

黄土高原刺槐人工林根际和非根际土壤磷酸酶活性对模拟降水变化的响应

刘迪^{1,2}, 邓强³, 时新荣^{1,3}, 袁志友^{1,3}

(1.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; 2.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 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)

摘 要:利用野外控制穿透雨试验,分析了 7 个降水梯度处理(增水 20%,60%,80%,减水 20%,60%,80%和对照)对黄土高原刺槐人工林根际和非根际土壤碱性磷酸酶活性的影响。结果表明:0—20 cm 和 20—40 cm 土层增水处理的根际土壤磷酸酶活性分别比对照处理高 55.9%和 88.3%,非根际土壤磷酸酶活性分别高 109%和 121%。减水处理的土壤磷酸酶活性没有明显低于对照,但是显著低于增水处理。0—20 cm 的土壤磷酸酶活性在 3 个增水梯度上根际间差异不显著,但在 3 个减水梯度上差异显著。磷酸酶活性与土壤含水量和土壤有机磷含量均呈显著正相关关系。上述结果说明在半干旱地区短期降水增加对土壤磷酸酶活性的影响比短期干旱的影响大,降水变化可以通过影响土壤含水量、土壤有机磷和生物量改变土壤磷酸酶活性。研究降水对土壤酶活性的影响对气候变化下黄土高原植被恢复具有重要意义。

关键词:降水变化;磷酸酶活性;根际土;非根际土;黄土高原;人工林;水土保持;控制试验

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0095-09

Responses of Phosphatase Activity in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils to Simulated Precipitation Changes in Planted *Robinia pseudoacacia* Forest on the Loess Plateau

LIU Di^{1,2}, Dengqiang³, SHI Xinrong^{1,3}, YUAN Zhiyou^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Forestry, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This study investigated the responses of phosphatase in rhizosphere and non-rhizosphere soils in a planted *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau via a manipulative throughfall experiment. Increased precipitation enhanced the phosphatase activities in rhizosphere soils by 55.9% and 88.3% in 0—20 and 20—40 cm layers, respectively. Increased precipitation also enhanced the phosphatase activities in non-rhizosphere soils by 109% and 121%, respectively. In contrast, decreased precipitation was not significantly lower than the control but obviously lower than increased precipitation. The difference of soil phosphatase activity between rhizosphere and non-rhizosphere in 0—20 cm layer was not significant across the precipitation gradients, but significant across the drought gradients. Soil phosphatase activity was positively correlated with both soil water content and soil organic phosphorus content. These results indicated that precipitation increase more affected the soil phosphatase activities than drought in a short time in semi-arid region. Changing precipitation affected soil phosphatase activity through impact on soil moisture, soil organic phosphorus and biomass. It was important for vegetation restoration in planted forest on the loess under global climate

收稿日期:2019-03-09

修回日期:2019-04-13

资助项目:国家自然科学基金面上项目(31570438);陕西省百人计划(A289021701);陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JZ3002);国家重点研发计划(2016YFA0600801)

第一作者:刘迪(1992—),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事人工林生态系统与气候变化研究。E-mail:qfshliudi@163.com

通信作者:袁志友(1971—),男,山东济南人,研究员,博导,主要从事全球变化生态学。E-mail:zyyuan@ms.iswc.ac.cn

change to study the influence of precipitation on soil phosphatase activity.

Keywords:precipitation; phosphatase activities; rhizosphere soil; non-rhizosphere soil; Loess Plateau; planted forests; soil and water conservation; manipulative experiments.

人类活动导致的全球变暖使降水格局发生改变, 温度上升增加了海洋和陆地的蒸腾, 导致降雨增加, 同时也会增加蒸散量, 其结果是进一步减少土壤的湿润度, 干旱地区温度升高可能会使本地区更加干旱^[1]。多个大气循环模型预测未来极端降水事件和极端干旱事件发生的频率会显著增加^[2]。降水变化

森林生态系统

影响土壤物理化学性质^[3]、分解者活动和有机物质分解速率, 从而改变土壤养分动力学和生物有效性^[4-5]。在全球尺度上, 温度上升导致连续无雨日数和连续降雨日数等极端降水指数有显著升高的趋势; 在区域尺度上, 尤其是生态环境脆弱的地区, 极端降水事件更加受到广泛关注^[6]。

