

# 黄河三角洲盐渍化荒地种植植物对土壤改良、磷形态转化及有效性的影响

刘盛林<sup>1</sup>, 丁效东<sup>2</sup>, 郑东峰<sup>1</sup>, 石宁<sup>1</sup>, 刘国利<sup>3</sup>, 孙泽强<sup>1</sup>

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部山东耕地保育科学观测试验站, 济南 250100;

2. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 3. 山东省无棣县小泊头镇农业综合服务站, 山东 滨州 251911)

**摘要:**为了明确种植不同植物对黄河三角洲盐渍化荒地改良效果、土壤磷形态转化及增效调控机制,研究了在生长芦苇的盐渍化荒地改变种植植物(柽柳、白蜡、苜蓿)的改良措施对土壤磷形态转化及有效含量的影响。结果表明:与荒地芦苇相比,3 种植物种植均能显著提高 0—20 cm 土壤磷酸酶活性,柽柳种植显著降低 0—20 cm 土壤 pH,促进 0—20 cm 土壤大颗粒团聚体形成,提高 0—40 cm 土壤有机碳含量,显著增加 0—100 cm 土壤盐渍化程度,促使土壤速效磷( $\text{Ca}_2\text{-P}$ )和缓效磷( $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$ )向难溶性磷( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ )的转化,导致土壤磷有效性降低;白蜡种植显著降低 0—100 cm 土壤盐渍化程度及 60—100 cm 土壤 pH,0—20 cm 土壤小颗粒团聚体比例增加,0—40 cm 土壤有机碳含量显著降低,促进土壤难溶性磷( $\text{O-P}$ )向缓效磷( $\text{Fe-P}$ )转化,有利于土壤磷有效性提高;苜蓿种植显著增加 0—20 cm 土壤有效磷含量,提高 0—20 cm 土壤磷酸酶活性,促进难溶性磷( $\text{O-P}$ )、缓效磷( $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$ )向速效磷的转化,0—20 cm 土壤大颗粒团聚体比例增加有利于提升土壤磷有效性,其 60—100 cm 土壤 pH 增加不利于土壤磷的有效性提高;3 种植物种植后土壤微生物量碳和微生物量磷显著降低,微生物量氮显著增加,土壤呼吸强度及脲酶活性均无显著变化。综上所述,白蜡种植最有利于降低土壤盐渍化程度和 pH,苜蓿种植最有利于 0—20 cm 土壤磷有效性的提高,3 种植物种植对 20—100 cm 土壤磷有效性无显著促进作用。由于 3 种植物对盐渍荒地改良时间较短,土壤微生物种群动态变化及对土壤磷形态转化过程及调控机制尚需深入研究。

**关键词:** 盐渍化荒地; 磷有效性; 磷形态; 磷酸酶活性; 土壤微生物

中图分类号:S158.5 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)01-0278-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.040

## Effect of Different Plants Plantation on Amelioration of Uncultivated Saline Wasteland, Soils Phosphorus Fraction and Availability in the Yellow River Delta

LIU Shenglin<sup>1</sup>, DING Xiaodong<sup>2</sup>, ZHENG Dongfeng<sup>1</sup>, SHI Ning<sup>1</sup>, LIU Guoli<sup>3</sup>, SUN Zeqiang<sup>1</sup>

(1. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Shandong),

Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100; 2. College of Resources and Environment, Qingdao Agriculture University, Qingdao, Shandong 266109; 3. Agricultural Integrated Service Station of Xiaobaotou in Wudi County, Binzhou, Shandong 251911)

**Abstract:** In order to identify the amelioration of uncultivated saline wasteland, transformation of phosphorus (P) fraction after different plants plantation in the Yellow River Delta, we investigated the dynamics of P fractions and availability after the uncultivated saline wasteland with reed (RU) was reclaimed by plantation of Chinese tamarisk (CT), Chinese ash (CA) and clover (C). Results showed that the phosphatase activity of 0—20 cm soil were significantly increased by 3 plants plantation compared with RU. CT plantation significantly decreased soil pH of 0—20 cm soil, while it significantly increased soil organic carbon (SOC) concentration of 0—40 cm soil and promoted the formation of large size aggregate particles of 0—20 cm soil, but it significantly increased soil salinity of 0—100 cm soil and accelerated transformation of P fractions from solu-

收稿日期:2020-08-03

资助项目: NSFC 山东联合基金项目(U1806215); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2018E03); 山东省大科学计划项目(20190103); 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0301)

第一作者: 刘盛林(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事盐碱地改良与土壤培肥研究。E-mail: shenglinsaas@163.com

通信作者: 孙泽强(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事盐碱地开发利用和农业水资源高效利用研究。E-mail: sunzq1977@126.com

ble P ( $\text{Ca}_2\text{-P}$ ) or slowly soluble P ( $\text{Ca}_8\text{-P}$  and  $\text{Al-P}$ ) to insoluble P ( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ) that reduced P availability. CA plantation could significantly decrease soil salinity of 0—100 cm soil and pH of 60—100 cm soil, while it accelerated transformation of P fractions from insoluble P (O—P) to slowly soluble P (Fe—P), but it increased ratio of small size aggregate particles of 0—20 cm soil and decreased SOC concentration of 0—40 cm soil that were beneficial to improve P availability. C plantation could significantly increase soil available P concentration of 0—20 cm soil with improved soil phosphatase activity of 0—20 cm soil which was much higher than those of other 3 plants. While it accelerated transformation of P fractions from insoluble P (O—P) or slowly soluble P ( $\text{Ca}_8\text{-P}$  and  $\text{Al-P}$ ) to soluble P with accelerated formation of large size aggregate particles of 0—20 cm soil. Soil microbial nitrogen was significantly increased by plantation of CT, CA and C, but soil microbial carbon and soil microbial phosphorus were significantly decreased. No significant difference was observed on soil respiration and urase activity. In this study, Chinese ash plantation could decrease soil salinity and soil pH, while clover plantation could promote soil P availability of 0—20 cm soil. Plantation of all 3 plants had no significant beneficial effect on P availability in 20—100 cm soil. However, more research is necessary to explore the long-term dynamics of soil microorganisms community and regulation mechanism on P fraction by soil microorganisms in the saline land.

