

DOI: 10.11766/trxb201907220310

孙锋, 曾令达, 彭长连, 赵梦欣. 南美蟛蜞菊、蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤磷组分特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 798–804.
SUN Feng, ZENG Lingda, PENG Changlian, ZHAO Mengxin. Effect of Growing of *Wedelia trilobata*, *W. chinensis* or Their Hybrid on Soil Phosphorus Fractionation in South China and Their Affecting Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 798–804.

南美蟛蜞菊、蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤磷组分特征及其影响因素*

孙 锋^{1,2}, 曾令达^{2,3}, 彭长连², 赵梦欣^{1†}

(1. 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100000; 2. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631; 3. 惠州学院生命科学学院, 广东惠州 516001)

摘 要: 为探究入侵植物南美蟛蜞菊土壤磷转化过程与驱动机制, 采用野外控制试验, 比较研究了南美蟛蜞菊、蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤磷组分、微生物生物量磷以及酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性。结果表明: 3 种蟛蜞菊土壤易分解态磷仅占全磷的 2.2%~6.3%, 且全碳与有机磷的比例大于 200, 表明本研究区受到磷限制。有机磷是土壤磷库的主要组分, 在南美蟛蜞菊、蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤中分别占全磷的 28.7%、17.6%和 25.0%。相关分析表明, 三种蟛蜞菊土壤有机磷磷组分矿化主要受碱性磷酸酶影响, 受酸性磷酸酶影响较小, 且碱性磷酸酶与有机磷呈显著负相关, 与易分解态磷呈显著正相关。因此, 在缺磷的亚热带地区, 碱性磷酸酶对有机磷的分解可能是该地区入侵植物对磷限制的适应机制。

关键词: 植物入侵; 土壤磷组分; 碱性磷酸酶; 有机磷分解; 易分解态磷

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Effect of Growing of *Wedelia trilobata*, *W. chinensis* or Their Hybrid on Soil Phosphorus Fractionation in South China and Their Affecting Factors

SUN Feng^{1,2}, ZENG Lingda^{2,3}, PENG Changlian², ZHAO Mengxin^{1†}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Beijing 100000, China; 2. College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 3. School of Life Science, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516001, China)

Abstract: It is of great significance to compare exotic plants with their respective indigenous plants in growth and effect on soil properties for studies on mechanism of their successful invasion. Subtropical and tropical soils are often strongly weathered and hence low in phosphorus availability. Why can invasive plants, such as *Wedelia trilobata*, successfully invade South China, where the soil is deficient in phosphorus? An answer to this problem is of great significance for exploration of mechanism of the invasive plants flourishing in infertile soils. However, so far few reports on this topic have been found in the literature. This paper

* 中国博士后科学基金项目(2018M643112)和植物病虫害生物学国家重点实验室开放基金项目(SKLOF201914)资助 Supported by the Postdoctoral Science Foundation of China (No. 2018M643112) and the State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests of China (No. SKLOF201914)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaomengxin11@tsinghua.org.cn

作者简介: 孙 锋 (1986—), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事土壤动物研究。E-mail: sf0204@163.com

收稿日期: 2019-07-22; 收到修改稿日期: 2019-10-10; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-11-29

