

湿地围垦对土壤碱性磷酸酶动力学特征的影响

徐传红¹, 卢明星¹, 范弟武¹, 程 虎¹, 韩建刚^{1,2,3}

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 江苏洪泽湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 江苏 洪泽 223100)

摘要: 【目的】酶促反应动力学是揭示土壤养分转化的重要手段。探究围垦对土壤磷素转化及有效性的影响, 以为湿地养分转化效率及质量提升提供理论依据。【方法】采集洪泽湖河湖交汇区(光滩、芦苇 *Phragmites communis*、杨树 *Populus* 和稻田)和崇明东滩湿地(光滩、互花米草 *Spartina alterniflora*、芦苇和麦田)等不同覆被或土地利用方式的 8 种土壤, 以碱性磷酸酶(ALP)为例, 研究湿地围垦对酶促反应动力学特征的影响。采用单因素方差分析法比较不同土地利用下土壤 ALP 动力学参数的差异, 并结合冗余分析探究土壤理化性质与动力学参数的相关性。【结果】洪泽湖湿地, 无论是光滩自然演变为芦苇湿地, 还是围垦芦苇湿地为杨树人工林或稻田, ALP 动力学参数最大反应速率(V_{\max})和米氏常数(K_m)均增大, V_{\max} 增加 13.0%~313.4%, K_m 增加 21.0%~50.8%。但酶的催化效率(V_{\max}/K_m)在自然演替过程中下降 25.0%, 人为围垦利用后增大 2.3 倍。对崇明东滩湿地而言, 光滩演变为芦苇湿地后, V_{\max} 和 K_m 分别增大 7.0 和 6.2 倍, V_{\max}/K_m 增大 11.1%; 芦苇湿地转变为麦田后, V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 分别减少 54.8%、47.0% 和 13.3%。冗余分析结果显示: V_{\max}/K_m 与全氮(洪泽湖)和有机碳(崇明东滩)为正相关关系。【结论】光滩自然演变为芦苇湿地过程中, 尽管 ALP 的总量增加, 但酶与底物亲和力下降。围垦后的土地利用类型及管理方式可能对 ALP 的 V_{\max}/K_m 产生显著影响。无论自然覆被还是围垦后的土地利用类型, 提高土壤全氮和有机碳质量分数有利于 ALP 催化效率的提升。图 1 表 3 参 43

关键词: 土壤学; 湿地; 围垦; 碱性磷酸酶; 酶促反应动力学

中图分类号: S154.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)03-0522-09

Effects of wetland reclamation on kinetic characteristics of soil alkaline phosphatase

XU Chuanhong¹, LU Mingxing¹, FAN Diwu¹, CHENG Hu¹, HAN Jiangan^{1,2,3}

(1. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. National Positioning Observation Station of Hung-tse Lake Wetland Ecosystem in Jiangsu Province, Hongze 223100, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Enzyme kinetics study is a crucial method to reveal nutrient transformation in soil. The purpose of this study is to investigate the effects of wetland reclamation on transformation and availability of soil phosphorus and provide theoretical basis for nutrient conversion efficiency and quality improvement of wetland. [Method] Eight kinds of soil with different natural covers or land use patterns were collected in Hung-tse Lake estuary (shoal, *Phragmites communis*, *Populus* and paddy field) and Chongming Dongtan wetlands (shoal, *Spartina alterniflora*, *P. communis* and wheat field), and the soil alkaline phosphatase (ALP)

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-11-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0505803); 国家自然科学基金资助项目(41375149); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 徐传红, 从事湿地环境过程研究。E-mail: 2410153719@qq.com。通信作者: 韩建刚, 教授, 博士, 从事湿地环境过程研究。E-mail: hanjiangan76@126.com

was taken as an example to study kinetic characteristics of enzymatic reaction. One-Way ANOVA was used to compare the difference of soil ALP dynamic parameters under different land uses, and the correlation between physical and chemical properties of soil and kinetic parameters was explored by using redundancy analysis. [Result] V_{\max} (maximum reaction rate) and K_m (Michaelis constant) of ALP kinetic parameters increased by 13.0%–313.4% and 21.0%–50.8%, respectively in Hung-tse Lake wetland, no matter whether the shoal naturally evolved into *P. communis*, or the reclaimed *P. communis* wetland into *Populus* plantation or paddy field. However, the V_{\max}/K_m (catalytic efficiency) decreased by 25.0% during natural succession and increased by 2.3 times after artificial reclamation. For Chongming Dongtan wetland, V_{\max} and K_m increased by 7.0 times and 6.2 times, and V_{\max}/K_m increased by 11.1% after the transformation of shoal into *P. communis*. Moreover, the V_{\max} , K_m and V_{\max}/K_m decreased by 54.8%, 47.0% and 13.3% respectively after the conversion of *P. communis* into wheat field. Redundancy analysis results indicated that the V_{\max}/K_m was positively correlated with total nitrogen (Hung-tse Lake) and organic carbon (Chongming Dongtan). [Conclusion] The total ALP significantly increased when the shoal was transformed into *P. communis* wetland, but the affinity between enzyme and substrate decreased. The V_{\max}/K_m of ALP was significantly influenced by land use type and management mode after artificial reclamation. Increasing soil total nitrogen and organic carbon is beneficial to improvement of ALP catalytic efficiency no matter whether the land type is natural cover or artificial reclamation. [Ch, 1 fig. 3 tab. 43 ref.]