**Keywords:** uncultivated saline waste land; phosphorus availability; phosphorus fraction; phosphatase activity; soil microorganisms

据统计,我国盐碱地面积约 3 600 万  $\text{hm}^2$ ,广泛分布于华北、西北、东北及沿海地区,其中黄河三角洲滨海盐碱地由于其面积大且增加速度快,农业开发利用潜力大,如何采取合理有效盐碱地改良措施、促进盐碱农田养分增效、发挥盐碱地在粮食增产中的作用显得也愈发重要<sup>[1]</sup>。黄河三角洲滨海盐碱土壤高  $\text{Na}^+$  浓度、高 pH 导致土壤理化性状不断恶化,不利于土壤团聚体的形成和保护,致使土壤微生物活性低,土壤对磷固定能力弱,磷流失严重,严重制约着滨海盐碱地作物的绿色可持续生产<sup>[2]</sup>。磷是作物的“粮食”,是支撑作物生产、保障粮食安全的基本物质基础,而磷矿是不可再生的资源,正在被加速耗竭<sup>[3]</sup>。因此,提高土壤累积态磷循环利用潜力,减少磷肥投入,是实现农业部提出的化肥农药“双减”目标的有效途径。土壤中磷的数量和形态变化是涉及物理、化学和生物因素过程的综合反映,除土壤有效磷浓度外,盐渍化土壤磷有效性和磷转化过程受到多种因素共同影响,包括土壤盐浓度、pH、无机磷组分、土壤团聚体分布、土壤微生物和酶活性等<sup>[4]</sup>,而其土地利用方式的转变能够显著改变土壤理化性质和土壤微生物种群<sup>[5]</sup>,从而调控土壤磷有效性和转化过程。传统改良方式虽然能起到改良盐碱土促进农业发展的目的,不能最大限度发挥盐渍化农田生产能力,生物改良措施是合理开发利用盐渍化荒地而不造成环境风险的重要举措,具有耗水少、效果好、经济效益和生态效益并重的优点,耐盐植物不仅作为生物泵带走盐分,还能借助根系生长和分泌物改善土壤物理性状和提升土壤肥力,是保障未来耕地面积的可行性途径,柽柳、

白蜡及苜蓿种植是当前黄河三角洲盐渍荒地开发利用重要的土地利用方式,深入理解盐碱荒地改良利用过程中磷形态转化、含量及其限制因子的变化对黄河三角洲高效生态农业发展意义重大。本研究以黄河三角洲黄河岛种植不同植物(荒地芦苇、柽柳、白蜡及苜蓿)土地的土壤为研究对象,调查荒地芦苇和种植不同植物的土壤有效磷含量和制约磷有效性因素,明确盐渍化荒地植物种植对土壤磷有效性的影响及其重要限制因素,为未来合理利用盐渍化土地提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于山东省滨州市无棣县黄河岛上( $37^{\circ}57'N$ ,  $118^{\circ}04'E$ ),黄河岛由秦口河和套尔河环抱形成,地处黄河三角洲地区,属海洋季风型大陆性气候,年平均气温  $13.1^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 598 mm,岛内土壤主要属于氯化钠盐渍土,荒地主要植物为芦苇,自 2012 年山东黄河岛国家湿地公园获批建设后,分别在荒地上开垦种植柽柳、白蜡和苜蓿等植物以改良和培肥土地,开垦后进行粗放式管理,生长过程中不施用肥料,采样时间为 2017 年 11 月 23 日。

### 1.2 试验设计与测定指标

根据黄河岛种植植物,将农场划分为荒地芦苇(RU)、柽柳(CT)、白蜡(CA)和苜蓿(C) 4 个处理,每个植物种植方式选择 3 个典型样地作为重复,每个重复区域选择干扰较小的点用土钻采集 0—100 cm 土壤样品,每 20 cm 为 1 个土层,共 5 个土层,每个重复采集 3 个点混合。除部分 0—20 cm 土壤样品风干用于测定土壤团聚体外,所有 0—20 cm 土壤立即过 2 mm 筛后混匀,1/3

样品立即于 4 ℃ 冰箱保存,用于测定微生物量碳(SMBC)、微生物量氮(SMBN)、微生物量磷(SMBP)、脲酶(Uase)活性、土壤呼吸强度(SR)、磷酸酶(Pase)活性,剩余 0—20 cm 和全部 20—100 cm 各层次土壤样品风干后分别测定土壤电导率、pH、有机碳(SOC)含量、全氮(TN)、全磷(TP)和有效磷(AP)含量。