laid its focuses on soil organic phosphorus mineralization, and activities of acid phosphomonoesterase and alkaline phosphomonoesterase in the soils under *W. trilobata*, native plant *W. chinensis* and their hybrid in South China. A controlled field experiment using randomized complete block design was laid out in July 2016. The plots in the experiment were planted with *W. trilobata*, native plant *W. chinensis* and their hybrid, separately for comparison between the plots in microbial biomass phosphorus, activity of acid and alkaline phosphomonoesterase and soil organic phosphorus mineralization, and for analysis of underlying mechanisms of any possible differences. Results show that Treatment WT (*W. trilobata*) was higher than Treatment WC (*W. chinensis*) in soil dissolved organic carbon. In all the three treatments Labile-P accounted only for 2.2%~6.3% of the soil total phosphorus. Treatment WT and Treatment H (hybrid) was higher than Treatment WC in Labile-P, but lower in organic phosphorus, residual phosphorus, total phosphorus and microbial biomass phosphorus. Microbial biomass phosphorus made up 14.3%, 41.2% and 25.7% of the total phosphorus in Treatments WT, WC and H, respectively. The ratio of soil total carbon to organic phosphorus reached well beyond 200, indicating that soil phosphorus was a major limiting factor in the studied region. Soil organic phosphorus, as an important fraction in soil total phosphorus, accounted for 28.7%, 17.6% and 25.0% of the total phosphorus in Treatments WT, WC and H. Correlation analysis shows that Labile-P was significantly and positively related to alkaline phosphomonoesterase, but negatively to alkaline phosphomonoesterase. Treatments WT and H were higher than Treatment WC in activity of alkaline phosphomonoesterase, but did not differ much in activity of acid phosphomonoesterase. So, changes in organic phosphorus fractions were mainly driven by alkaline phosphomonoesterase. The findings suggest that both the invasive and native plants suffer from phosphorus deficiency, and alkaline phosphomonoesterase decomposing soil organic phosphorus may be the major mechanism of the invasive plants adapting to phosphorus limitation in the region. It is expected that this study may help understand the general rule of plant invasion in habitats poor in resource from the new perspective of soil organic phosphorus mineralization.

Key words: Plant invasion; Soil phosphorus fractionation; Alkaline phosphomonoesterase; Organic phosphorus decomposition; Labile-P

生物入侵是一个影响深远的全球性生态安全问题，严重威胁生物多样性^[1]。我国是遭受生物入侵威胁最为严重的国家之一，阐明外来植物入侵机制是控制其扩张的重要前提。

入侵植物具有耐贫瘠和养分利用效率高等特点^[2-3]，这使外来植物相对于本地植物在一定的环境中获得相对的竞争优势^[4]。近年来，大量的研究工作致力于揭示入侵植物耐土壤贫瘠的机理。例如入侵植物增加土壤氨氧化古菌生物量，加快土壤硝化速率^[5]；榕果舌 (*Carpobrotus edulis*) 通过根系分泌物抑制硝化细菌活性，降低土壤硝化速率，抑制本地植物氮吸收，而自身则可以在低氮水平下正常生长^[6]，因此，前人大部分研究主要关注入侵植物对氮素的利用机制，很少开展磷的研究^[7]。

一项 Meta 分析发现，入侵植物叶片磷含量显著高于土著植物^[8]。因此，磷利用是影响入侵植物快速扩张的重要因素之一。我国华南地区土壤有效磷含量极低，是初级生产力的主要限制因子^[9]。但是，华南地区却是外来植物入侵危害最严重的地区之

一，以南美蓼蛄菊为代表的入侵植物快速扩张。外来植物为何能成功入侵土壤缺磷的华南地区，土壤磷组分转化过程与驱动机制是什么？

在湿热气候区，土壤微生物增加有机磷分子的吸收，并在细胞中水解，显著影响土壤磷循环^[10]。而且，土壤微生物生物量磷通过矿化作用也能转变成速效磷被植物吸收利用，是土壤有效磷的重要部分^[11]。最近研究表明，我国亚热带植物通过分解土壤有机磷显著提高土壤有效磷含量^[12]。土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶能水解大量磷酸酯，而且碱性磷酸酶能水解 90%以上的有机磷^[13]。因此，土壤有机磷分解可能是我国亚热带地区土壤有效磷的重要来源之一。

入侵植物通过改变土壤微生物活性、群落结构和酶活性显著影响土壤物理和化学性质^[1]。例如，植物入侵显著增加了土壤固氮菌，进而增加了土壤硝态氮含量^[14]；入侵植物改变了土壤细菌群落，进而增加了蛋白酶活性和土壤铵态氮含量^[15]；Han 等^[16]从入侵植物薇甘菊根际土壤分离的放线菌 (*Streptomyces rochei*)

