland abandonment on soil enzymatic activity and enzymatic stoichiometry in the Loess Hilly Region, China [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 411-421.
- [10] Zhong Z, Zhang X, Wang X, et al. Soil bacteria and fungi respond differently to plant diversity and plant family composition during the secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2020, 448: 183-200.
- [11] Yuan X, Niu D, Gherardi L A, et al. Linkages of stoichiometric imbalances to soil microbial respiration with increasing nitrogen addition: Evidence from a long-term grassland experiment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 138: 107580-107591.
- [12] Moore S, Evans C D, Page S E, et al. Deep instability of deforested tropical peatlands revealed by fluvial organic carbon fluxes[J]. *Nature*, 2013, 493(7434): 660-663.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000: 200-495.

- Bao S D. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:200-495.
- [14] 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.
- [15] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009,41(6):1180-1186.
- [16] Moorhead D L, Sinsabaugh R L, Hill B H, et al. Vector analysis of ecoenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016,93:1-7.
- [17] Deng L, Kim D G, Li M, et al. Land-use changes driven by 'Grain for Green' program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019,177:101-115.
- [18] Zhang C, Liu G, Song Z, et al. Interactions of soil bacteria and fungi with plants during long-term grazing exclusion in semiarid grasslands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,124:47-58.
- [19] 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 X R, Shao M A. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(2):603-612.
- [20] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007,85(3):235-252.
- [21] Li D, Niu S, Luo Y. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2012,195(1):172-181.
- [22] Yang Y, Luo Y. Carbon:nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2011,20(2):354-361.
- [23] 王兴,钟泽坤,简俊楠,等.模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响[J].*环境科学*,2022,43(5):2812-2821.
Wang X, Zhong Z K, Jian J N, et al. Effects of simulated warming and increased precipitation on soil extracellular enzyme activity and enzymatic stoichiometry of abandoned grassland [J]. *Environmental Science*, 2022,43(5):2812-2821.
- [24] Cui Y, Fang L, Guo X, et al. Eoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,116:11-21.
- [25] 薛悦,康海斌,杨航,等.秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征[J].*环境科学*,2022,43(1):550-559.
Xue Y, Kang H B, Yang H, et al. Extracellular enzyme stoichiometry and microbial metabolism limitation during vegetation restoration process in the middle of the Qinling Mountains, China[J]. *Environmental Science*, 2022,43(1):550-559.
- [26] Soares M, Rousk J. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019,131:195-205.
- [27] 邓健,张丹,张伟,等.黄土丘陵区刺槐叶片—土壤—微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J].*生态学报*,2019,39(15):5527-5535.
Deng J, Zhang D, Zhang W, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and homeostasis characteristics of leaves, soil, and microbial biomass of robinia pseudoacacia forests in the Loess Hilly Region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(15):5527-5535.
- [28] Xiao L, Li P, Shi P, et al. Soil nutrient stoichiometries and enzymatic activities along an elevational gradient in the dry-hot valley region of southwestern China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019,65(3):322-333.
- [29] Xu Z, Yu G, Zhang X, et al. Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China(NSTEC)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017,104:152-163.
- [30] 黄懿梅,闫浩,安韶山,等.黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J].*环境科学*, 2013,34(8):3223-3230.
Huang Y M, Yan H, An S S, et al. Effects of different aspects on soil microbial biomass and dissolved organic carbon of the Loess Hilly Area[J]. *Environmental Science*, 2013,34(8):3223-3230.
- [31] 肖好燕,刘宝,余再鹏,等.亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响[J].*应用生态学报*, 2016,27(4):1031-1038.
Xiao H Y, Liu B, Yu Z P, et al. Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(4):1031-1038.
- [32] Jiao F, Wen Z M, An S S, et al. Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013,58:249-254.