### 1.3 测定方法

取 10.00 g 风干土壤样品,按照 1:5 的水土比配成悬浮液,振荡均匀后过滤,取上清液测定电导率(DDS-307 电导率仪,上海雷磁仪器厂)和 pH(PHS-3C pH 计,上海雷磁仪器厂)<sup>[6]</sup>;取 1.00 g 土壤样品依次用 0.25 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 溶液、0.50 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 溶液、0.50 mol/L NH<sub>4</sub>F 溶液、0.10 mol/L NaOH—0.10 mol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液浸提取上清液,饱和 NaCl 溶液冲洗 2 次后,加入 0.50 mol/L 柠檬酸钠溶液测定土壤无机磷各组分(Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Ca<sub>10</sub>-P、Al-P、Fe-P 和 O-P)含量<sup>[6]</sup>;全氮含量测定采用凯氏定氮法<sup>[6]</sup>;土壤有效磷和全磷含量测定采用钼锑抗比色法<sup>[7]</sup>;有机碳测定采用重铬酸钾滴定法<sup>[8]</sup>;4 ℃ 保存土壤用去乙醇 CH<sub>3</sub>Cl 熏蒸 24 h 后,0.50 mol/L 浸提采用 C/N 自动分析仪(Multi N/C 2100, Analytik Jena, 德国)测定微生物量碳(SMBC),pH 8.50 的 0.50 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提后钼锑抗比色法测定微生物量磷(SMBP),流动化学分析仪(Proxima 2.0, AMS SYSTECA, 意大利)测定微生物量氮(SMBN)<sup>[9]</sup>;土壤在放置 2.00 mol/L NaOH 溶液的干燥器内培养后用 0.50 mol/L HCl 溶液滴定测定土壤呼吸强度<sup>[8]</sup>;风干土在扩散皿培养后硫酸标准液滴定硼酸的方法测定土壤脲酶活性<sup>[10]</sup>;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法<sup>[8]</sup>测定;土壤团聚体采用 Elliott 湿筛法<sup>[11]</sup>测定,取 50.00 g 土壤放置于不同孔径套筛浸润后分级,将各级孔径筛层中土壤转移至铝盒后烘干称重,计算土壤各级团聚体的质量百分比。

$$\text{SMBC} = \frac{\text{熏蒸土壤 C} - \text{未熏蒸土壤 C}}{k_{EC}}, \quad k_{EC} = 0.45 \quad (1)$$

$$\text{SMBN} = \frac{\text{熏蒸土壤 N} - \text{未熏蒸土壤 N}}{k_{EN}}, \quad k_{EN} = 0.40 \quad (2)$$

$$\text{SMBP} = \frac{\text{熏蒸土壤 P} - \text{未熏蒸土壤 P}}{k_{EP}}, \quad k_{EP} = 0.40 \quad (3)$$

### 1.4 数据处理

试验数据采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析,非连续变量平方根反正弦转换后进行方差分析,处理间差异显著性分析采用 LSD( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 种植不同植物盐渍化荒地土壤盐分、pH 和碳氮磷的剖面分布特征

土壤浸出液电导率数值能准确反映土壤含盐量的高低,借助土壤电导率,本研究测定了种植不同植物盐渍化荒地 0—100 cm 土壤盐分、pH、全氮、全磷、有效磷及有机碳剖面分布特征(图 1)。

从图 1 可以看出,与荒地芦苇相比,种植柽柳后 0—20 cm 土壤盐分、全氮、全磷和有机碳含量均显著增加,土壤 pH 和有效磷含量显著降低;种植白蜡后 0—20 cm 土壤盐分和有机碳含量显著降低,土壤 pH、全氮、全磷和有效磷含量均无显著变化;种植苜蓿后 0—20 cm 土壤盐分、pH 和全磷含量均无显著变化,全氮、有效磷和有机碳含量均显著增加。

种植柽柳后 20—40 cm 土壤盐分和有机碳含量显著增加,全氮、全磷和有效磷含量均显著降低,土壤 pH 无显著变化;种植白蜡后 20—40 cm 土壤盐分、有效磷和有机碳含量均显著降低,土壤 pH、全氮和全磷含量均无显著变化;种植苜蓿后 20—40 cm 土壤有机碳含量显著增加,土壤全氮、全磷和有效磷含量均显著降低,土壤盐分和 pH 无显著变化。

种植柽柳后 40—60 cm 土壤盐分和有机碳含量显著增加,全氮、全磷和有效磷含量显著降低,土壤 pH 无显著变化;种植白蜡后 40—60 cm 土壤 pH、全氮和全磷含量显著降低,土壤盐分、有效磷和有机碳含量均无显著变化;种植苜蓿后 40—60 cm 土壤有机碳含量显著增加,有效磷含量显著降低,土壤盐分、pH、全氮和全磷含量均无显著变化。

种植柽柳后 60—80 cm 土壤盐分和有机碳含量显著增加,全氮和全磷含量显著降低,土壤 pH 和有效磷含量无显著变化;种植白蜡后 60—80 cm 土壤有机碳含量显著增加,土壤 pH、全氮、全磷和有效磷含量均显著降低,土壤盐分无显著变化;种植苜蓿后 60—80 cm 土壤全氮、全磷和有效磷含量均显著降低,土壤盐分、pH 和有机碳含量均无显著变化。

种植柽柳后 80—100 cm 土壤盐分和有机碳含量显著增加,土壤 pH、全氮、全磷和有效磷含量均无显著变化;种植白蜡后 80—100 cm 土壤盐分、pH、全氮、全磷和有效磷含量均显著降低,有机碳含量无显著变化;种植苜蓿后 80—100 cm 土壤 pH 显著增加,有效磷含量显著降低,土壤盐分、全氮、全磷和有机碳含量均无显著变化。

### 2.2 种植不同植物对盐渍化荒地土壤无机磷组分的影响

从表 1 可以看出,与荒地芦苇相比,种植柽柳后 0—

20 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著降低, 20—40 cm 土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著降低, 40—60 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  和  $\text{O-P}$  含量显著降低。