能分泌次生代谢物质溶解钾矿物质,为薇甘菊提供钾养分;最近研究^[17]表明入侵植物显著降低了土壤总磷含量,然而,参与磷分解的酶活性并不清楚。

南美蟛蜞菊 (*Wedelia trilobata* (L.) Hitchc.) 为菊科蟛蜞菊属多年生草本植物,起源于中南美洲,20世纪70年代作为地被植物引入中国。南美蟛蜞菊生长迅速,已被列为“世界最有害的100种外来入侵种”之一^[18]。其同属植物蟛蜞菊 (*Wedelia chinensis* (Osbeck) Merr.) 亦为多年生草本植物,匍匐状,自然分布于我国东南部,与南美蟛蜞菊有相同的生活史特征,但生长缓慢^[19]。同时,南美蟛蜞菊和蟛蜞菊的自然杂交种也被证实^[20]。国内外学者对南美蟛蜞菊入侵机理的研究主要集中在生理生态方面^[19-20],但对南美蟛蜞菊能快速活化贫瘠土壤养分的过程与驱动机制未知,这在很大程度上制约了对外来植物入侵机制的深刻理解。

基于此,本研究拟结合土壤酶学和化学计量学,深入解析南美蟛蜞菊土壤磷组分活化过程和驱动机制,为揭示南美蟛蜞菊在土壤缺磷的华南地区成功入侵提供新见解,为控制南美蟛蜞菊扩张提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于广东省惠州野外控制试验地,属于亚热带季风气候区,年平均气温22℃,年降水量2000mm,土壤类型为老成土^[21]。

1.2 试验设计与取样

试验开始于2016年7月,在弃荒地中设置样方(22°52'N, 114°22'E),去除地表植物后,采用完全随机试验设计,包括南美蟛蜞菊、蟛蜞菊、杂交蟛蜞菊三个处理,每个处理5个重复,每个样方大小为2.6m×2.6m,样方之间间隔1m,样方边缘插入15cm深的聚氯乙烯塑料板,防止三种植物根蔓延生长至另一样方,三种植物以相同密度(25m⁻²)种植于样地中,每个处理最初的土壤全磷含量分别为0.55±0.05mg·kg⁻¹、0.53±0.06mg·kg⁻¹、0.56±0.05mg·kg⁻¹,土壤pH为4.21±0.14、4.32±0.21和4.16±0.17。2019年1月(914d后)采用五点法采取0~10cm土壤样品混合为1个土壤样品,土钻直径为3cm。

1.3 土壤样品测定方法

土壤全碳和全氮用元素分析仪(Elementar Vario

ELIII,德国)测定;土壤铵态氮和硝态氮采用连续流动分析仪(AA3, Bran+Luebbe,德国)测定;可溶性有机碳和有机氮采用TOC/TN分析仪(Multi N/C® 2100 (S), Analytik Jena AG,德国)测定;称取10g风干土壤置于50mL离心管中,加入25mL 0.01mol·L⁻¹CaCl₂溶液,摇匀并静止30min后测定土壤pH。采用Hedley等^[22]连续浸提法测定土壤中不同形态的磷组分,称取0.5g过100目筛土壤,依次加入阴离子树脂膜、0.5mol·L⁻¹NaHCO₃、0.1mol·L⁻¹NaOH、1mol·L⁻¹HCl,提取出土壤中稳定性由弱到强的各级土壤磷素组分,最后用浓硫酸和高氯酸高温消煮测定土壤中的残余磷^[22]。主要分为以下磷组分:1)速效磷(resin-Pi、NaHCO₃-Pi),即生物最容易吸收利用的无机磷组分;2)铁/铝磷(NaOH-Pi),是与长期磷转化有关的强烈吸附在铝铁化合物上的无机磷酸盐;3)钙磷(HCl-Pi),比较难溶性的无机磷组分;4)有机磷(NaHCO₃-Po、NaOH-Po),易矿化且对植物有效的有机磷组分;5)残余态磷(Residual-P),闭蓄态无机磷,植物难以利用。