Key words: soil science; wetland; reclamation; alkaline phosphatase; kinetics of enzyme-catalyzed reactions

土壤磷酸酶水解土壤有机磷，提高磷素有效性，在土壤磷素转化及生物利用过程中具有重要调节作用^[1-3]。湿地生态系统不仅是重要的磷素储备库，在微生物主导的有机磷矿化过程中释放磷素，为植物生长供应重要的磷源，而且其独特的干湿交替水文条件增加了磷素转化的复杂性。自 21 世纪初以来，湿地磷素的转化过程越来越受到学者们的重视^[4]，特别是湿地土地利用/覆被变化影响下土壤磷酸酶变化的研究日益增多^[5-6]。宁沐蕾等^[7]和 KANG 等^[8]研究了崇明岛湿地土壤碱性磷酸酶 (ALP) 活性，表明转变稻田为樟树 *Cinnamomum camphora* 和水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 林地后 ALP 活性增大。王树起等^[9]以三江平原湿地为例，研究湿地土地利用变化下的土壤磷酸酶活性变化，表明草甸开垦为农田后 ALP 活性降低 58.5%，而旱地农田转变为湿地草甸或白桦 *Betula platyphylla* 林地后，ALP 活性分别增高 31.7% 和 18.7%。与以上结果中农田利用下土壤酶活性低于林地和草甸不同的是，任勃等^[10]对洞庭湖湿地的研究表明：水田土壤 ALP 活性高于杨树 *Populus* 林地和芦苇 *Phragmites communis* 地。刘云鹏等^[11]对黄河中游湿地的研究也报道：棉田土壤 ALP 活性成倍 (1.7 倍) 高于蒲草 *Typha orientalis* 植被。而刘琛等^[12]则对海涂围垦区湿地的研究认为：农田 (棉花 *Gossypium hirsutum*、水稻 *Oryza sativa*) 与林地间土壤磷酸酶活性无明显差异。由此可见，目前有关湿地不同覆被类型与土地利用下土壤 ALP 活性变化的研究结论并不一致，有待进一步深入剖析。土地利用变化不但影响土壤酶活性，而且对酶促反应动力学特征产生重要影响，如 NOURBAKHS 等^[13]指出：天然草地转变为人工苜蓿 *Medicago sativa* 种植地后土壤脲酶的米氏常数 (K_m) 提高。LOEPPMANN 等^[14]研究哥廷根下萨克森州农业区的草地转变为玉米 *Zea mays* 田后土壤酶的动力学特征，结果表明：酸性磷酸酶的最大酶促反应速率 (V_{\max}) 和 K_m 减小， V_{\max}/K_m 增大，而 β -葡萄糖苷酶的 V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 均减小。北美原生态草原的草地和森林转变为耕地后，淀粉酶的 V_{\max} 和 K_m 均减小^[15]。以往有关围垦改变土地利用方式对土壤酶的酶促反应动力学特征影响的研究多在地、草原等陆地生态系统进行，而对湿地土壤酶的酶促反应动力学特征的研究，特别是对 ALP 的研究还很不充分。全球气候变化与人为活动加速影响下，生产和生态两重压力下湿地资源保护与合理利用之间的矛盾愈加尖锐^[16-17]。其中，湿地围垦对包括土壤磷素在内的养分转化的影响备受关注。本研究采集洪泽湖和崇明东滩湿地不同覆被或土地利用方式下共 8 种土壤，以 ALP 为例，研究自然演替和围垦利用对湿地 ALP 动力学参数的影响，为湿地养分转化效率及质量提升提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

洪泽湖 (33°14'16"N, 118°18'43"E) 位于江苏省西部淮河下游, 属于亚热带季风气候。由于泥沙淤积而在河湖交汇处形成光滩, 随演替的推进, 光滩演变为芦苇并成为当地优势种。随芦苇地的淤高, 刈割芦苇栽种杨树 (在人工林中占比达 95% 以上) 或种植水稻, 稻田和人工林取代芦苇而成为主要土地利用方式。

崇明东滩 (31°37'31"N, 121°23'33"E) 位于崇明岛东部, 属长江口典型的河口湿地。随光滩的淤积, 芦苇和互花米草 *Spartina alterniflora* 演变为优势物种。人为活动对土地利用方式的影响表现为人为刈割芦苇或互花米草, 转变土地利用方式为小麦 *Triticum aestivum* 田。

1.2 土壤样品采集

2017 年 4 月采集崇明东滩的光滩、互花米草、芦苇和小麦样地土壤, 于 2017 年 7 月采集洪泽湖的光滩、芦苇、杨树人工林和水稻样地土壤。2 种样地的农田耕作和人工林种植时间均达 20 a 以上^[18]。通过“S”形布点法 (7 个样点) 在各样地 (20 m×20 m) 采集土样, 各样点土壤通过“四分法”合并为 1 个土样, 每个样地均取 0~20 cm 的表层土壤 10 kg, 自然风干后过 2 mm 的筛, 保存于阴凉干燥处待用。