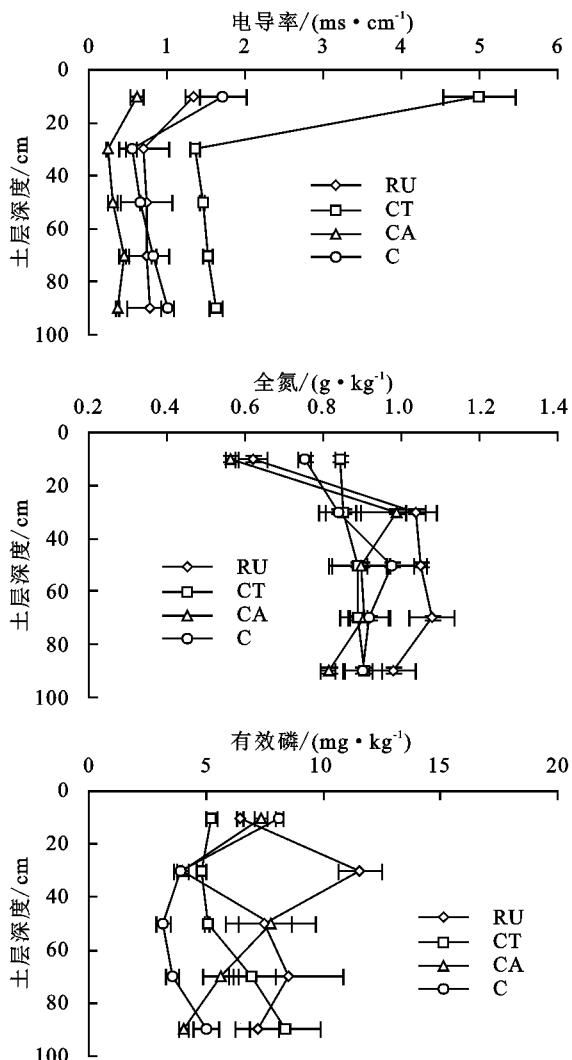


图 1 种植不同植物盐渍化荒地土壤盐分、pH 和碳氮磷的剖面分布特征

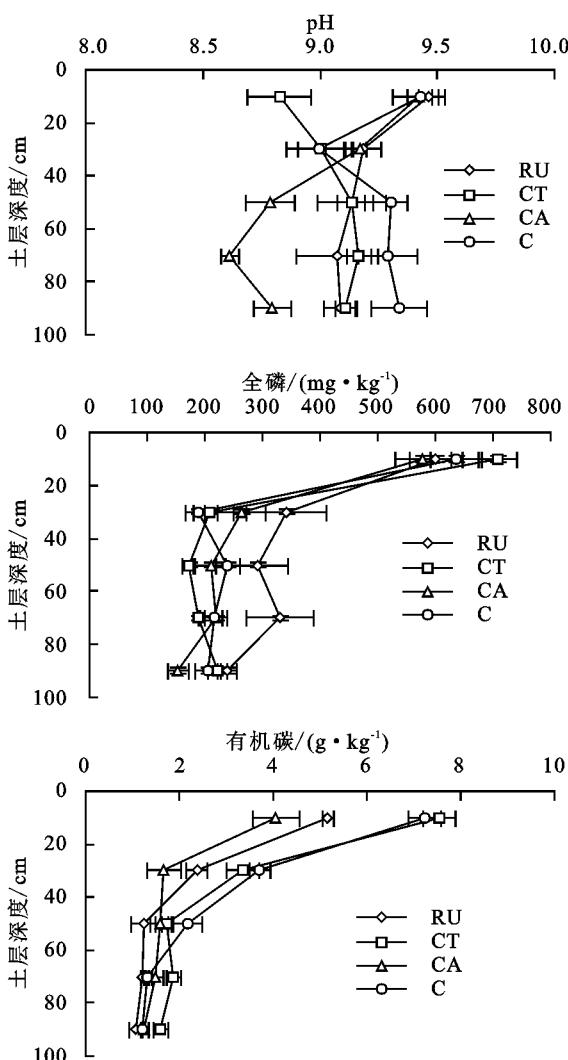
白蜡种植区 0—20 cm 土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和  $\text{O-P}$  含量显著降低,  $\text{Fe-P}$  含量显著增加, 20—40 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著降低, 40—60 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Fe-P}$  含量显著降低, 60—100 cm 土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和  $\text{O-P}$  含量显著降低, 80—100 cm 土壤  $\text{Fe-P}$  含量显著增加。

苜蓿种植区 0—20 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{O-P}$  含量显著降低, 20—40 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{O-P}$  含量显著降低, 40—60 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著降低, 60—80 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著降低, 80—100 cm 土层各种形态无机磷含量无显著变化。以上结果表明, 不同植物种植显著改变了土壤无机磷组成, 影响土壤磷的周转过程。

### 2.3 种植不同植物对盐渍化荒地土壤微生物量的影响

从图 2 可以看出, 土壤微生物量能够响应种植植

量显著降低, 60—80 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著降低, 80—100 cm 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量显著增加,  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量显著降低。



物种类的变化。土壤微生物量往往反映土壤微生物种群对环境变化的响应, 与荒地芦苇相比, 种植柽柳、白蜡和苜蓿后土壤微生物量碳(SMBC)、微生物量磷(SMBP)和 SMBC/SOC 均显著降低, 而微生物量氮(SMBN)均显著增加, 种植苜蓿后土壤 SMBC 显著低于其他土壤, 其 SMBN 显著高于其他土壤, 表明盐渍化荒地种植植物的转变和土壤环境发生剧烈扰动, 导致土壤微生物生物量显著降低, 其群落和功能的变化尚需进一步研究。