采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物生物量磷^[23]。土壤磷酸酶活性测定的原理是磷酸酶水解对-硝基酚磷酸钠产生对-硝基酚,其生成量与磷酸酶活性在一定范围内呈线性关系;具体为称取1.00g新鲜土壤(<2mm)于50mL离心管中,加0.25mL甲苯、4.00mL通用缓冲剂储备液(酸性磷酸酶用pH6.5,碱性磷酸酶用pH11.0)和1.00mL用相同缓冲液配制的对-硝基酚磷酸钠溶液,37℃下培养1h后,加入1.00mL氯化钙溶液和1.00mL氢氧化钠溶液终止反应,充分混匀后过滤,用紫外分光光度计(UV-2450,日本岛津)在400nm处比色^[24],结果表示为μg·g⁻¹·h⁻¹(以p-nitrophenol计)。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 19单因素方差分析不同植物处理对土壤理化性质、磷酸酶活性、微生物生物量磷和磷组分含量的影响;采用Origin 8.5软件制图,图和表中数据为平均值±标准误。

2 结果

2.1 不同植物土壤化学性质差异

不同植物处理间土壤化学性质存在显著差异(表1),其中,南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤全氮

表 1 不同植物处理土壤化学性质

Table 1 Chemical properties of the soil relative to treatment

处理 Treatment	全碳 Total carbon /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon /(mg·kg ⁻¹)	可溶性有机氮 Dissolved organic carbon /(mg·kg ⁻¹)	pH
蟛蜞菊 ^①	23.66±1.52a	1.15±0.11a	8.22±1.3a	86.79±7.97b	50.85±3.41a	4.13±0.12a
南美蟛蜞菊 ^②	25.51±1.94a	0.64±0.1b	9.52±1.16a	146.31±13.89a	58.76±5.09a	4.26±0.14a
杂交蟛蜞菊 ^③	23.5±3.21a	0.78±0.1b	7.79±1.6a	125.53±11.37ab	58.97±4.37a	4.18±0.1a

注: 数值为平均值±标准误, $n = 5$ 。同列不同小写字母表示不同植物处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同 Note: Mean ± standard deviation, $n = 5$. Different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same below. ① *Wedelia chinensis*, ② *Wedelia trilobata*, ③ Hybrid

含量显著低于蟛蜞菊, 南美蟛蜞菊土壤可溶性有机碳含量显著高于蟛蜞菊, 全碳、铵态氮、可溶性有机氮和 pH 在三个植物处理间无显著差异。

2.2 不同植物土壤磷组分差异

南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤易分解磷和铁/

铝磷含量显著高于蟛蜞菊 (表 2), 而有机磷、残余态磷和全磷含量显著低于蟛蜞菊。此外, 全碳: 有机磷 (C:OP) 在三种植物处理中的范围为 271~660, 且由高到低依次为南美蟛蜞菊、杂交蟛蜞菊和蟛蜞菊。

表 2 不同植物处理下土壤磷组分

Table 2 Phosphorus fractions in the soil relative to treatment

处理 Treatment	易分解态磷 Labile-P /(mg·kg ⁻¹)	铁/铝磷 Fe/Al-P /(mg·kg ⁻¹)	钙磷 Ca-P /(mg·kg ⁻¹)	有机磷 Organic phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	残余态磷 Residual-P /(mg·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	全碳/有机磷 Total carbon: Organic phosphorus
蟛蜞菊 ^①	6.99±1.27b	21.63±2.17b	—	89.08±7.21a	194±11.72a	310.7±17.49a	271.0±35.43b
南美蟛蜞菊 ^②	14.47±1.10a	36.05±2.70a	1.44±0.55	40.28±4.40b	136.7±16.38b	228.9±14.18b	659.9±126.73a
杂交蟛蜞菊 ^③	13.86±0.65a	35.84±1.78a	—	61.12±7.68b	134±11.02b	244.4±16.61b	392.9±33.09ab