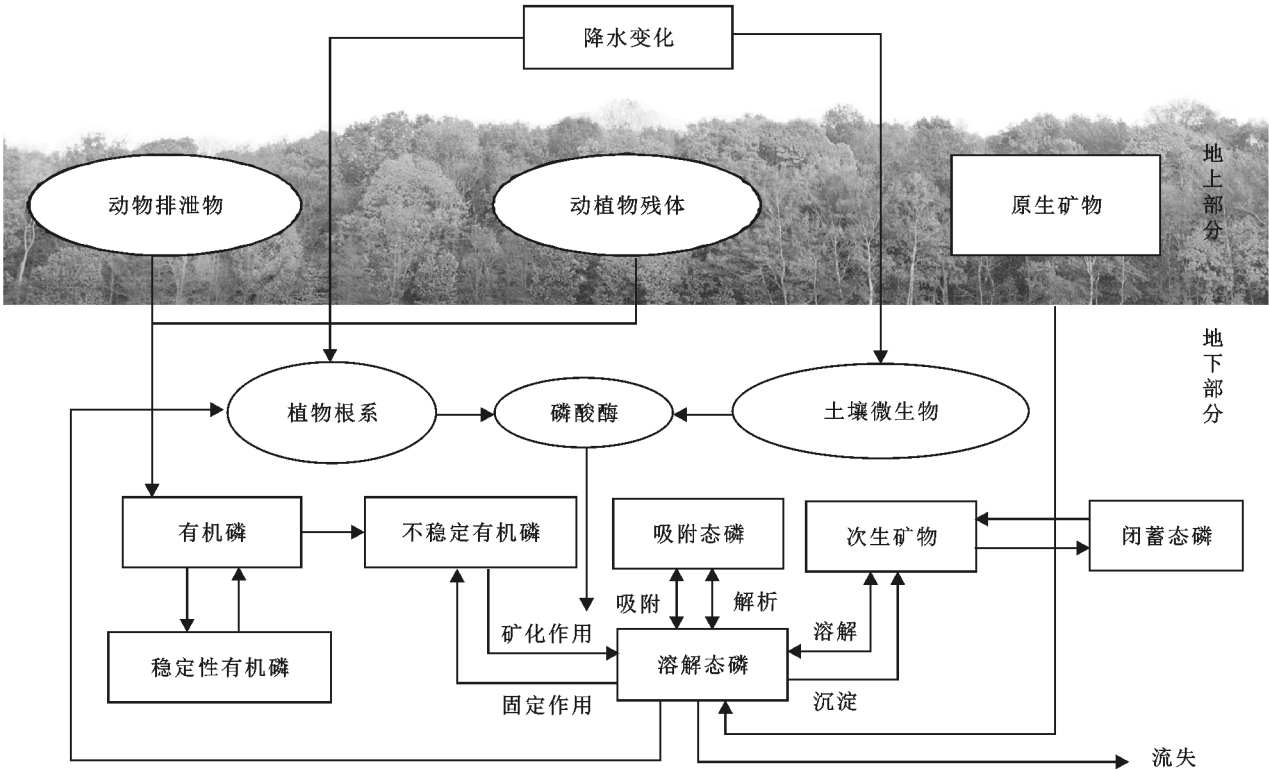


图 1 降水变化影响土壤有机磷的概念

土壤磷酸酶(Soil phosphatase)是催化土壤有机磷加快矿化的一类水解酶的合称, 主要来自植物根系和土壤微生物, 也有少部分来自动植物残体^[7]。土壤磷酸酶活性是衡量土壤有机磷矿化速率和磷素有效性的重要指标^[8], 有学者认为, 在磷酸酶缺乏的情况下, 土壤有机磷的释放需要几百年的时间^[9]。根据已有研究, 土壤有机磷主要来自动植物残体和动物排泄物, 其在土壤中可进行不断转化, 降水对土壤磷酸酶以及有机磷矿化过程影响机制如图 1 所示, 磷酸酶的催化作用在此过程中必不可少^[10], 并且与植物根系相互作用, 而细根(直径 $\leq 2\text{ mm}$)因大的根系表面积和强的活性, 与磷酸酶活性关系密切^[11], 研究发现, 细根生物量越大, 根系分泌速率越高^[12]。磷酸酶活性极易受环境因子变化的影响, 其中与降水变化的关系仍不明确, 其对降水变化的响应因生态环境和植被

类型的不同而具有明显的差异性^[7-13]。磷酸酶活性与土壤有机磷的关系复杂, 有机磷作为磷酸酶的底物, 其含量升高有利于磷酸酶的产生^[14], 而过多的磷酸酶又会反作用于有机磷^[15]。目前, 有关不同降水变化对黄土高原森林生态系统土壤磷酸酶活性影响的野外试验还未见报导^[16], 其余地区已有的相关试验还未考虑在多个降水处理强度下, 尤其是极端干旱和极端降水条件下土壤磷酸酶的响应规律^[17]。由于土壤中的磷与水分密切相关, 可以预测, 在干旱的黄土高原区的土壤磷酸酶活性对降水变化的响应会与其他生态系统有所不同。

黄土高原由于其脆弱的生态环境, 极容易受到未来降水格局变化的影响, 降水已经成为黄土高原半干旱区的主要限制因素, 据近年来的统计结果显示, 黄土高原大部分区域极端干旱发生频率有升高的趋

势^[18]。刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)具有较强的抗旱能力,是黄土高原主要造林树种之一,在该地区分布非常广泛,但近年来因刺槐林地条件不适宜而逐渐出现树种结构单一、生态效益低下、林分退化等问题^[19]。在全球降水变化背景下研究刺槐林地土壤磷酸酶的变化方向对黄土高原地区植被恢复和水土保持工作有着重要指导意义。本研究以黄土高原 35 a 生刺槐人工林为研究对象,进行野外控制穿透雨试验,旨在研究:(1) 根际和非根际土磷酸酶活性对 7 个穿透雨变化强度的响应规律及原因;(2) 比较根际土与非根际土间磷酸酶活性的差异;(3) 根际和非根际磷酸酶活性在土层间的变化特征;(4) 探索影响根际和非根际土磷酸酶活性的主要因子及影响特征。为研究全球气候变化下森林土壤有机磷矿化潜力、磷素生物转化方向及其强度提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于陕西省咸阳市永寿县槐平林场(34°83'N, 108°09'E),海拔 1 382 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,冬季漫长干寒,夏季短暂温湿,年平均气温 10.8℃,年平均降雨量 602 mm,试验期间月平均降雨量和月平均气温如图 2 所示。土壤母质为黄土,土壤类型为黄绵土、褐土和黑垆土。土壤基本理化性质如下:总有机碳 19.1 g/kg,总氮 1.10 g/kg,总磷 0.67 g/kg,速效磷 16.1 mg/kg,速效钾 0.14 g/kg,土壤含水量 12.0%,pH 值 8.07。槐平林场在植被区划分类上属暖温带落叶阔叶林区域,乔木层结构较单一,现主要为林龄在 30~35 a 的刺槐人工林,其林下灌木主要有茅梅(*Rubus parvifolius* Linn.)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus* Thunb.)、山梅花(*Philadelphus incanus* Koehne)等;草本层主要包括三脉紫菀(*Aster ageratoides* Turcz.)、拉拉藤(*Humulus scandens* (Lour.) Merr.)、老鹳草(*Geranium wilfordii* maxim.)、天名精(*Carpesium abrotanoides* L.)、商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb.)等。