### 2.4 种植不同植物对盐渍化荒地土壤酶活性的影响

从图 3 可以看出, 种植不同植物对土壤酶活性影响较大。与荒地芦苇相比, 种植柽柳后土壤脲酶活性显著降低, 磷酸酶活性显著增加; 苜蓿种植区土壤脲酶活性无显著变化, 磷酸酶活性显著增加; 白蜡种植区土壤脲酶活性显著低于其他植物, 土壤磷酸酶活性显著高于荒地芦苇和柽柳。3 种植物种植对土壤呼

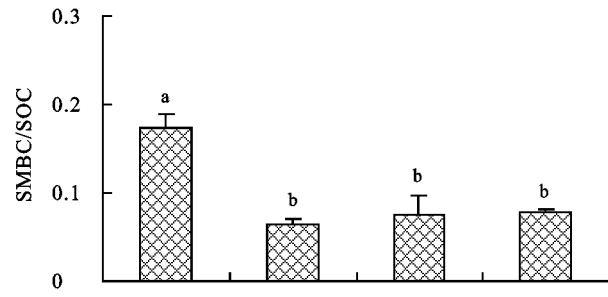
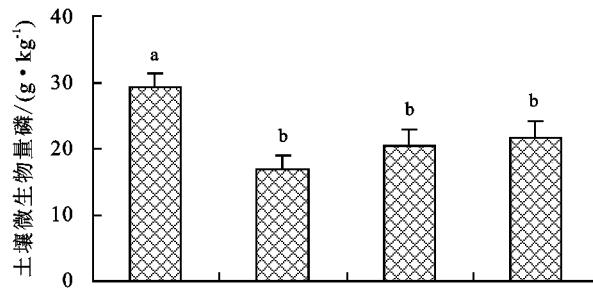
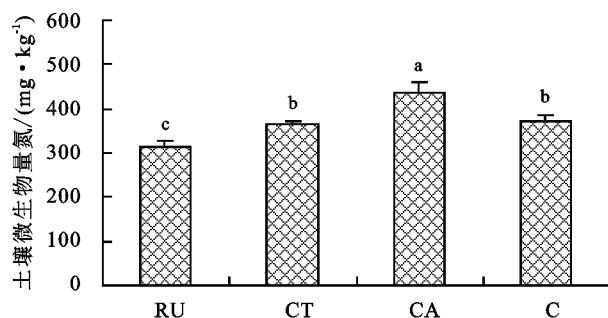
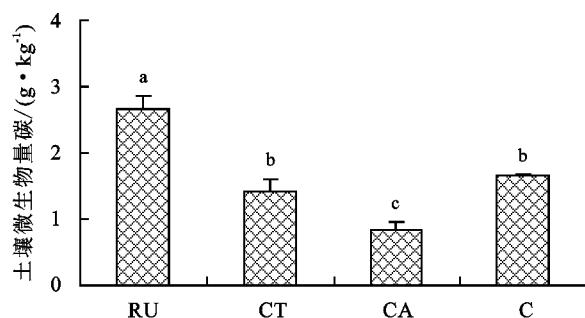
吸强度均无显著影响(图 3)。以上结果表明,种植不同植物可以显著影响土壤酶活性,采取合理的改良措

施,提高土壤酶活性,增加土壤磷有效性,达到改良土壤的目的。

表 1 不同种植植物对盐渍化荒地 0—100 cm 土壤无机磷组分的影响

处理	土层 深度/cm	$\text{Ca}_2\text{-P}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Ca}_8\text{-P}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Fe-P}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Al-P}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{O-P}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$
RU	0—20	10.88±1.05a	24.46±2.62a	746.35±86.49a	8.47±3.20b	30.11±1.58a	50.65±3.25a
	20—40	46.97±25.89a	67.50±36.91a	94.50±4.89a	4.43±0.58a	56.93±4.37a	60.96±3.75a
	40—60	31.70±19.65a	46.60±29.47a	98.70±6.40a	6.78±0.93a	44.35±5.08a	56.09±2.75a
	60—80	44.02±23.73a	65.07±35.60a	99.03±1.51a	3.93±0.29a	54.25±4.80a	55.42±4.86a
	80—100	7.45±3.14b	10.22±4.71b	111.11±18.08a	4.26±0.17b	45.86±4.79a	54.08±8.34a
	0—20	7.42±0.30b	17.85±0.52b	776.90±30.32a	11.33±1.08b	15.98±1.28c	50.45±2.41a
CT	20—40	22.04±8.27ab	32.11±12.41ab	57.94±6.61b	3.59±0.44a	36.30±6.89b	48.71±9.89ab
	40—60	6.44±2.38b	8.71±3.57b	54.08±1.85b	3.76±0.84b	46.70±2.66a	42.34±0.17b
	60—80	8.29±0.73b	11.47±1.10b	70.18±0.93b	3.59±0.17a	40.66±3.52b	47.20±5.54a
	80—100	21.03±6.41a	30.60±9.62a	65.15±0.73b	3.93±0.50b	45.69±1.05a	48.38±3.51a
CA	0—20	13.73±1.43a	20.55±1.88a	591.61±55.61b	20.79±1.92a	33.26±12.44ab	38.18±3.39b
	20—40	10.80±2.44b	15.25±3.65b	116.81±15.98a	4.26±0.60a	40.83±3.94b	66.49±15.98a
	40—60	6.78±1.60b	9.21±2.40b	94.00±25.40a	3.93±0.29b	49.38±1.93a	38.65±4.54b
	60—80	19.19±7.14ab	27.83±10.71ab	65.49±3.94b	4.09±0.17a	49.21±1.62a	44.18±1.54b
C	80—100	7.11±0.89b	9.71±1.33b	55.25±2.48c	5.43±0.29a	31.77±12.44a	35.96±5.09b
	0—20	6.97±1.67b	20.85±2.57a	694.77±63.19ab	13.58±2.85b	21.09±2.48b	38.98±3.89b
	20—40	11.31±2.04b	16.00±3.06b	66.16±6.23b	3.76±0.44a	36.47±2.20b	47.71±2.86b
	40—60	7.78±2.76b	10.72±4.14b	122.69±12.85a	3.93±0.50b	34.62±6.07b	50.56±2.04a
CA	60—80	8.62±4.97b	11.98±7.45b	100.54±5.61a	4.76±0.84a	43.18±3.64b	38.48±12.04ab
	80—100	5.60±1.37b	7.45±2.06b	90.81±22.63ab	4.09±0.17b	47.71±2.03a	41.16±4.68ab