注: 全磷为 5 种磷组分含量之和。—为无法测定出数值 Note: Total P content was the sum of all the five P fractions; and — means undetectable. ① *Wedelia chinensis*, ② *Wedelia trilobata*, ③ Hybrid

2.3 不同植物土壤微生物生物量磷和磷酸酶活性差异

南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊处理中土壤微生物生物量磷显著低于蟛蜞菊处理 (图 1a)), 蟛蜞菊、南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊三个处理中微生物生物量磷占全磷的 41.2%、14.3%和 25.7%。蟛蜞菊、南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊三个处理中酸性磷酸酶活性无显著差异 (图 1b)), 而碱性磷酸酶活性在蟛蜞菊土壤中显著低于南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊 (图 1c))。

2.4 土壤磷酸酶活性与磷组分的相关性

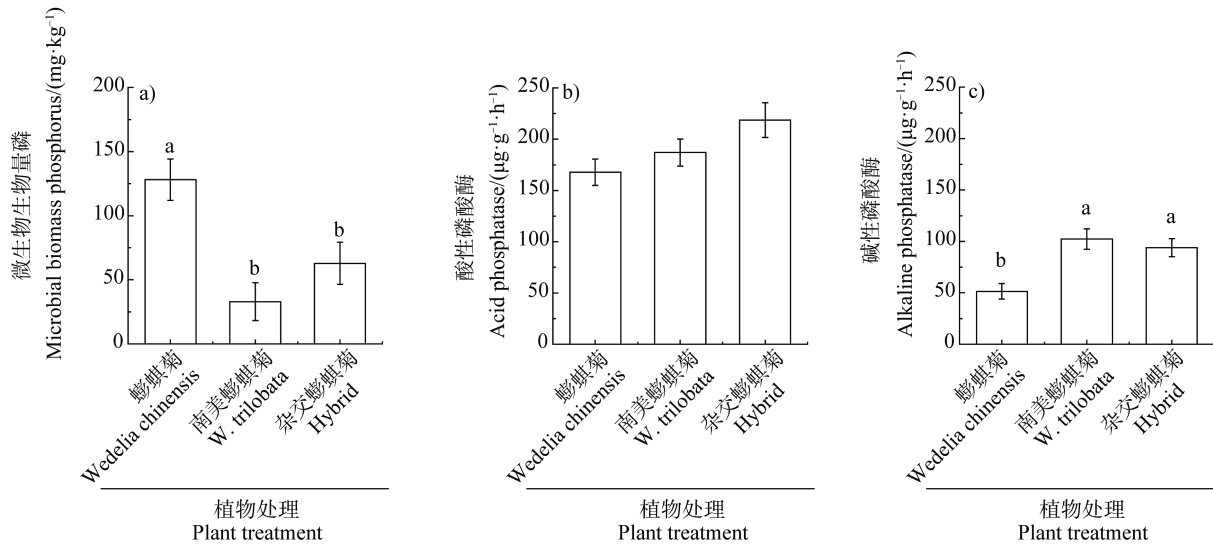
相关分析表明: 酸性磷酸酶活性与各磷组分和全磷相关性不显著 (表 3), 而碱性磷酸酶活性与易

分解磷、铁/铝磷、钙磷显著正相关, 与有机磷、残余态磷、全磷显著负相关 (表 3)。

3 讨论

3.1 不同植物土壤磷组分状况

土壤磷转化的受控因素主要来自三个方面: 1) 地球化学作用释放钙结合磷, 2) 有机酸和 H⁺ 溶解无机磷, 3) 微生物分解有机磷; 此三者的相互作用形成了土壤磷转化过程在入侵植物和土著植物间的差异性格局^[25]。本研究中, 入侵植物和本地植物土壤磷组分差异显著 (表 2), 南美蟛蜞菊土壤易