1.3 土壤理化性质的测定

pH 值 (水土比 2.5:1.0) 通过雷磁 pH 计测定; 有机碳 (OC) 使用高锰酸钾外加热法测定; 全氮 (TN) 使用凯氏法, 通过流动分析仪测定; 电导率 (EC, 水土比 5:1) 通过电导率测定仪测定; 土壤粒径测定参考文献^[19]; 土壤全磷 (TP) 和无机磷 (IP) 通过灼烧法^[20]测定, 有机磷 (OP) 通过 TP 与 IP 的值相减得到, 微生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法^[21]测定。结果见表 1。

表 1 不同土地利用下土壤基础理化性质

Table 1 Soil basic physicochemical properties under different land uses

湿地	土地类型	pH值	OC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	MBC/(mg·kg ⁻¹)	OP/(mg·kg ⁻¹)	IP/(mg·kg ⁻¹)
洪泽湖	光滩	8.65	15.2	0.58	0.42	108.5	114.1	306.1
	芦苇	8.60	17.7	0.56	0.36	82.1	37.2	324.6
	杨树	8.37	26.5	0.62	0.45	138.0	47.0	402.6
	水稻田	8.17	91.9	0.63	0.40	131.4	15.7	379.6
崇明东滩	光滩	8.53	9.6	0.17	0.57	112.4	46.9	523.5
	互花米草	8.36	14.2	0.64	0.54	83.7	33.5	502.1
	芦苇	8.51	17.7	0.27	0.53	82.0	26.0	504.8
	小麦田	8.26	11.1	0.61	0.66	133.8	46.2	609.1

湿地	土地类型	EC/(mS·cm ⁻¹)	C:N	不同土壤粒径分布/%			
				0.1~2.0	2.0~63.0	63.0~200.0	200.0~2 000.0 μm
洪泽湖	光滩	0.81	26	3.23	76.47	17.95	2.35
	芦苇	0.79	31	0.60	14.97	83.78	0.65
	杨树	2.08	42	1.35	75.68	20.79	2.18
	水稻田	1.14	146	2.16	77.93	18.67	1.24
崇明东滩	光滩	0.86	55	7.94	88.80	2.08	1.18
	互花米草	0.78	22	0.02	87.55	8.63	3.80
	芦苇	0.39	65	4.93	77.36	17.63	0.08
	小麦田	0.14	18	0.14	95.87	2.31	1.68

1.4 酶促反应动力学

ALP 活性的测定参照文献^[22]。称取 2.0 g 土样置于 20 mL 棕色小玻璃瓶中, 设置 3 组平行, 加入 pH 8.4 的氨基丁三醇盐酸 (Tris-HCl) 缓冲液 3.0 mL, 土样分别加入 0、1.7、2.0、2.5、3.3、5.0 和 10.0

mmol·L⁻¹ 对硝基苯磷酸二钠 (PNPP) 溶液 1 mL, 加入 0.5 mol·L⁻¹ 氯化钙 (CaCl₂) 溶液 1 mL, 摇匀, 37 °C 水浴 1 h(对照组不水浴), 取出玻璃瓶, 立刻加入 0.5 mol·L⁻¹ 氢氧化钠 (NaOH) 4.0 mL 终止反应, 过滤。取滤液 5.0 mL 于 25 mL 具塞比色管中, 加入 2.0 mol·L⁻¹ 氨基丁三醇 (Tris) 溶液 2 mL, 定容, 采用紫外分光光度计 (UV-2550 型) 在 400 nm 波长下测定对硝基苯酚 (p-NP) 吸光度 (ALP 活性以 1 kg 土壤 1 h 生成的 p-NP 的量表示)。ALP 活性计算如下:

$$V = \frac{(C_1 - C_0) \times 9 \times 5}{m \times t} \quad (1)$$

式 (1) 中: V 为 ALP 活性 (mmol·kg⁻¹·h⁻¹); C_1 和 C_0 分别为 25 mL 具塞比色管中处理组和对照组 p-NP 浓度 (mmol·L⁻¹); m 为土壤质量 (g); t 为水浴时间 (h)。

酶促反应动力学参数计算如下:

$$\frac{1}{V} = \frac{K_m}{V_{\max}} \times \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_{\max}} \quad (2)$$

式 (2) 中: V 为酶促反应速率 (mmol·kg⁻¹·h⁻¹); K_m 为米氏常数 (mmol·L⁻¹); V_{\max} 为最大酶促反应速率 (mmol·kg⁻¹·h⁻¹); $[S]$ 为底物浓度 (mmol·L⁻¹)。

1.5 统计方法

采用 CANOCO 5.0 进行数据的统计分析, 使用 Excel 2010 制作表格。运用冗余分析方法分析酶促反应动力学参数与土壤基础理化性质的相关性, 采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析。ALP 活性以平均值±标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 不同覆被/土地利用下 ALP 活性

底物 PNPP 在 0、1.7、2.0、2.5、3.3、5.0 和 10.0 mmol·L⁻¹ 的不同浓度下, 土壤 ALP 活性表现出随 PNPP 浓度的增加而增大的趋势 (表 2)。自然覆被和人为土地利用方式下 ALP 活性差异显著 ($P < 0.05$)。光滩转变为芦苇湿地的自然演替过程中, 洪泽湖湿地不同 PNPP 浓度下 ALP 活性平均减小约 10.9%, 而在崇明东滩湿地表现为增大 74.0%。崇明东滩互花米草入侵光滩后, ALP 活性仅增加 10.7%。人类活动影响下, 洪泽湖芦苇湿地转变为人为利用方式杨树林地或水稻田后, ALP 活性增大约为 2.2~2.3 倍。而崇明东滩芦苇和互花米草湿地转变为小麦田后, ALP 活性分别减小 17.9% 和增加 23.3%。