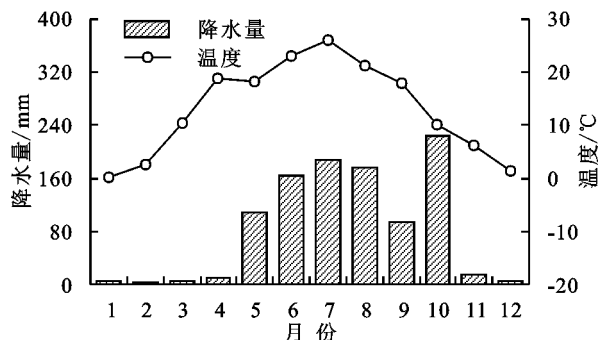


图 2 试验期间研究区月降水量和气温变化

1.2 样地设置

我们选择黄土高原刺槐人工林,于 2015 年 6 月在该研究样地进行穿透雨控制试验,共设置 21 块 15 m×15 m 的样方,样方间隔不小于 100 m,分成 7 组处理模式,分别为减水 80%(拦截穿透雨面积为林地投影面积的 80%)、减水 60%(拦截穿透雨面积为林地投影面积的 60%)、减水 20%(拦截穿透雨面积为林地投影面积的 20%)、对照、增水 20%(施加减水 20%样地拦截的穿透雨)、增水 60%(施加减水 60%样地拦截的穿透雨)、增水 80%(施加减水 80%样地拦截的穿透雨),每个处理模式设置 3 个重复样方。减水处理采用透光率 90%的 PE 薄膜作为遮雨膜,减水样方按照减水比率×样方林地投影面积布设相应面积的遮雨膜,根据样方地势走向和坡度,设置 PVC 水管收集遮雨膜上的雨水,每次降水后,将收集的雨水均匀转移到相同比率的增水样方中,来实现一定比率降水的增加和减少。

1.3 植物样和土样采集

本次研究于 2017 年 7 月进行土壤样品采集,在每个处理样地内,按照五点取样法,将 50 cm×50 cm 样方框内植物绿色部分齐地面剪下,分类装入信封袋并标记,75℃烘干至恒重后称重。用直径 9 cm 根钻分层采集 0—10 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 的土样,采用抖落法挑出 30 g 根际土与 30 g 非根际土,分别装入干净聚乙烯自封袋,4℃冰箱保存,用于测定碱性磷酸酶活性,其余土样去除可见杂物后,取约 30 g 装入铝盒,测定土壤含水量,约 200 g 自然风干,测定土壤理化指标。剩余土样用 0.2 mm 筛子冲洗,拣出细根(直径≤2 mm),75℃烘干至恒重后称重。

1.4 指标测定方法

总有机碳测定采用重铬酸钾外加热法,总氮测定采用凯式定氮法,总磷测定采用酸解—钼锑抗比色法,速效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾测定采用醋酸铵浸提—火焰原子分光光度法测定,根际与非根际碱性磷酸酶测定采用对硝基苯磷酸盐法,以单位质量土壤样品中碱性磷酸酶在单位时间内产生的酚含量表示,以下磷酸酶均指的是碱性磷酸酶(ALP),用烘干—称重法测定土壤重量含水量,用 pH 计测定土壤 pH 值^[20],土壤有机磷测定采用 Hedley 分级法^[21]。

1.5 数据处理

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验 7 种降水处理间土壤含水量、pH 值、有机磷含量、林下优势科植物地上生物量、总地上生物量、细根生物量、根际和非根际磷酸酶活性的差异,采用线性回归分析(Linear regression analysis)评价土壤含水量、

pH 值、有机磷含量、林下优势科植物地上生物量、总地上生物量、细根生物量、根际和非根际磷酸酶活性的关系以及磷酸酶土层间递减率和土层的关系。

2 结果与分析

2.1 7 种模拟降水处理下生物量和土壤理化特征

降水处理影响林下植被地上生物量和细根生物量,根据样地植被调查数据,将刺槐人工林林下植物分为茜草科(*Rubiaceae* Juss.)、菊科(*Asteraceae* Bercht. & J.Presl.)、蔷薇科(*Rosaceae* Juss.)和杂草类 4 个大类。其中茜草科植物地上生物量在不同处理间差异显著,菊科地上生物量、蔷薇科地上生物量、总地上生物量和细根生物量处理间差异均达到极显

著水($p<0.01$),而杂草类处理间差异不显著,各科地上生物量、总地上生物量和细根生物量均随降水增加表现出升高的趋势(表 1)。

不同降水处理对研究区土壤含水量和有机磷含量有明显影响,0—20 cm 土层土壤含水量减水 60%,80%和增水 80%处理间差异显著,40—60 cm 土层土壤含水量在减水 60%、增水 60%和对对照间差异显著;不同处理间 0—20 cm 土壤有机磷含量差异接近显著水平($p<0.08$),而土壤 pH 值、20—40 cm,40—60 cm 土壤有机磷含量差异不显著。减水样地土壤含水量较对照样地共减少 7.32%,增水样地土壤含水量较对照样地共增加 17.7%。土壤含水量和有机磷含量随降水增加表现出升高的趋势(表 2)。

表 1 不同降水处理样地林下植物群落组成以及生物量特征

植被指标	对照	减水 80%	减水 60%	减水 20%	增水 20%	增水 60%	增水 80%
总科数/个	8	7	7	8	6	10	10
总种数/个	12	9	9	12	7	11	12
茜草科/(g·m ⁻²)	53.2±8.98bc	23.6±3.01a	40.1±7.40ab	55.4±12.4bc	60.7±4.26c	39.5±11.8ab	48.5±13.1bc
菊科/(g·m ⁻²)	12.8±3.57b	17.2±6.93b	1.93±1.48a	16.6±5.79b	17.3±3.04bc	35.2±10.4c	10.4±2.50ab
蔷薇科/(g·m ⁻²)	7.99±0.72ab	9.58±0.80b	5.64±2.89ab	3.21±4.00ab	14.8±4.34c	7.34±1.87ab	30.5±3.29d
杂草类/(g·m ⁻²)	10.3±3.79a	10.6±3.73a	9.25±4.25a	21.8±3.27ab	10.7±6.61a	23.5±13.5b	16.4±5.33ab
总地上生物量/(g·m ⁻²)	84.3±11.4b	60.9±4.01a	56.9±4.57a	97.0±8.28b	104.0±4.06c	106.0±4.90c	106.0±8.25c
细根生物量/(g·m ⁻²)	254.0±22.6bc	133.0±31.0a	166.0±27.1ab	277.0±20.6c	381.0±21.2d	303.0±32.0cd	294.0±27.9cd