注: 不同小写字母表示不同植物处理间差异显著 ($P < 0.05$) Note: Different lowercase letters mean significant difference between treatments at 0.05 level

图 1 不同植物处理下土壤微生物生物量磷和磷酸酶活性
Fig. 1 Microbial biomass phosphorus and activity of phosphatase in the soil relative to treatment

表 3 土壤磷酸酶活性与磷组分间相关系数

Table 3 Correlation analysis of soil phosphatase activity and phosphorus fractions

	易分解态磷 Labile-P	铁铝磷 Fe/Al-P	钙磷 Ca-P	有机磷 OP	残余态磷 Residual-P	全磷 TP
酸性磷酸酶 ^①	0.582	0.484	0.107	-0.148	-0.379	-0.238
碱性磷酸酶 ^②	0.836**	0.774*	0.669*	-0.855**	-0.883**	-0.918***

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. ①Acid phosphatase, ②Alkaline phosphatase

分解态磷 (Labile-P) 含量最高, 蜈蚣菊土壤最低。先前的研究^[26]也表明入侵植物 *Solidago gigantea* 通过根际酸化作用显著增加了易分解磷组分 (resin-Pi, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$, NaOH-Pi)。本研究中, 南美蜈蚣菊并未显著改变土壤 pH, 土壤微生物和磷酸酶活性可能是影响磷素矿化的重要因素。由于微生物生物量磷周转速度快, 是土壤有效磷库的重要来源之一, 其含量在南美蜈蚣菊土壤中最低, 可能是微生物生物量磷转化为 Labile-P 导致的结果, 因为较低的微生物生物量磷表明土壤有效磷相对缺乏^[12]。表明微生物生物量磷对入侵植物土壤磷循环过程中具有重要意义。尽管化学固定作用对磷素的影响较大, 在入侵植物南美蜈蚣菊土壤中难溶性磷 (Residual-P) 仍有显著降低, 进而较易分解的磷组分 (Fe/Al-P) 也出现不同程度的减少, 总磷随之降低。

本研究中全碳与有机磷比大于 200, 表明土壤

受到磷限制^[27]。本研究中, 土壤有机磷含量占全磷比例为 17.6%~28.7%, 表明土壤有机磷矿化为无机磷是土壤有效磷的重要部分^[12-13]。蜈蚣菊土壤有机磷含量显著高于南美蜈蚣菊和杂交蜈蚣菊, 这可能因为入侵植物磷吸收和归还模式与本地植物存在显著差异, 进而导致土壤磷平衡的改变和磷组分的变化^[28]。

3.2 磷酸酶活性调控土壤有机磷分解

当土壤无机磷缺乏时, 会刺激微生物释放各种磷酸酶, 包括酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、植酸酶和核苷酸酶, 酸性磷酸酶和碱性磷酸酶均能水解多种磷酸酯类^[13]。先前的研究^[29]表明, 薇甘菊入侵显著增加了土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性, 进而增加了土壤有效磷含量。在本研究中, 三种植物处理中土壤酸性磷酸酶活性并无显著差异, 而南美蜈蚣菊和杂交蜈蚣菊土壤碱性磷酸酶显著高于蜈蚣菊 (图 1), 因此, 碱性磷酸酶在磷转化过程中起着重

要作用。酸性磷酸酶主要由植物根和真菌分泌, 而碱性磷酸酶主要由细菌分泌^[13]。因此, 解磷细菌能够分泌碱性磷酸酶作为获取磷的策略之一^[30]。

前人研究^[13]表明, 碱性磷酸酶能矿化土壤 90% 的有机磷^[13]。本研究中, 碱性磷酸酶是影响土壤有机磷矿化的主要因子, 供应植物所需的有效磷, 且与有机磷含量显著负相关, 从而降低土壤中有机磷含量(表 2)。南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊所吸收利用的有效磷主要来源于有机磷的矿化。碱性磷酸酶主要由微生物分泌, 其活性与微生物活性密切相关, 南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤可溶性有机碳含量高于蟛蜞菊(表 1), 为微生物提供更多碳源, 微生物活性较强^[27]。微生物能分泌更多的碱性磷酸酶, 促进有机磷的矿化, 增加土壤有效磷的含量。这可能是本研究中南美蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊驱动土壤有机磷矿化的主要原因。因此, 在土壤缺磷的华南地区, 碱性磷酸酶促进有机磷的矿化对缓解土壤磷限制具有重要意义^[31]。

