

土地利用变化对闽江口湿地土壤生态酶化学计量特征的影响

刘子恺，金圣圣，余涵霞，王维奇，沈菊培，贺纪正

(福建师范大学地理科学学院,福州 350007)

摘要：为探究闽江口湿地土地利用和恢复对土壤酶活性的影响，采集闽江口芦苇湿地、滩涂地、草地、农田和撂荒地 5 种不同土地利用方式，分析土壤 β —葡萄糖苷酶、N—乙酰—氨基葡萄糖苷酶、L—亮氨酸—氨基肽酶和酸性磷酸酶活性及与环境因子之间的关系。结果表明：土壤 pH、铵态氮和硝态氮在农田土壤显著高于其他土地利用方式；而土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)全量含量在撂荒地和芦苇湿地显著高于其他土地利用方式。撂荒地、农田和芦苇湿地可溶性碳氮含量显著高于滩涂和草地土壤；土壤微生物量碳氮含量在不同土地利用方式间变化趋势比较一致，撂荒地均显著高于其他土地利用方式，分别为 1 272、124 mg/kg。土壤酶活性变化趋势在不同土地利用方式间基本一致，即撂荒地最高，其次是芦苇湿地和农田，草地和滩涂最低。土壤酶活性矢量长度介于 1.12~1.34，矢量角度均大于 45°，且土壤胞外酶生态化学计量 C：N：P 总体上为 1.00：1.03：1.33，表现出主要受磷限制的影响。土壤酶活性与可溶性碳氮、总碳氮和微生物量碳氮均呈显著正相关。研究结果表明，芦苇湿地转化为滩涂等利用方式后土壤碳氮等养分显著降低，而撂荒等方式可提高土壤养分含量，促进土壤微生物活性，进而有利于湿地生态系统的恢复和改善。

关键词：闽江河口；土地利用；芦苇湿地；土壤酶活性；矢量分析

中图分类号：S154.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)06-0410-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.050

Effect of Land Use Change on the Eco-stoichiometric Characteristics in Min River Estuary Wetland

LIU Zikai, JIN Shengsheng, YU Hanxia, WANG Weiqi, SHEN Jupei, HE Jizheng

(School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: Soil enzymes activities are important indicators for ecosystem function, playing key roles in nutrient cycling. In this study, five different land use types in Min River estuary wetland, i.e. reed wetland, tidal flat, grassland, farmland and fallow, were selected to investigate the effects of land use changes and restoration on soil enzymes activities as well as their relationship with soil properties. Soil enzymes activities including β —Glucosidase, N—Acetyl— β —glucosaminidase, L—Leucine aminopeptidase and phosphatase were detected. Results showed that soil pH, NH_4^+ —N and NO_3^- —N contents were significantly higher in farmland than other land uses, while soil total carbon (C), nitrogen (N), and phosphorous (P) were significantly higher in fallow and reed wetland. Soil DOC, DON contents were significantly higher in fallow land, farmland and reed wetland than tidal flat and grassland. Soil microbial biomass carbon and nitrogen showed similar trend along different land uses with the highest in fallow land around 1 272 and 124 mg/kg, respectively. Soil enzymes activities showed similar pattern along different land uses, with the highest in fallow land, followed by reed wetland, farmland, grassland and tidal flat. Soil enzyme vector length ranged from 1.12~1.34, while all the vector angles were over 45°. Additionally, enzymatic eco-stoichiometric value was 1.00：1.03：1.33, indicating all the land uses were limited by phosphorus. Soil enzymes activities were significantly related with DOC, DON, microbial biomass C and N. These findings indicated that land use change from reed wetland to tidal flat significantly reduced soil nutrients, while fallow land increased soil microbial function, thereby

收稿日期:2022-05-07
资助项目:国家自然科学基金面上项目(32171642);2021 年度福建省“闽江学者”特聘教授奖励
第一作者:刘子恺(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事森林生态系统元素循环研究。E-mail:185401805@qq.com
通信作者:沈菊培(1979—),女,研究员,主要从事土壤微生物生态学研究。E-mail:jpshe@fjnu.edu.cn
贺纪正(1965—),男,教授,主要从事土壤生态学研究。E-mail:jzhe@fjnu.edu.cn

providing alternative restoration strategy for wetland.