注:表中数据均为平均值±标准差。同行不同小写字母表示不同降水处理间差异显著($p<0.05$)。

表 2 7 种降水处理对土壤理化性质的影响

土壤性质	土层/cm	对照	减水 80%	减水 60%	减水 20%	增水 20%	增水 60%	增水 80%
pH	0—20	7.45±0.864aA	7.97±0.503aA	7.99±0.402aA	7.87±0.72aA	7.93±0.820aA	7.77±0.846aA	7.08±0.822aA
	20—40	7.91±0.649aA	8.22±0.437aA	8.07±0.382aA	8.07±0.552aA	8.01±0.379aA	8.02±0.677aA	7.72±0.682aA
	40—60	7.83±0.627aA	8.21±0.565aA	8.21±0.318aA	8.12±0.501aA	8.10±0.307aA	8.04±0.647aA	7.68±1.08aA
含水量/%	0—20	22.00±1.74abC	20.50±1.70aA	22.50±1.06abC	21.70±1.75abB	22.40±0.886abC	24.00±1.15bB	24.70±2.54bB
	20—40	16.80±1.03aB	15.00±0.627aB	15.40±0.800aB	15.60±2.21aA	16.90±0.147aB	17.80±1.89aA	17.70±2.29aA
	40—60	13.90±0.782aA	13.60±0.980aC	13.50±0.550aA	14.50±1.36abA	14.50±0.884abA	15.70±1.20bA	15.60±1.08abA
有机磷/ (mg·kg ⁻¹)	0—20	79.10±14.4aA	117.00±26.7abA	88.20±19.5aB	106.00±6.81aA	133.00±37.5abA	129.00±27.8abA	203.00±77.9bA
	20—40	63.50±26.1aA	67.30±47.7aA	62.50±19.6aAB	75.70±30.8aA	75.50±18.9aA	71.20±20.5aA	88.50±31.1aA
	40—60	61.80±19.9aA	61.80±7.05aA	37.00±11.9aA	72.30±32.0aA	76.10±21.7aA	67.40±28.0aA	77.90±27.7aA

注:图表中数据均为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同土层间差异显著($p<0.05$),同行不同小写字母表示不同降水处理间差异显著($p<0.05$)。

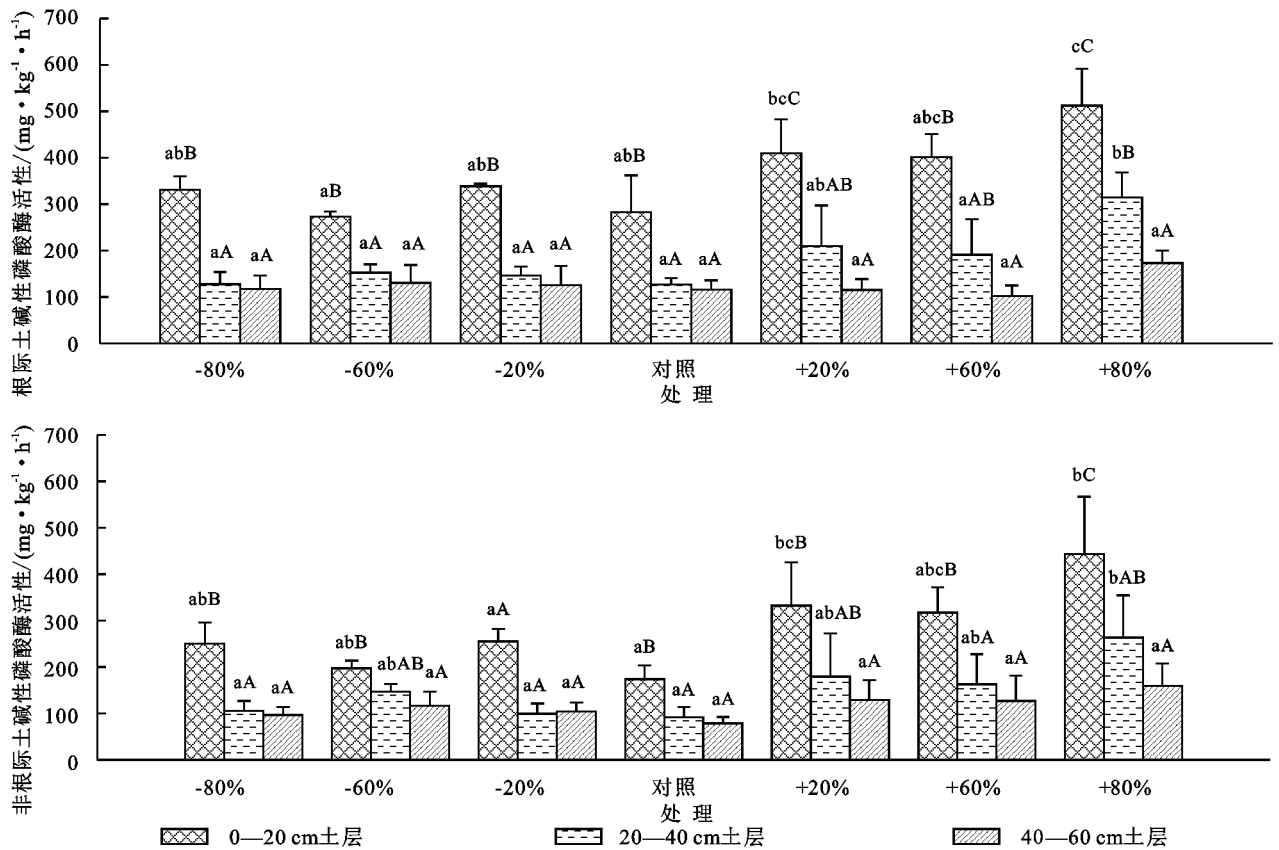
2.2 降水变化对根际土和非根际土磷酸酶活性的影响

研究区 7 个降水梯度上根际土磷酸酶活性和非根际土磷酸酶活性的变化范围分别是 103~513 mg/(kg·h),78.7~443 mg/(kg·h)。增水处理对黄土高原刺槐人工林 0—20 cm,20—40 cm 土层根际土磷酸酶活性影响明显,在 3 个增水梯度上随降水增加呈增大趋势,但是在 3 个减水梯度上,根际土磷酸酶活性没有表现出一致的规律。0—20 cm 土层减水 60%处理的根际土磷酸酶活性最小,为 273 mg/(kg·h),增