4 结 论

在亚热带地区土壤高度风化, 且不同植物处理中易分解态磷(Labile-P)占全磷比例均较少, 全碳与有机磷比大于 200, 表明土壤受到磷限制。但土壤有机磷含量及其占全磷的比例均较高, 是土壤有效磷库的重要部分。此外, 碱性磷酸酶是影响土壤有机磷矿化的主要因素, 与有机磷显著负相关。入侵植物主要通过提高土壤碱性磷酸酶活性来矿化有机磷, 从而增加土壤有效磷含量, 供植物吸收利用。这可能是该地区入侵植物对磷限制的适应机制。

参考文献 (References)

- [1] Zhang P, Nie M, Li B, et al. The transfer and allocation of newly fixed C by invasive *Spartina alterniflora*, and native *Phragmites australis*, to soil microbiota[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 113: 231—239.
- [2] Feng Y L, Lei Y B, Wang R F, et al. Evolutionary tradeoffs for nitrogen allocation to photosynthesis versus cell walls in an invasive plant[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106 (6): 1853—1856.
- [3] Bai R X, Liu H, Wang Y S, et al. Heavy metal contents in *Eupatorium Adenophorum* in Liangshan of Sichuan, and safeness of using the plant as organic manure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (2): 432—442. [白如霞, 刘海, 王玉书, 等. 四川凉山州紫荆泽兰的重金属含量及其肥用安全性评价[J]. 土壤学报, 2018, 55 (2): 432—442.]
- [4] Sax D F, Brown J H. The paradox of invasion[J]. Global Ecology and Biogeography, 2000, 9 (5): 363—371.
- [5] Shannon-Firestone S, Reynolds H L, Phillips R P, et al. The role of ammonium oxidizing communities in mediating effects of an invasive plant on soil nitrification[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 90: 266—274.
- [6] Vieites-Blanco C, González-Prieto S J. Effects of *Carpobrotus edulis* invasion on soil gross N fluxes in rocky coastal habitats[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619: 966—976.
- [7] Wan L Y, Qi S S, Zou C B, et al. Phosphorus addition reduces the competitive ability of the invasive weed *Solidago canadensis*, under high nitrogen conditions[J]. Flora, 2018, 240: 68—75.
- [8] Sardans J, Bartrons M, Margalef O, et al. Plant invasion is associated with higher plant-soil nutrient concentrations in nutrient-poor environments[J]. Global Change Biology, 2017, 23 (3): 1282—1291.
- [9] Yu Z, Wang M, Huang Z, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. Global Change Biology, 2017, 24: 1308—1320.
- [10] Helfenstein J, Tamburini F, von Sperber C, et al. Combining spectroscopic and isotopic techniques gives a dynamic view of phosphorus cycling in soil[J]. Nature Communications, 2018, 9: Article number: 3226.
- [11] Davidl A, Christian M, Markr B, et al. Assessing turnover of microbial biomass phosphorus: Combination of an isotopic dilution method with a mass balance model[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42: 2231—2240.
- [12] Fan Y X, Lin F, Yang L M, et al. Decreased soil organic P fraction associated with ectomycorrhizal fungal activity to meet increased P demand under N application in a subtropical forest ecosystem[J]. Biology & Fertility of Soils, 2018, 54 (1): 149—161.
- [13] Wei X M, Hu Y J, Razavi B S, et al. Rare taxa of alkaline phosphomonoesterase-harboring microorganisms mediate soil phosphorus mineralization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2019, 131: 62—70.
- [14] Lazzaro L, Mazza G, Errico G D, et al. How ecosystems change following invasion by *Robinia pseudoacacia*: Insights from soil chemical properties and soil microbial, nematode, microarthropod and plant communities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 1509—1518.
- [15] Rodríguez-Caballero G, Caravaca F, Alguacil M M, et al. Striking alterations in the soil bacterial community