注:同列相同土层不同小写字母表示不同植物种植后土壤间存在显著差异( $P<0.05$ )。



注:图上不同小写字母表示不同植物种植后土壤间存在显著差异( $P<0.05$ )。下同。

图 2 种植不同植物对盐渍化荒地土壤微生物量的影响

## 2.5 种植不同植物对盐渍化荒地土壤团聚体组成的影响

从图 4 可以看出,种植不同植物对盐渍化荒地土壤团聚体的组成影响较大。与荒地芦苇相比,种

植柽柳显著提高土壤  $>1 \text{ mm}$  颗粒团聚体;种植白蜡增加  $0.053\sim0.25 \text{ mm}$  颗粒团聚体所占比例,显著降低  $2\sim5 \text{ mm}$  颗粒团聚体所占比例,不利于土壤大颗粒团聚体的形成;种植苜蓿则促进土壤大颗粒

团聚体的形成,2~5 mm 颗粒团聚体所占比例显著增加。以上结果表明,种植不同植物显著改变土壤

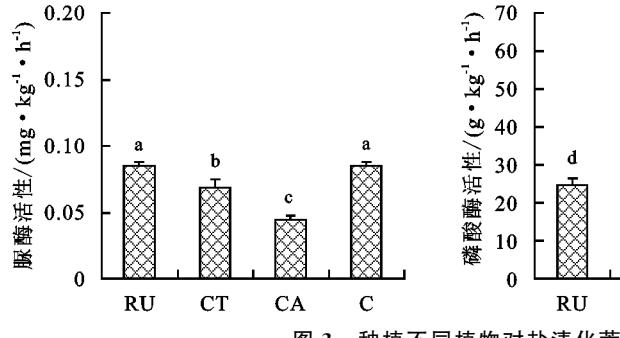


图3 种植不同植物对盐渍化荒地土壤酶活性和土壤呼吸强度的影响

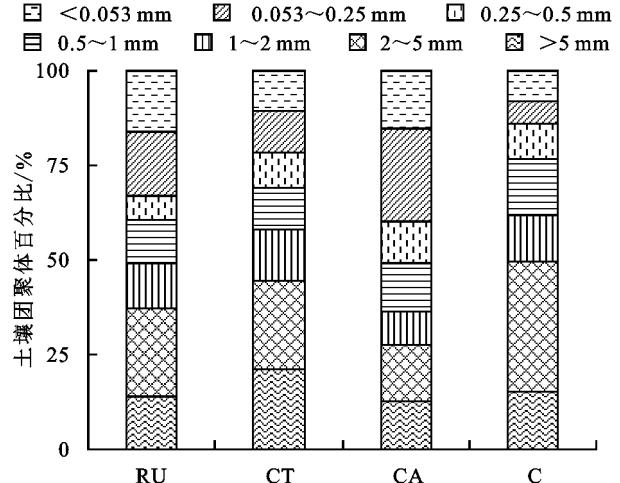


图4 种植不同植物对盐渍化荒地土壤团聚体组成的影响

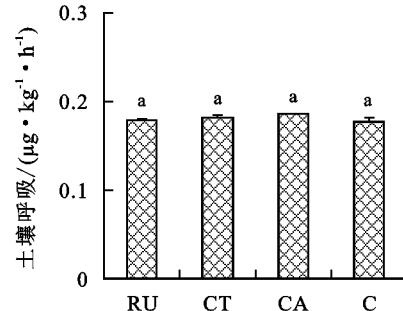
### 3 讨论

#### 3.1 种植不同植物对盐渍化荒地的改良效果

传统盐渍化荒地改良利用方式主要是运用“盐随水来,盐随水去”的土壤水盐运移规律,洗盐与排盐相结合,降低土壤根层盐分,淡水资源限制了传统改良方法的应用。借助耐盐植物种植的生物改良方式,本文研究了盐渍化荒地种植不同植物对土壤盐分和 pH 的影响,结果表明,植物种植显著改变了盐渍化荒地的土壤理化性质、微生物生物量和酶活性。种植白蜡有利于降低 0—100 cm 土壤盐分和深层(40—100 cm)土壤 pH。种植柽柳后 0—100 cm 土壤盐渍化程度显著高于其他植物,表层(0—20 cm)土壤 pH 显著降低,其盐渍化程度增加可能源于柽柳发达根系吸收水分导致大量盐离子在根际积累,根际高盐浓度将进一步导致已吸收的磷在根尖积累,由根尖向地上部转运受到抑制。肖克巍等<sup>[12]</sup>在宁夏进行试验表明,柽柳能有效降低耕层土壤盐分,并有效改良盐渍土,与本文研究结果存在差异,因此,有针对性地根据盐碱地类型(地理位置、盐渍化程度和盐离子种类)选择适宜耐盐植物才能达到最佳改良效果。