表 2 湿地不同土地类型下 ALP 活性随 PNPP 浓度的变化

Table 2 ALP activities with the concentration of PNPP in different land use changes

湿地	土地类型	不同PNPP浓度下ALP活性/(mmol·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)						
		0	1.7	2.0	2.5	3.3	5.0	10.0 mmol·L ⁻¹
洪泽湖	光滩	0.001±0.001 Ag	0.090±0.001 Cf	0.096±0.004 Be	0.114±0.003 Bd	0.124±0.007 Cc	0.166±0.004 Bb	0.217±0.003 Ca
	芦苇	0.001±0.000 Af	0.074±0.003 De	0.086±0.005 Bde	0.097±0.002 Cd	0.115±0.014 Cc	0.148±0.004 Bb	0.223±0.010 Ca
	杨树	0.001±0.000 Ag	0.254±0.010 Af	0.307±0.008 Ae	0.351±0.019 Ad	0.431±0.006 Ac	0.554±0.010 Ab	0.784±0.018 Aa
	水稻	0.001±0.001 Ag	0.243±0.001 Bf	0.290±0.011 Ae	0.344±0.004 Ad	0.394±0.008 Bc	0.557±0.003 Ab	0.724±0.007 Ba
崇明东滩	光滩	0.003±0.000 Ae	0.332±0.000 Dd	0.370±0.004 Dcd	0.443±0.004 Dbcd	0.510±0.008 Cbcd	0.624±0.010 Db	0.845±0.011 Ca
	互花米草	0.003±0.001 Ag	0.361±0.010 Cf	0.408±0.000 Ce	0.467±0.002 Cd	0.587±0.003 Cc	0.713±0.003 Cb	0.852±0.01 C6a
	芦苇	0.003±0.000 Ag	0.47±0.0048 Af	0.568±0.019 Ae	0.713±0.018 Ad	0.950±0.005 Ac	1.362±0.051 Ab	2.002±0.011 Aa
	小麦	0.003±0.000 Ag	0.382±0.012 Bdf	0.450±0.006 BDe	0.645±0.014 Bd	0.662±0.011 Bc	1.023±0.016 Bb	1.510±0.015 Ba

说明: 不同小写字母表示某一土地利用/覆被土壤不同PNPP浓度下ALP活性差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示某一PNPP浓度下不同土地利用/覆被土壤ALP活性差异显著($P < 0.05$)

2.2 不同土地利用/覆被下 ALP 酶促反应动力学特征

ALP 动力学参数的研究表明: 洪泽湖和崇明东滩湿地自然覆被下的光滩、芦苇/互花米草和人为利用下的杨树、水稻和小麦土壤 ALP 的 V_{\max} 和 K_m 差异显著 ($P < 0.05$) (表 3)。洪泽湖光滩转变为芦苇

湿地的自然演变过程中, V_{\max} 和 K_m 分别增加 13.0% 和 50.8%, V_{\max}/K_m 减少 25.0%; 土地利用类型由芦苇转变为稻田和杨树人工林后, V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 的增长幅度分别为 290.6%~313.4%、21.0%~21.7% 和 224.4%~239.6%。相比较而言, 崇明东滩湿地光滩演变为芦苇植被后, V_{\max} 增加 697.1%, K_m 增加 622.4%, V_{\max}/K_m 增加 11.1%。而互花米草入侵光滩后, V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 分别增加 7.9% 和 10.2%, K_m 变化不明显。刈割芦苇栽种小麦, V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 分别减少 54.8%、47.0% 和 13.3%。不难发现, 洪泽湖湿地光滩和芦苇植被土壤 ALP 的 V_{\max}/K_m 显著小于稻田和杨树人工林 ($P<0.05$), 而崇明东滩湿地表现为麦田土壤 ALP 的 V_{\max}/K_m 小于光滩、芦苇和互花米草植被, 两地自然覆被与土地围垦利用后土壤 ALP 的 V_{\max}/K_m 表现出较大的变化差异。

表 3 不同土地利用下土壤 ALP 的动力学参数

Table 3 Kinetics of enzyme-catalyzed reactions of ALP under different land uses

湿地	土地类型	$V_{\max}/(\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_m/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	$V_{\max}/K_m/(\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$
洪泽湖	光滩	0.28 b	3.74 c	0.08 b
	芦苇	0.32 b	5.64 b	0.06 b
	杨树	1.32 a	6.87 a	0.19 a
	水稻	1.26 a	6.83 a	0.18 a
崇明东滩	光滩	1.19 d	4.32 c	0.27 a
	互花米草	1.28 c	4.23 c	0.30 a
	芦苇	9.44 a	31.22 a	0.30 a
	小麦	4.27 b	16.53 b	0.26 a

说明: 不同小写字母表示不同土地利用/覆被土壤下 ALP 动力学参数差异显著 ($P<0.05$)