水 80%处理活性达到最大,为 513 mg/(kg·h);20—40 cm 土层减水 20%处理其活性最小,为 128 mg/(kg·h),增水 80%处理其活性达到最大,为 315 mg/(kg·h)。增水处理的土壤磷酸酶活性在根际与非根际土间差异不显著,0—20 cm 土层减水处理的土壤磷酸酶活性在根际与非根际土间差异显著,20—40 cm,40—60 cm 差异均不显著,7 种降水处理间 0—20 cm 土层根际土磷酸酶活性差异极显著,20—40 cm 土层差异显著,40—60 cm 土层差异不显著(图 3)。随着降

水增加,根际土磷酸酶在采样的 3 个土层的递减率呈现下降的趋势,0—20 cm 至 20—40 cm 土层和 20—

40 cm 至 40—60 cm 土层的变化范围分别是 38.7%~61.0%,25.0%~57.9%(图 4)。



注:不同大写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示不同降水处理间差异显著($p < 0.05$),下同。

图 3 7 种降水处理对不同土层土壤碱性磷酸酶活性的影响

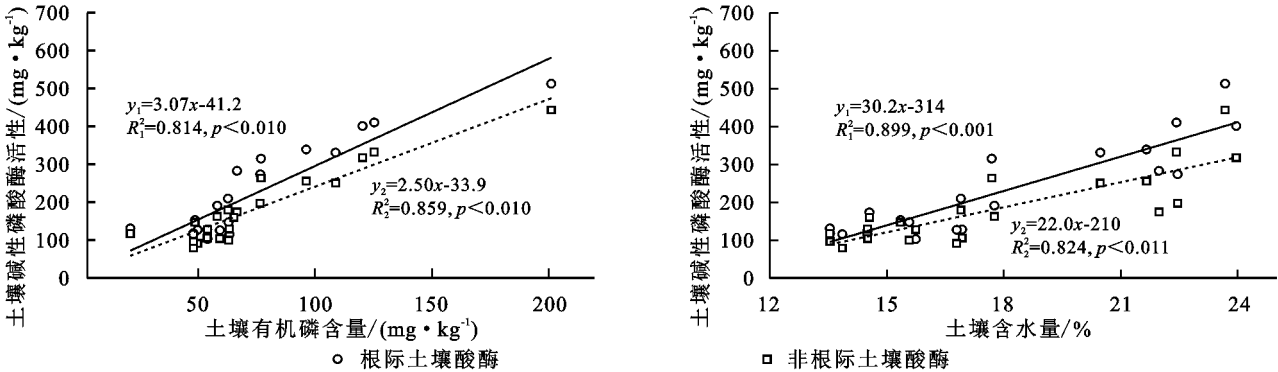
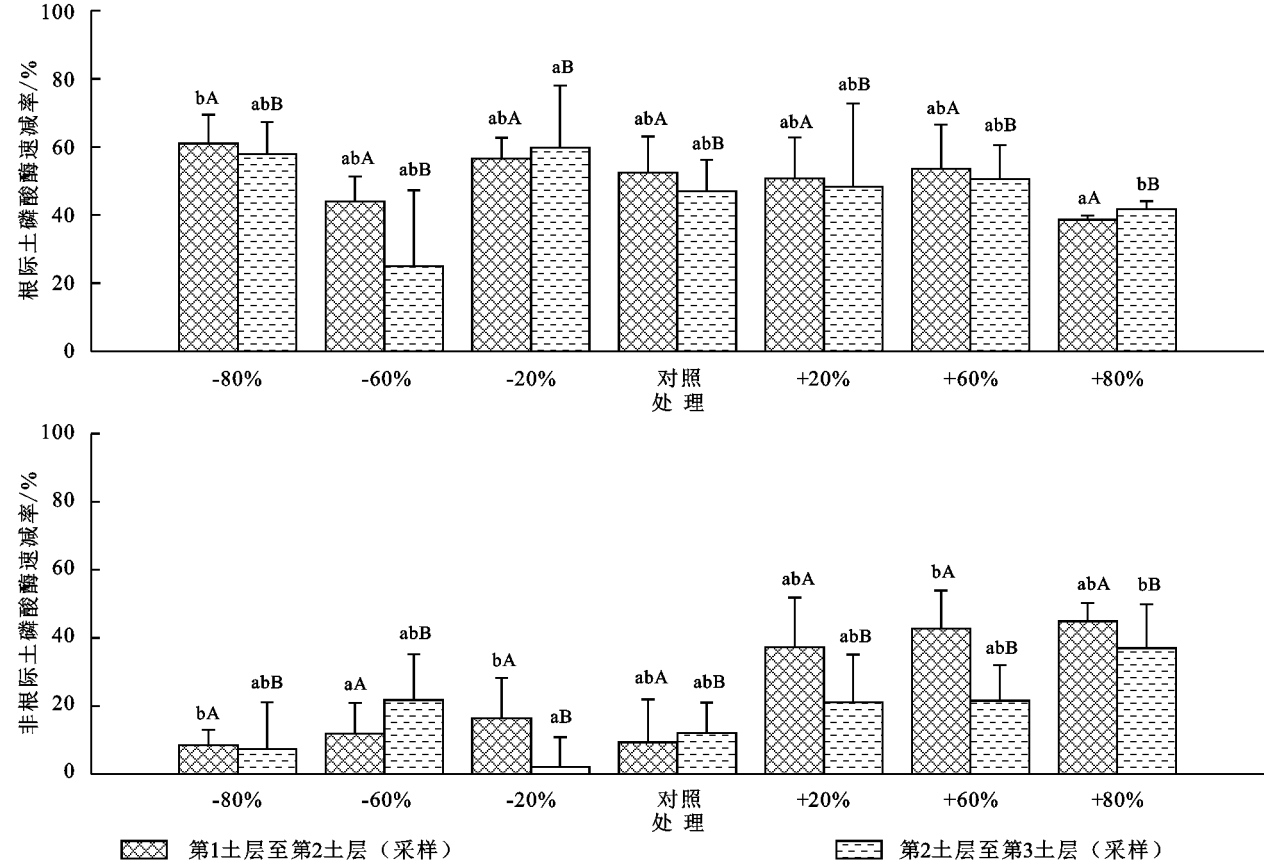
黄土高原刺槐人工林 0—20 cm, 20—40 cm 土层非根际土磷酸酶活性随降水增加表现出先减小后增大的趋势, 3 个梯度上增水处理的非根际土磷酸酶活性显著高于减水处理, 0—20 cm 土层增水样地(增水 20%, 60%, 80%)比减水样地(减水 20%, 60%, 80%)的非根际磷酸酶活性分别高 77.0, 120, 193 mg/(kg·h); 20—40 cm 土层增水样地(增水 20%, 60%, 80%)比减水样地(减水 20%, 60%, 80%)分别高 80.0, 15.5, 158 mg/(kg·h)。7 种降水处理间 0—20 cm 土层非根际土磷酸酶活性差异显著, 20—40 cm 土层接近显著水平, 40—60 cm 土层差异不显著(图 3)。与根际土磷酸酶土层间递减率不同, 非根际土磷酸酶在 3 个土层间的递减率随着降水增加总体呈现出上升趋势, 0—20 cm 至 20—40 cm 土层和 20—40 cm 至 40—60 cm 土层的变化范围分别是 8.50%~44.9%, 2.07%~37.3%(图 4)。