团聚体是土壤结构的基本单位,其分布特征与稳定性是评价管理措施对土壤磷周转过程影响的重要

团聚体的组成,种植苜蓿最有利于土壤大颗粒团聚体的形成。



指标<sup>[13]</sup>,已有研究<sup>[14]</sup>表明,柽柳和苜蓿种植有利于大颗粒团聚体的形成,与本研究结果一致,其原因可能是 2 种作物的种植导致表层(0—20 cm)土壤有机质显著增加,改善土壤中各种胶结物质的性质及数量,提升土壤团聚化作用。

微生物群落生物量的变化可以作为指示剂有助于更好地理解土地利用方式转变对土壤磷周转过程的影响<sup>[15]</sup>。以往研究<sup>[16]</sup>表明,外来植物的引入导致土壤微生物群落发生变异,产生更小及更脆弱的微生物碳库,本研究中不同植物种植极大改变了微生物生存环境导致土壤微生物量显著降低,微生物对土壤环境变化反应敏感、迅速,环境因子(如土壤 pH 和降水量)和生态位分化在土壤微生物组成和分布中起到了决定性作用<sup>[17]</sup>。种植植物和土地利用方式转变导致的盐浓度和可利用底物的改变显著影响微生物生物量和群落结构<sup>[18]</sup>,其群落结构稳定性需要长时间构建形成以提高土壤微生物生物量,并驱动土壤磷有效性提升。

#### 3.2 种植不同植物对盐渍化荒地磷有效性和周转的影响

土壤中速效磷作为能够被植物和土壤微生物直接吸收利用的磷源,是磷形态转化和转移的关键,在磷转化中具有非常重要的作用<sup>[4,19]</sup>,土壤中磷组分随土壤环境(土壤 pH 和氧化还原条件)的变化而不断转化。本研究表明,土壤磷转化过程及其有效性与植物种类和土层深度密切相关。种植白蜡能够促进表层(0—20 cm)土壤难溶性磷(O—P)的释放和活化,一定程度上提高土壤磷有效性,种植苜蓿提高表层(0—20 cm)土壤磷酸酶活性,活化被难溶性金属氧化物包裹的磷酸盐,促进缓效磷向速效磷转化,盐渍化土壤强烈固定作用导致无效态磷难以活化利用。盐渍化土壤中,土壤盐渍化程度是土壤磷有效性的主要限制因子,磷有效性与非盐渍土相比下降 20%~50%。种植柽柳后 0—100 cm 土壤盐渍化程度显著高于其他种植植物,其土壤磷有效性最低。

以往研究<sup>[20]</sup>表明,碱性土壤有效磷易被土壤微

生物转化为有机磷,从而固定成为无效磷,改变土壤中 Fe—P、Al—P 和 Ca—P 的溶解性、 $\text{CaCO}_3$  的形成和土壤吸附能力<sup>[21]</sup>,显著降低磷有效性,碱性土壤中磷吸收量较非碱性土壤降低 80%以上<sup>[22]</sup>,提高作物磷吸收效率的假设策略之一便是通过降低 pH 以提升土壤磷有效性,更好地被植物吸收利用。本研究中种植柽柳后表层(0—20 cm)土壤 pH 显著降低并未显著提升磷有效性,可能原因是:(1)盐渍化土壤磷有效性的首要限制因子是其他环境因子,如土壤盐浓度;(2)黄河岛土壤碱化度高,虽然 pH 显著降低,但降低幅度不足以提升土壤磷有效性。

土壤磷有效性与其在土壤内的移动性显著相关,土壤中磷扩散系数仅为  $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[23]</sup>,良好的团聚体结构能够提高土壤溶液扩散速度,从而提高土壤磷有效性。土壤中不同直径团聚体颗粒对磷的吸附解析作用存在明显差异,导致不同直径土壤颗粒的磷形态和质量分数明显不同。相关研究<sup>[24]</sup>表明,大颗粒团聚体中有效磷含量显著高于小颗粒团聚体,其比例的增加更有利于提升有效磷供应能力,柽柳和苜蓿种植更有利于大颗粒团聚体形成,有利于进一步提升土壤磷有效性。

盐渍化土壤中无机磷浓度通常较低,难以满足植物需求,土壤有机磷占土壤全磷的 30%~80%,是土壤磷库重要组成部分,土壤微生物和根系分泌的磷酸酶对于土壤有机磷矿化、提高土壤磷有效性起着不可替代的作用。以往研究<sup>[25]</sup>表明,盐渍化荒地利用过程中引入固氮植物能够更加显著提高磷酸酶活性,与本文研究结果一致。探讨土壤酶活性与土壤环境因子和养分分布特点的关系,对评价土壤磷有效性具有重要作用。

## 4 结论

(1)与荒地芦苇相比,种植 3 种植物均能显著提高表层(0—20 cm)土壤磷酸酶活性,种植柽柳显著降低土壤表层(0—20 cm)土壤 pH,增加土壤盐渍化程度,促进表层(0—20 cm)土壤大颗粒团聚体形成,提高 0—40 cm 土壤有机碳含量,促进土壤速效磷( $\text{Ca}_2\text{—P}$ )和缓效磷( $\text{Ca}_8\text{—P}$  和  $\text{Al}\text{—P}$ )向难溶性磷( $\text{Ca}_{10}\text{—P}$ )的转化,导致土壤磷有效性降低。

(2)种植白蜡显著降低土壤盐渍化程度和 60—100 cm 土壤 pH,但表层(0—20 cm)土壤小颗粒团聚体比例增加,0—40 cm 有机碳含量显著降低,土壤难溶性磷( $\text{O—P}$ )向缓效磷( $\text{Fe—P}$ )转化,有利于土壤磷有效性提升。

(3)种植苜蓿显著增加表层土壤有效磷含量,提高表层土壤磷酸酶活性,促进难溶性磷( $\text{O—P}$ )、缓效

磷( $\text{Ca}_8\text{—P}$  和  $\text{Al}\text{—P}$ )向速效磷转化,同时土壤大颗粒团聚体比例增加有利于提升表层(0—20 cm)土壤磷的有效性,但深层(20—100 cm)土壤 pH 显著增加不利于土壤磷的有效性提升。