2.3 V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 与土壤理化性质的关系

洪泽湖和崇明东滩湿地土壤 ALP 的动力学参数受土壤磷素的存在形式和碳氮质量分数影响明显 (图 1), 洪泽湖湿地土壤 IP 质量分数的增加有利于 V_{\max} 的增大, 土壤 OP 的增大抑制 K_m 的增加, C:N、OC 的增大有利于 K_m 的增大, TN 和 EC 质量分数的增加有利于 V_{\max}/K_m 的增大。崇明东滩湿地 0.1~2.0 μm 粒径土壤的增大对 ALP 的 V_{\max} 增大起到抑制作用, TN 质量分数的减小有利于 K_m 的增大, OC 质量分数和 63.0~200.0 μm 粒径土壤的增大有利于 V_{\max}/K_m 的增加, 而 MBC 增大则抑制 V_{\max}/K_m 的提高。

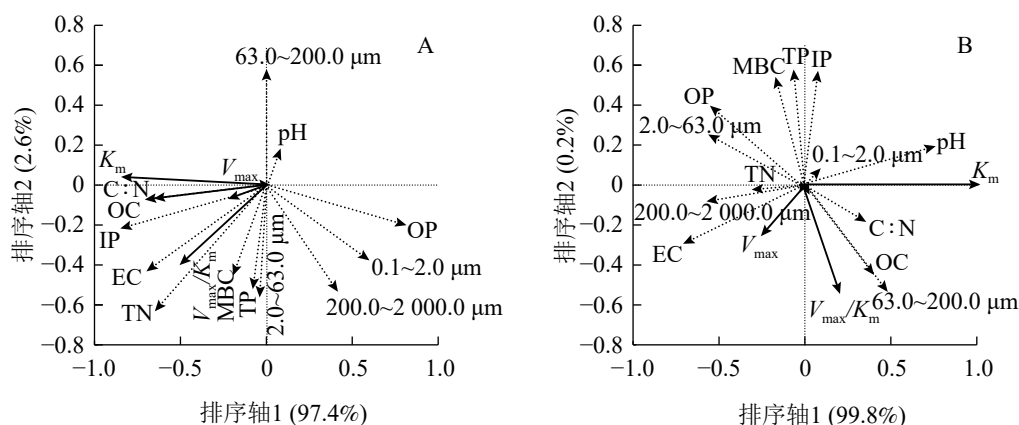


图 1 洪泽湖 (A) 和崇明东滩 (B) ALP 的 V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 与土壤基础理化性质的冗余分析

Figure 1 Redundancy analysis between V_{\max} , K_m and V_{\max}/K_m of Hung-tse Lake (A) and Chongming Dongtan (B) ALP and soil physicochemical properties

3 讨论

3.1 覆被变化/围垦利用对 ALP 活性的影响

杨文彬等^[23]以漓江水陆交错带为例研究不同覆被下土壤酶活性变化, 结果表明: 苔藓植被自然演变为灌丛后, ALP 活性增加 30.9%~36.9%。HUANG 等^[24]发现盐城滨海湿地光滩转变为芦苇或互花米草植

被后, ALP 活性增大, 其中土壤 OC 和 TN 的增加是导致 ALP 活性增大的重要因素。本研究中崇明东滩湿地光滩演变为芦苇或互花米草的自然演替过程中, 土壤 OC、TN 和 ALP 活性均增大, 与以往研究结果一致。有所不同的是洪泽湖光滩演变为芦苇湿地后, ALP 活性降低 10%, 这可能与土壤 OC 和 TN 变化均不明显有关。

天然湿地经过人为围垦利用后, ALP 活性呈现增大趋势, 如黄莉^[25]研究人类活动影响下土壤酶的变化发现: 鄱阳湖湿地经过围垦后土壤微生物活性提高, 磷酸酶活性增大。湖北荆江天然河流湿地围垦为稻田后 ALP 活性增加 72%^[26]。本研究中, 洪泽湖芦苇湿地转变杨树林地或水稻田, 崇明东滩互花米草植被转变为小麦田后 ALP 活性显著增大 ($P < 0.05$), 与以往研究结果一致。人为转变土地利用方式后, 土壤 MBC 质量分数也表现为明显增大, 表明微生物群落活跃程度提高, 与 ALP 活性变化一致。值得指出的是, 崇明东滩湿地芦苇湿地转变为农田后, ALP 活性降低约 17.7%, 这可能受土壤 C:N 的显著下降影响^[27]。

3.2 覆被变化对 V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 的影响

酶促反应动力学参数中, V_{\max} 表示酶被底物完全饱和时的反应速度, 反映土壤酶的总量及酶-底物复合物分解为酶和产物的能力^[28], K_m 表征酶与底物亲和力^[29], V_{\max}/K_m 表征酶的催化效率^[30-31]。本研究中洪泽湖和崇明东滩湿地光滩演变为芦苇植被, V_{\max} 增大, 植被增加使得由土壤微生物活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程分泌的 ALP 含量增大^[32-33]。刘存歧^[34]也指出: 崇明东滩潮滩沉积物中 ALP 的 V_{\max} 表现为芦苇湿地大于光滩土壤, 本研究结果与其一致。值得指出的是, 崇明东滩湿地光滩演变为互花米草(入侵物种)植被后, V_{\max} 无明显变化, 可能是因为崇明东滩互花米草入侵加快土壤有机质降解, 而可培养微生物菌落数却显著降低^[35-36]。光滩演变为芦苇植被后两地土壤 ALP 的 K_m 均表现为显著增大 ($P < 0.05$), 这可能与有机质对 ALP 的吸附有关^[37]。TISCHER 等^[38]也发现: 安第斯山脉草地自然演变为有机质含量更丰富的灌木林后土壤酸性磷酸酶的 K_m 增大。本研究结果与其相似。