2.3 不同土层磷酸酶活性及土壤理化特征

研究区域 20—40 cm 土壤含水量和有机磷含量分别比 0—20 cm 土壤低 25.3% 和 41.1%, pH 值高 3.66%; 40—60 cm 土壤含水量和有机磷含量分别比 20—40 cm 土壤低 14.3% 和 9.92%, pH 值高 0.26%。在土壤纵向分布上, 土壤含水量和有机磷含量随土层

深度增加均呈下降趋势, 其中土壤含水量土层间差异达到极显著水平($p < 0.01$)。pH 值则呈上升趋势, 但土层间差异没有达到显著水平。

不同土层根际土磷酸酶活性和非根际土磷酸酶活性差异均显著。随土层深度增加, 根际土和非根际土磷酸酶活性表现出明显的下降趋势。研究区域 7 个降水处理下 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土壤根际土磷酸酶活性平均分别为 364 mg/(kg·h), 181 mg/(kg·h), 165 mg/(kg·h); 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土壤非根际土磷酸酶活性平均分别为 281 mg/(kg·h), 149 mg/(kg·h), 115 mg/(kg·h)。20—40 cm 土壤根际土磷酸酶活性和非根际土磷酸酶活性分别比 0—20 cm 土壤低 50.2%, 46.7%; 40—60 cm 土壤根际土磷酸酶活性和非根际土磷酸酶活性分别比 20—40 cm 土壤低 30.7%, 22.7%(图 3)。根际土和非根际土磷酸酶在 3 个土层间的递减率随土层深度增加而显著减小, 分别比深 20 cm 处土层的递减率高 3.36% 和 6.87%。根际土磷酸酶土层递减率要高于非根际土, 采样的 3 层土中, 0—20 cm 至 20—40 cm 土层的根际土磷酸酶递减率比非根际土高 26.1%, 第 20—40 cm 至 40—60 cm 土层则高 31.7%(图 4)。



2.4 土壤磷酸酶活性与土壤理化性质、生物量的相关性

研究区根际土磷酸酶活性与土壤含水量呈极显著正相关(图 5),与土壤有机磷呈显著正相关。非根际土磷酸酶活性与土壤含水量呈正相关关系($p = 0.011$),与土壤有机磷呈显著正相关。

根际土磷酸酶和非根际土磷酸酶活性与 pH 值呈显著负相关($p < 0.01$)。根际土磷酸酶活性与非根际土磷酸酶活性呈极显著正相关($p < 0.001$),非根际土磷酸酶随根际土磷酸酶升高而升高(图 6)。

就不同科植物来说,根际土磷酸酶活性与蔷薇科植物地上生物量呈极显著正相关,与地上生物量相关性接近显著水平($p = 0.06$)。非根际土磷酸酶活性与蔷薇科植物呈极显著正相关关系,与细根生物量显著正相关,与总地

上生物量相关性接近显著水平($p = 0.065$)。研究区磷酸酶活性与茜草科、菊科和杂草类均无显著相关关系(表 3)。

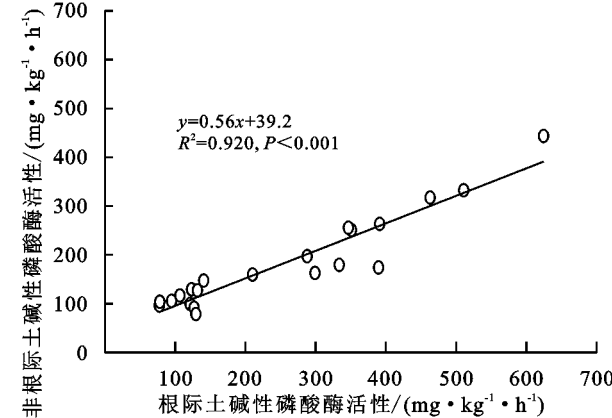


图 6 根际土碱性磷酸酶活性与非根际土碱性磷酸酶活性的关系

表 3 生物量与磷酸酶活性的相关性分析

土壤磷酸酶活性	茜草科	菊科	蔷薇科	杂草类	总地上生物量	细根生物量
R	0.227	0.030	0.713 * *	−0.154	0.420	0.373
NR	0.146	0.109	0.694 * *	−0.124	0.411	0.475 *

注:(1) *R* 表示根际土磷酸酶, NR 表示非根际土磷酸酶;(2) * * 表示相关性极显著($p<0.01$); * 表示相关性显著($p<0.05$)。