(4)3 种植物种植后土壤微生物量碳和微生物量磷显著降低,微生物量氮显著增加,土壤呼吸强度及脲酶活性均无显著变化。

综上所述,种植白蜡最有利于降低土壤盐渍化程度和 pH,种植苜蓿最有利于 0—20 cm 土壤磷有效性的提升,种植 3 种植物对 20—100 cm 土壤磷有效性无显著提升作用。

## 参考文献:

- [1] 冯国艺,张谦,祁虹,等.滨海盐碱地水盐时空变化特征及对棉花光合生产的影响[J].土壤学报,2019,56(4):1012-1022.
- [2] Dong X L, Li M Z, Lin Q M, et al. Soil  $\text{Na}^+$  concentration controls salt-affected soil organic matter components in Hetao region China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19:1120-1129.
- [3] Cordell D, White S. Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security [J]. Sustainability, 2011, 3(10):2027-2049.
- [4] Pierzynski G M, McDowell R W, Sims J T. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils [M]. In: Sims J T, Sharpley A N, eds., Phosphorus: Agriculture and the environment. USA: Segoe Rd., 2005:53-86.
- [5] Kamble P N, Gaikwad V B, Kuchekar S R, et al. Microbial growth, biomass, community structure and nutrient limitation in high pH and salinity soils from Pravaranagar(India) [J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 65:87-95.
- [6] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [7] Westerman R L. Soil testing and plant analysis [M]. Third edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, 1990.
- [8] 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.
- [9] Wu J S, Joergensen R, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: An automated procedure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22:1167-1169.
- [10] 王军,丁效东,张士荣,等.不同碳氮比有机肥对沙泥田烤烟根际土壤碳氮转化及酶活性的影响[J].生态环境学报,2015,24(8):1280-1286.
- [11] Elliot E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3):627-633.

- natural landscapes [J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(6): 820-830.
- [35] Sonobe R, Tani H, Wang X, et al. Parameter tuning in the support vector machine and random forest and their performances in cross- and same-year crop classification using TerraSAR-X [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(23): 7898-7909.
- [36] Wagner B, Tarnawski V R, Hennings V, et al. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 108(1/2): 145-147.
- [37] 傅子洹,王云强,安芷生.黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J].农业工程学报,2015,31(13):128-134.
- [38] 白一茹,王幼奇,王菲,等.压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):55-61.
- [39] 张晗,欧阳真程,赵小敏,等.江西省耕地土壤氮素空间变异特征及其主控因素[J].水土保持学报,2018,32(5):307-315.
- [40] 刘春利,胡伟,贾宏福,等.黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性[J].生态学报,2012,32(4):1211-1219.
- [41] 王幼奇,赵云鹏,白一茹,等.中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性[J].环境科学,2018,39(3):1396-1403.
- [42] 谢恩泽,赵永存,陆访仪,等.不同方法预测苏南农田土壤有机质空间分布对比研究[J].土壤学报,2018,55(5):14-24.
- [43] Zhu Q, Lin H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes [J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 594-606.
- [44] 王茵茵,齐雁冰,陈洋,等.基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究[J].土壤学报,2016,53(2):342-354.

(上接第284页)

- [12] 肖克飚,吴普特,雷金银,等.不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J].农业环境科学学报,2013,31(12):2433-2440.
- [13] Garland G, Bunemann E K, Oberson A, et al. Phosphorus cycling within soil aggregate fractions of a highly weathered tropical soil: A conceptual model [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116: 91-98.
- [14] 仇建飞,窦森,邵晨,等.添加玉米秸秆培养对土壤团聚体胡敏酸数量和结构特征的影响[J].土壤学报,2011,48(4):781-787.
- [15] Joergensen R G, Emmerling C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169: 295-309.
- [16] Pérez C S, Elsa E C, Robert W, et al. Soil microbial responses to drought and exotic plants shift carbon metabolism [J]. The ISME Journal, 2019, 13: 1776-1787.
- [17] Mohammad B, Falk H, Sofia K F, et al. Structure and function of the global topsoil microbiome [J]. Nature, 2018, 560: 233-237.
- [18] Liu S L, Baidengsha M, Joergensen R G, et al. Response of soil microorganisms after converting a saline desert to arable land in central Asia [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 98: 1-7.
- [19] Kruse J, Abraham M, Amelung W, et al. Innovative methods in soil phosphorus research: A review [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178(1): 43-48.
- [20] Balemi T, Negisho K. Management of soil phosphorus and plants adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review [J]. Journal of Soil Science Plant Nutrition, 2012, 12: 547-562.
- [21] Sato S, Solomon D, Hyland C, et al. Phosphorus speciation in manure and manure-amended soils using XANES spectroscopy [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(19): 7485-7491.
- [22] Robles-Aguilar A A, Pang J J, Postma J A, et al. The effect of pH on morphological and physiological root traits of *Lupinus angustifolius* treated with struvite as a recycled phosphorus source [J]. Plant and Soil, 2019, 434: 65-78.
- [23] Schachtman D P, Shin R. Nutrient sensing and signaling: NPKS [J]. Annual Review of Plant Biology, 2007, 58: 47-69.
- [24] Jalali M, Jalali M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture [J]. Science of the Total Environment, 2016, 566: 1080-1093.
- [25] Zhou Y, Staver A C. Enhanced activity of soil nutrient-releasing enzymes after plant invasion: A meta-analysis [J]. Ecology, 2019, 100(11): e02830.