3.3 湿地围垦利用后 V_{\max} 、 K_m 和 V_{\max}/K_m 的变化

人为转变土地利用方式后, 土壤酶的 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 减小, 如 KHALILI 等^[39]发现: 伊朗中部扎格罗斯地区天然森林转变为耕地后, 土壤纤维素酶 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 减小; KNIGHT 等^[40]以俄勒冈州为例研究土地利用变化对土壤酶动力学特征的影响, 结果表明: 天然草地转变为农田后 β -葡萄糖苷酶的 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 减小。然而也有结果显示: 人为土地利用变化可通过施肥等管理方式的影响使得土壤磷酸酶的 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 增大。孔龙等^[41]指出: 农田耕作施加肥料而引起的土壤肥力增大可导致土壤磷酸酶的 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 增大, 邱莉萍等^[31]也表明: 小麦地土壤中 OC 和氮磷等营养指标的提高可促进 ALP 的 V_{\max} 增大。本研究中, 洪泽湖湿地刈割芦苇栽植杨树或转变为稻田后, 土壤 OC 质量分数均增加。常年农业化肥施用土壤 TN 质量分数提高的影响下, 动力学参数 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 显著增大 ($P < 0.05$), 该结果与孔龙等^[41]、邱莉萍等^[31]的结果一致。此外, 施肥作用影响下洪泽湖芦苇湿地转变为杨树人工林和水稻田后 EC 由 $0.79 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 增加到 2.08 和 $1.14 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 可能也是 V_{\max}/K_m 增大的重要原因。相关性分析结果也表明: V_{\max}/K_m 与土壤 TN 和 EC 存在正相关关系。值得指出的是, 崇明东滩湿地芦苇地转变为小麦田后 ALP 的 V_{\max} 和 V_{\max}/K_m 均降低, 可能受农业旱地土壤 OC 养分的淋失影响。其中 V_{\max} 的降低可能还与 EC 的淋失有关。相关性分析也表明: 崇明东滩湿地土壤 ALP 的 V_{\max} 与 EC 存在正相关关系。小麦地在常年施肥影响下 TN 质量分数增大 1.3 倍, 而 OC 质量分数降低 37.3%, 这可能是 V_{\max}/K_m 下降的重要原因。相关性分析结果也显示: OC 的减少不利于 ALP 的 V_{\max}/K_m 增大。一方面, 高质量分数 OC 有利于 ALP 的合成, 有机质的吸附作用可减少酶的损失^[42], 另一方面土壤中有有机质是土壤酶促反应的重要能量来源^[43], 因而低质量分数 OC 抑制 ALP 整体催化效率。人为围垦后崇明东滩土壤 ALP 的 K_m 降低可能与土壤 OC 质量分数的降低有关, 围垦芦苇湿地为麦田后 OC 质量分数降低, 低质量分数有机质对 ALP 的吸附作用较小, 增大酶与底物结合的机会^[37]。

4 结论

洪泽湖和崇明东滩湿地, 在光滩自然演变为芦苇湿地过程中, V_{\max} 和 K_m 均增大, ALP 的总量增加, 但酶与底物亲和力下降。洪泽湖围垦芦苇湿地为杨树人工林或水稻田, V_{\max}/K_m 增加, 崇明东滩围

垦芦苇湿地为小麦田, V_{\max}/K_m 下降, 林地和水稻田相比较于小麦田可能更有利于土壤酶催化效率的增加。相关性分析结果表明: 洪泽湖和崇明东滩湿地土壤 ALP 的 V_{\max}/K_m 分别与 TN 和 OC 密切正相关。可见, 湿地围垦后的土地利用类型及管理方式可能对 ALP 的 V_{\max}/K_m 产生显著影响, 提高土壤 TN 和 OC 质量分数有利于 ALP 催化效率的提升。