3 讨论与结论

(1)根际和非根际土壤磷酸酶活性对降水变化的响应。研究区根际土磷酸酶活性和非根际土磷酸酶活性的变化范围均在黄土高原已有研究结果的变化范围之内^[22],但低于中国东北、华南林地以及地中海灌丛地^[14,23-24]。这可能是因为黄土高原气候干燥,降水季节分配不均,加之黄土土质疏松,使该地区极易发生水土流失,而土壤水分和有机质是土壤酶活性的重要影响因子^[25],干旱的气候条件和较贫瘠的土壤条件可能是该区磷酸酶活性低于前文提到的部分地区的原因。

根际土和非根际土磷酸酶活性在增水梯度上均随降水增加表现出升高趋势,这与已有盆栽试验得出的磷酸酶活性随降水增加先升高后下降的结果不一致^[26],原因可能是本试验属于野外定位试验,野外环境因素较复杂,与室内试验结果往往不一致,黄土高原属于半干旱地区,短期增水没有使土壤达到过湿的效果。降水一方面增加了土壤微生物和植物根系活力,刺槐林植物根系、菌根和植物残留物能够渗出某些不稳定化合物,这些物质和土壤湿度的增加可以刺激微生物产生酶^[27],另一方面提高土壤有机物质含量,磷酸酶可作用底物增加^[26],这可能是穿透雨增加梯度上磷酸酶活性逐渐升高的原因。

在研究区设置的 3 个降水减少梯度上,减水 20%处理磷酸酶活性要高于对照处理,这可能是因为遮雨 20%的轻度干旱环境既保持了一定土壤水分,又增加了土壤的透气性,为植物根系和微生物活动提供了一个短期的良好环境^[17],减水 60%处理下磷酸酶活性显著降低,这与以往研究结果相同^[28]。而极端干旱的减水 80%处理下土壤磷酸酶活性有少量增加,原因尚不明确,但是明显低于增水处理,这可能是因为植物和共生微生物缓解短期干旱胁迫的一种适应机制,如丛枝菌根真菌具有磷酸酶活性,能增加寄主对磷的利用,增强其抗旱性^[29],而丛枝菌根真菌对寄主具有选择性,蔷薇科植物和豆科植物根系极易被丛枝菌根真菌侵染,试验结果表明蔷薇科植物地上生物量与磷酸酶活性显著相关;隔离降雨后土壤水分减

少,使土壤溶液中的可溶性磷素减少,而低磷环境又可以刺激根系和外生菌根分泌磷酸酶来改善植物的养分状况^[30]。非根际土磷酸酶活性在干旱梯度上随降水增加而下降,可能与稀释作用有关,但不管是根际土还是非根际土磷酸酶,其在干旱处理下的活性明显低于增水处理,干旱土壤的土壤含水量和有机质含量较低,磷酸酶可作用底物减少,土壤微生物活性下降,元素周转速率下降,植物代谢缓慢,使干旱环境中土壤磷酸酶显著低于湿润环境^[31]。

(2)根际土与非根际土间磷酸酶活性的比较。不同降水处理对非根际土磷酸酶活性的影响与根际土相同,非根际土酶活性受到根际土酶活性的强烈影响,与根际土磷酸酶活性呈明显的正相关关系,并且活性低于根际土。土壤酶主要来自土壤微生物、植物根系和动植物残体,在土壤环境中,植物与其根系周围土壤的物质交换更频繁,植物自身代谢以及与植物根系共生的微生物分泌的胞外酶首先进入根际土壤,使得根际土中酶活性比非根际更高^[15]。本研究中不同降水处理对 0—20 cm 土层的根际土磷酸酶活性影响最显著,对 20—40 cm 土层影响较低,对再深土层则没有影响,这与 Sardans 等^[32]在地中海圣栎林的穿透雨试验中得出的降水减少对 0—15 cm 土层土壤磷酸酶活性影响更明显、在空间分布上随土层深度增加影响逐渐减小的结论一致,但与王楠楠等^[7]得出的降水变化对土壤酶活性没有显著影响的结果不一致,这可能是因为黄土高原刺槐人工林这种特定环境下,1~2 a 的降水处理虽然能够影响土壤磷酸酶活性,但还仅能影响 0—40 cm 土层的土壤酶活性,对更深土层的土壤酶活性及其与之有关的各项理化指标(如土壤含水量、微生物活性和土壤有机质含量)影响还非常小。

磷酸酶土层间递减率在根际土和非根际土间有不一样的规律,根际土磷酸酶递减率随降水增加而下降,这有可能是水分增大了磷酸酶的扩散速率,减小了土层间的差异,而非根际土磷酸酶递减率则随降水增加而上升,说明水分加速了土壤磷酸酶从根际到非根际的土层内的迁移速度,但是土层间的迁移速度变化不大。

(3)降水影响不同土层根际和非根际土壤磷酸酶活性的因素。黄土高原刺槐人工林根际与非根际土磷酸酶活性随土层深度增加而显著减小,磷酸酶土层递减率也表现出显著减小的趋势,这与以往研究结果一致^[31-32]。pH 值呈增大趋势,但是土层间差异不显著。磷酸酶活性在空间上与土壤自身的异质性有相当大的关系,本研究中土壤含水量和有机磷随土层深度增加有明显的下降趋势,水分利用性直接影响土壤微生物活性和土壤有机质含量,研究表明,陆地生态系统中的土壤资源和植被覆盖是异质的,土壤水分、微生物活性、酶活性和养分含量都会受到异质性的影响^[33]。