- structure and functioning of the biological N cycle induced by *Pennisetum setaceum* invasion in a semiarid environment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 109: 176—187.
- [16] Han D, Wang L, Luo Y. Isolation, identification, and the growth promoting effects of two antagonistic actinomycete strains from the rhizosphere of *Mikania micrantha* Kunth[J]. *Microbiological Research*, 2018, 208: 1—11.
- [17] Stefanowicz A M, Stanek M, Nobis M, et al. Few effects of invasive plants *Reynoutria japonica*, *Rudbeckia laciniata* and *Solidago gigantea* on soil physical and chemical properties[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 574: 938—946.
- [18] IUCN. 100 of the world's worst invasive alien species[M]. Auckland: Invasive Species Specialist Group, 2001.
- [19] Song L Y, Liu Z D, Li X N, et al. Eco-physiological responses of *Wedelia trilobata*, *W. chinensis* and their hybrid to simulated extreme high temperature[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26 (2): 183—188. [宋莉英, 刘昭弟, 李晓娜, 等. 三裂叶蟛蜞菊、蟛蜞菊及其杂交种对模拟极端高温的生理生态响应[J]. *生态环境学报*, 2017, 26 (2): 183—188.]
- [20] Ni G Y, Zhao P, Wu W, et al. A hybrid of the invasive plant *Sphagneticola trilobata* has similar competitive ability but different response to nitrogen deposition compared to parent[J]. *Ecological Research*, 2014, 29: 331—339.
- [21] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports no. 103[R]. FAO, Rome, 2007.
- [22] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 970—976.
- [23] Brookes P, Powlson D, Jenkinson D. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1982, 14: 319—329.
- [24] Colvan S R, Syers J K, O'Donnell A G. Effect of long-term fertiliser use on acid and alkaline phosphomonoesterase and phosphodiesterase activities in managed grassland[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2001, 34 (4): 258—263.
- [25] Chapuis-Lardy L, Vanderhoeven S, Dassonville N, et al. Effect of the exotic invasive plant *Solidago gigantea* on soil phosphorus status[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2006, 42: 481—489.
- [26] Herr C, Chapuislardy L, Dassonville N, et al. Seasonal effect of the exotic invasive plant *Solidago gigantea* on soil pH and P fractions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170: 729—738.
- [27] Zeng X M, Fan Y X, Lin K M, et al. Characteristics of soil phosphorus fractions of different vegetation types in subtropical forests and their driving factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (7): 2156—2162. [曾晓敏, 范跃新, 林开森, 等. 亚热带不同植被类型土壤磷组分特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (7): 2156—2162.]
- [28] Jandová K, Klinerová T, Müllerová J, et al. Long-term impact of *heracleum mantegazzianum* invasion on soil chemical and biological characteristics[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68: 270—278.
- [29] Li W H, Zhang C B, Jiang H B, et al. Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* H.B.K[J]. *Plant and Soil*, 2006, 281: 309—324.
- [30] Jiang Y J, Liu M Q, Zhang J B, et al. Nematode grazing promotes bacterial community dynamics in soil at the aggregate level[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11: 2705—2717.
- [31] Yu X C, Liu Q, Li C J, et al. Rhizospheric processes and high substrate concentration stimulating mineralization of soil organic P in black earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (4): 953—963. [于星辰, 刘倩, 李春杰, 等. 根际过程和高底物浓度促进黑土有机磷矿化[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (4): 953—963.]

(责任编辑: 陈荣府)