5 参考文献

- [1] NANNIPIERI P, TRASAR-CEPEDA C, DICK R P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis [J]. *Biol Fertil Soil*, 2018, **54**(1): 11 – 19.
- [2] XU Zhiwei, YU Guirui, ZHANG Xinyu, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC) [J]. *Soil Biol Biochem*, 2017, **104**(1): 152 – 163.
- [3] ZHAO Fazhu, REN Chengjie, HAN Xinhui, *et al.* Changes of soil microbial and enzyme activities are linked to soil C, N and P stoichiometry in afforested ecosystems [J]. *For Ecol Manage*, 2018, **427**: 289 – 295.
- [4] BAI Junhong, YU Zibo, YU Lu, *et al.* In-situ organic phosphorus mineralization in sediments in coastal wetlands with different flooding periods in the Yellow River Delta, China [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **682**: 417 – 425.
- [5] GAO Yang, MAO Liang, MIAO Chiyuan, *et al.* Spatial characteristics of soil enzyme activities and microbial community structure under different land uses in Chongming Island, China: geostatistical modelling and PCR-RAPD method [J]. *Sci Total Environ*, 2010, **408**(16): 3251 – 3260.
- [6] MAHARJAN M, SANALLAH M, RAZAVI B S, *et al.* Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils [J]. *Appl Soil Ecol*, 2017, **113**: 22 – 28.
- [7] 宁沐蕾, 高唤唤, 黄天颖, 等. 崇明岛土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(7): 1949 – 1956.
NING Mulei, GAO Huanhuan, HUANG Tianying, *et al.* Effects of land use patterns on soil enzyme activity in Chongming Island [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(7): 1949 – 1956.
- [8] KANG Hongzhang, GAO Huanhuan, YU Wenjuan, *et al.* Changes in soil microbial community structure and function after afforestation depend on species and age: case study in a subtropical alluvial island [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **625**: 1423 – 1432.
- [9] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同土地利用方式对三江平原湿地土壤酶分布特征及相关肥力因子的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(4): 150 – 153, 192.
WANG Shuqi, HAN Xiaozeng, QIAO Yunfa, *et al.* Characteristics of soil enzyme activity and fertility under different types of land use in wetland of Sanjiang Plain [J]. *J Soil and Water Conserv*, 2007, **21**(4): 150 – 153, 192.
- [10] 任勃, 杨刚, 谢永宏, 等. 洞庭湖区不同土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, **25**(4): 8 – 11.
REN Bo, YANG Gang, XIE Yonghong, *et al.* Effects of land use patterns on enzyme activity in soils in the Dongting Lake area [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2009, **25**(4): 8 – 11.
- [11] 刘云鹏, 申卫博, 张社奇, 等. 黄河中游湿地土壤养分与酶活性特征及相关性研究[J]. *草地学报*, 2013, **21**(3): 474 – 478, 484.
LIU Yunpeng, SHEN Weibo, ZHANG Sheqi, *et al.* Characteristics and correlation analysis of soil nutrient and enzyme activities of the middle Yellow River wetland [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2013, **21**(3): 474 – 478, 484.
- [12] 刘琛, 丁能飞, 郭彬, 等. 不同土地利用方式下围垦海涂微生物群落和土壤酶特征[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(1): 99 – 105.
LIU Chen, DING Nengfei, GUO Bin, *et al.* Characteristics of microbial community structure and enzyme activities in reclaimed saline soil region under different land use types [J]. *Chin J Soil Sci*, 2013, **44**(1): 99 – 105.
- [13] NOURBAKHSH F, MONREAL C. Urease activity as affected by cultivation and soil depth: a kinetic approach [J]. *Agrochimica*, 2006, **50**(1): 72 – 76.
- [14] LOEPPMANN S, BLAGODATSKAYA E, JOHANNA P, *et al.* Substrate quality affects kinetics and catalytic efficiency of exo-enzymes in rhizosphere and detritosphere [J]. *Soil Biol Biochem*, 2016, **92**: 111 – 118.
- [15] FARRELL R, VADAKATTU G, GERMIDA J J. Effects of cultivation on the activity and kinetics of arylsulfatase in Saskatchewan soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, **26**(8): 1033 – 1040.

- [16] ROBERTS R D, ZHULISOV A V, PAVLOV D F. The state of knowledge about wetlands and their future under aspects of global climate change: the situation in Russia [J]. *Aquat Sci*, 2013, **75**(1): 27 – 38.
- [17] FINLAYSON M, DAVIS J, GELL P, *et al.* The status of wetlands and the predicted effects of global climate change: the situation in Australia [J]. *Aquat Sci*, 2013, **75**(1): 1 – 12.
- [18] 阮子学. 土地利用变化对土壤反硝化和氨化相对重要性的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
RUAN Zixue. *The Relative Importance and Mechanism of Soil Dissimilatory Nitratereduction to Ammonium and Denitrification under the Change of Land Use: A Case Study in Chongming Dongtan*[D]. Nanjing : Nanjing Forest University, 2018.
- [19] STEMMER M, GERZABEKI M H, KANDELER E. Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after low-energy sonication [J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, **30**(1): 9 – 17.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] 范弟武, 徐莎, 周曼丽, 等. Cd²⁺和 Cr³⁺对崇明东滩湿地土壤碱性磷酸酶的低剂量兴奋效应[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(2): 320 – 325.
FAN Diwu, XU Sha, ZHOU Manli, *et al.* Low-dose hormetic effects of Cd²⁺ and Cr³⁺ on alkaline phosphatase in wetland soil in Dongtan of Chongming [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2016, **32**(2): 320 – 325.
- [23] 杨文彬, 耿玉清, 王冬梅. 漓江水陆交错带不同植被类型的土壤酶活性[J]. *生态学报*, 2015, **35**(14): 4604 – 4612.
YANG Wenbin, GENG Yuqing, WANG Dongmei. The activities of soil enzyme under different vegetation types in Li River riparian ecotones [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(14): 4604 – 4612.
- [24] HUANG Lidong, ZHANG Yaohong, SHI Yiming, *et al.* Comparison of phosphorus fractions and phosphatase activities in coastal wetland soils along vegetation zones of Yancheng National Nature Reserve, China [J]. *Estuarine Coast Shelf Sci*, 2015, **157**: 93 – 98.
- [25] 黄莉. 微生物对鄱阳湖湿地不同围垦时间及土地利用类型的响应[D]. 南昌: 江西师范大学, 2013.
HUANG Li. *Response of Microorganism to Different Reclamation Time and Land Use Type of Poyang Lake Wetland*[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2013.
- [26] 靳振江. 耕作和长期施肥对稻田土壤微生物群落结构及活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
JIN Zhenjiang. *Effects of Tillage and Long-term Fertilization on Soil Microbial Community Structure and Activity in Paddy Fields*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [27] 白雪娟, 曾全超, 安韶山, 等. 子午岭人工林土壤微生物生物量及酶活性[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(8): 2695 – 2704.
BAI Xuejuan, ZENG Quanchao, AN Shaoshan, *et al.* Soil microbial biomass and enzyme activities among different artificial forests in Ziwuling [J]. *Chin Appl Ecol*, 2018, **29**(8): 2695 – 2704.
- [28] GERMAN D P, MARCELO K R B, STONE M, *et al.* The Michaelis-menten kinetics of soil extracellular enzymes in response to temperature: a cross-latitudinal study [J]. *Glob Change Biol*, 2012, **18**(4): 1468 – 1479.
- [29] WALLENSTEIN M D, WEINTRAUB M N. Emerging tools for measuring and modeling the in situ activity of soil extracellular enzymes [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**(9): 2098 – 2106.
- [30] GERMAN D P, WEINTRAUB M N, GRANDY A S, *et al.* Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43**(7): 1387 – 1397.
- [31] 邱莉萍, 王益权, 刘军, 等. 旱地长期培肥土壤脲酶和碱性磷酸酶动力学及热力学特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, **13**(6): 1028 – 1034.
QIU Liping, WANG Yiquan, LIU Jun, *et al.* The dynamic and thermodynamic characteristics of soil reactions catalyzed by soil enzymes under long-term fertilization in Loess Plateau [J]. *Plant Nut Fert Sci*, 2007, **13**(6): 1028 – 1034.
- [32] 邵文山, 李国旗. 土壤酶功能及测定方法研究进展[J]. *北方园艺*, 2016(9): 188 – 193.
SHAO Wenshan, LI Guoqi. Research progress of soil enzymes function and its determination method [J]. *Northern Horticulture*, 2016(9): 188 – 193.
- [33] 李小炜, 卜耀军. 黄土高原撂荒地植被演替及土壤性质分析[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **46**(4): 83 – 90.