土壤酶活性受到多种因子的共同作用,各土层土壤碱性磷酸酶并没有随 pH 值升高而升高,而是与土壤含水量和土壤有机磷呈显著的正相关关系。土壤中磷酸酶活性受土壤湿度极大影响,Brockett 等人认为,土壤含水量是影响土壤酶活性最主要的因子,且酶活性随着土壤湿度的增大而增强^[34]。土壤磷酸酶与有机磷的关系尚不明确,一部分观点认为酶具有专一性,有机磷是磷酸酶的水解底物,有机磷含量的增加会刺激磷酸酶的产生^[14],另一观点认为磷酸酶加快了有机磷的矿化速率,同时高的无机磷含量会对磷酸酶产生负反馈作用,两者呈负相关关系^[15-35],本研究结果与前者一致,这可能是因为黄土高原的短期降水虽然增加了有机磷含量,但仍未达到室内试验中人为添加的过量水平。磷酸酶活性随细根生物量的增加而增加,与王靓等^[11]的研究结果一致。研究表明,细根生物量越大根系分泌速率越高^[12]。地上生物量与磷酸酶呈正相关关系,这可能是因为植物需要一定的磷酸酶来帮助吸收土壤中的磷,生物量增加,物质循环进程加快,有利于根系生长和微生物活动产生更多磷酸酶,但生态系统物质循环过程是相当复杂的,还需更具体的研究来解释生物量与磷酸酶的关系。磷酸酶与蔷薇科植物地上生物量呈极显著的正相关关系,与茜草科植物相比,蔷薇科植物根系更容易与菌根真菌共生形成菌根,有关内蒙古草原的调查发现,在所有被调查的植物中,蔷薇科植物的丛枝菌根侵染率最高^[36],其不仅能增加植物的抗旱能力,还能分泌磷酸酶促进植物对磷素的吸收。

综上所述,与短期降水减少相比,短期降水增加对黄土高原土壤磷酸酶活性的影响更显著,且具有积极作用,这种作用随土层深度增加而减小,影响深度约至 40 cm。降水变化通过影响土壤含水量、土壤有机磷和地上植物改变土壤磷酸酶活性,进而对有机磷

矿化产生影响。研究降水变化对土壤磷酸酶的影响对黄土高原土壤磷循环研究和植被恢复具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献:

- [1] Wang Z L, Zhong R D, Lai C G, et al. Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 149-162.
- [2] Spinoni J, Vogt J V, Naumann G, et al. Will drought events become more frequent and severe in Europe[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(4): 1718-1736.
- [3] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287-295.
- [4] Yuan Z Y, Jiao F, Shi X R, et al. Experimental and observational studies find contrasting responses of soil nutrients to climate change [J]. *Elife*, 2017, 6: e23255.
- [5] Dieter D, Elsenbeer H, Turner B L. Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama [J]. *Catena*, 2010, 82(2): 118-125.
- [6] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(5): 1-22.
- [7] 王楠楠.降水变化驱动下红松阔叶林真菌结构和功能多样性的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2015.
- [8] Snell F D, Snell C T, Snell F D S, et al. *Colorimetric Methods of Analysis* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1959.
- [9] Fisher R F, Binkley D. *Ecology and management of forest soils* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [10] Yokoyama D, Imai N, Kitayama K. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the activities of four different classes of fine-root and soil phosphatases in Bornean tropical rain forests [J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1/2): 463-476.
- [11] 王靓,盛建东,陈波浪.砂培条件下两种磷效率棉花根系形态及根际特征差异[J].*中国土壤与肥料*, 2016(3): 67-72.
- [12] 王小平,肖肖,王新悦,等.连香树人工林细根生物量分布及根系分泌速率季节变化研究[J].*安徽农业科学*, 2017, 45(12): 152-156.
- [13] Sardans J, Peñuelas J. Soil enzyme activity in a Mediterranean forest after six years of drought [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 838-851.
- [14] 于星辰,刘倩,温智辉,等.不同肥力壤土、棕壤磷酸酶

- 活性对土壤培养温度和含水量的响应[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(1): 37-43.
- [15] Maseko S T, Dakora F D. Rhizosphere acid and alkaline phosphatase activity as a marker of P nutrition in nodulated *Cyclopia* and *Aspalathus* species in the Cape fynbos of South Africa [J]. *South African Journal of Botany*, 2013, 89: 289-295.
- [16] Domínguez M T, Holthof E, Smith A R, et al. Contrasting response of summer soil respiration and enzyme activities to long-term warming and drought in a wet shrubland (NE Wales, UK) [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 110: 151-155.
- [17] Esch E H, Lipson D, Cleland E E. Direct and indirect effects of shifting rainfall on soil microbial respiration and enzyme activity in a semi-arid system [J]. *Plant & Soil*, 2017, 411(1/2): 333-346.
- [18] 张耀宗, 张多勇, 刘艳艳. 近 50 年黄土高原马莲河流域降水变化特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(6): 44-52.
- [19] 王红霞, 温仲明, 高国雄, 等. 黄土丘陵区刺槐人工林与乡土植物叶片和细根功能性状比较研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 1-7.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] Cross A F, Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems [J]. *Geofisica Internacional*, 1995, 64(3/4): 197-214.
- [22] 张国秀, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 621-628.
- [23] Jordi S, Josep P, Marc E. Seasonal patterns of root-surface phosphatase activities in a Mediterranean shrubland. Responses to experimental warming and drought [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 779-786.
- [24] Huang W, Liu J, Zhou G, et al. Effects of precipitation on soil acid phosphatase activity in three successional forests in Southern China [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(1): 1901-1910.
- [25] 郝玉兰, 张荣, 孙小凤. 自然土壤中碱性磷酸酶活性状况研究[J]. *青海农林科技*, 2003(2): 13-14.
- [26] 马朋, 任庆水, 李昌晓, 等. 模拟水淹干旱胁迫对 2 年生水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)幼树盆栽土壤酶活性的影响[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2015, 37(2): 24-31.
- [27] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [28] 李帅军, 郭剑芬, 吴东梅, 等. 隔离降雨对米楮天然林土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(1): 17-25.
- [29] 胡雄. 水分胁迫对喀斯特典型恢复树种生长生理的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [30] 薛小平, 张深, 李海涛, 等. 磷对外生菌根真菌松乳菇和双色蜡蘑草酸、氢离子和磷酸酶分泌的影响[J]. *菌物学报*, 2008, 27(2): 193-200.
- [31] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [32] Sardans J, Penuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(3): 455-461.
- [33] Ladwig L M, Sinsabaugh R L, Collins S L, et al. Soil enzyme responses to varying rainfall regimes in Chihuahuan Desert soils [J]. *Ecosphere*, 2015, 6(3): 1-10.
- [34] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 44(1): 9-20.
- [35] 张艾明, 刘云超, 李晓兰, 等. 水肥耦合对紫花苜蓿土壤磷酸酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2896-2902.
- [36] 包玉英. 内蒙古草原和荒漠丛枝菌根共生多样性及其生态分布[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.