- LI Xiaowei, BU Yaojun. The vegetation succession and soil properties of abandoned valley land in the Loess Plateau [J]. *J Shaanxi Norm Univ Nat Sci Ed*, 2018, **46**(4): 83 – 90.
- [34] 刘存歧. 河口潮滩湿地沉积物中胞外酶研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2003.
- LIU Cunqi. *Studies on Extracellular Enzymes in Sediments of Tidal Flat Wetland in Estuary*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2003.
- [35] 李艳丽, 王磊, 张文俊, 等. 互花米草控制技术对湿地土壤有机碳保留能力与微生物活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(7): 1529 – 1534.
- LI Yanli, WANG Lei, ZHANG Wenquan, *et al.* Effect of *Spartina alterniflora* controlling technologies on organic carbon sequestration and microbial activities in wetland soil [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2009, **28**(7): 1529 – 1534.
- [36] 张骁栋. 互花米草与蟹类扰动对崇明东滩植物种间关系及生地化循环的影响[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- ZHANG Xiaodong. *Effects of Spartina Alterniflora and Crab Disturbance on the Relationship between Plant Species and Biogeochemical Cycle in East Chongming Beach*[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [37] 李文华, 邵学新, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地土壤碱性磷酸酶活性分布及其与磷形态的关系[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(12): 3341 – 3349.
- LI Wenhua, SHAO Xuexin, WU Ming, *et al.* Soil alkaline phosphatase activity and its relationship with phosphorus forms of Hangzhou Bay Intertidal Wetland [J]. *Acta Sci Circumst*, 2013, **33**(12): 3341 – 3349.
- [38] TISCHER A, BLAGODATSKAYA E, HAMER U. Microbial community structure and resource availability drive the catalytic efficiency of soil enzymes under land-use change conditions [J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, **89**: 226 – 237.
- [39] KHALILI B, NOURBAKHSH F, NILI N, *et al.* Diversity of soil cellulase isoenzymes is associated with soil cellulase kinetic and thermodynamic parameters [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43**(8): 1639 – 1648.
- [40] KNIGHT T R, DICK R P. Differentiating microbial and stabilized beta-glucosidase activity relative to soil quality [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(12): 2089 – 2096.
- [41] 孔龙, 谭向平, 和文祥, 等. 黄土高原沟壑区宅基地复垦土壤酶动力学研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, **41**(2): 123 – 129.
- KONG Long, TAN Xiangping, HE Wenxiang, *et al.* Enzyme kinetics characteristics of soil in the reclaimed homestead land on Loess Plateau [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2013, **41**(2): 123 – 129.
- [42] 隽英华, 陈利军, 武志杰, 等. 苯基磷酸二胺对土壤脲酶的抑制作用动力学研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2008, **34**(4): 431 – 438.
- JUN Yinghua, CHEN Lijun, WU Zhijie, *et al.* Kinetics of soil urease affected by phenyl phosphorodiamidate [J]. *J Zhejiang Univ Agric Life Sci*, 2008, **34**(4): 431 – 438.
- [43] JUAN Yinghua, CHEN Zhenhua, CHEN Lijie, *et al.* Kinetics of soil urease in four agricultural soils affected by urease inhibitor PPD at contrasting moisture regimes [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2014, **45**(17): 2268 – 2276.