Keywords: Min River estuary; land use; reed wetland; soil enzymes activities; vector analysis

河口和滨海湿地作为陆地生态系统和海洋生态系统的重要过渡带,是地球上物种最为丰富的生态系统之一,在地球物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用。河口湿地是对全球变化和人类活动反应最为敏感的生态系统之一,也是全球变化研究关注的热点区域。湿地土壤因其高有机质和还原性特征而有别于陆地土壤,具有一系列特殊的生态系统服务功能^[1]。受人类活动的影响,土地利用已成为影响全球变化的一个重要因素,可改变湿地土壤生物地球化学循环^[2],进而影响生态系统功能。随着人类活动的日益加剧,如开垦、滩涂养殖、城市化等,对湿地土壤水源涵养功能、有机碳储量、地下水位等方面产生显著影响。有研究^[3-4]发现,湿地土壤由于开垦促进温室气体排放、打破土壤碳氮磷生态化学计量平衡等。可见,评估和保护湿地土壤生态功能对维持湿地可持续利用及应对全球变化具有重要的生态意义。

作为土壤生物学活性的重要组成部分,土壤胞外酶直接参与物质转化和养分循环,在土壤生态系统碳(C)、氮(N)、磷(P)等循环中扮演着重要角色,被认为是土壤生态功能的重要指标^[5]。例如,N—乙酰—氨基葡萄糖苷酶(NAG)参与几丁质的水解,而 β —葡萄糖苷酶(BG)可以直接介导微生物,从纤维素和半纤维素中获取碳^[6]。有研究^[7]发现,土地利用强度的增强降低土壤酶活性,而土地恢复则促进土壤酶活性,且与土壤碳氮磷等有效态含量显著相关^[8]。可见,土地利用方式、植被类型以及人为活动等均显著影响土壤胞外酶活性,但目前关于湿地土地利用方式改变或恢复对土壤酶活性的影响还不是很清楚,特别是基于生态酶学计量特征的影响更是知之甚少。近年来,生态化学计量研究不断发展,土壤胞外酶生态化学计量(C:N:P)特征反映微生物的代谢和营养需求之间的生物化学平衡^[5],是表征土壤能量和养分资源限制状况的重要指标^[9]。酶活性计量比值的矢量长度和矢量角度可以从另一个角度指示土壤养分的限制状况,已被广泛用于表征土地利用变化和土地恢复^[10]等研究。因此,研究不同土地利用下土壤胞外酶活性的变化及生态化学计量特征可为湿地生态系统功能评价提供重要参考^[11]。

闽江口鳔鱼滩湿地是闽江河口沙洲上发育的滨海河口湿地,是我国重要的湿地。2013 年被确定为国家级自然保护区,并建有闽江河口湿地生态系统国家定位观测研究站。自然保护区具有丰富的生物多样性,是南北候鸟迁徙歇息的重要通道。随着城镇化的快速发展及

其位置的特殊性,给闽江口湿地生态资源产生了巨大的威胁^[12],严重影响其作为“天然海绵”的功能。因此,对沿海滩涂湿地的生态重建和恢复已成为迫在眉睫的生态议题。越来越多的研究关注湿地区域生态重建,例如,黄河三角洲^[13]和三江平原沼泽湿地^[14]等。为此,本研究选择闽江口湿地常见的 5 种不同土地利用方式为研究对象,探讨土地利用变化及土地恢复对土壤酶生态化学计量特征的影响及主要的驱动因子,为揭示闽江口湿地土壤生态系统功能和结构提供基础数据,同时也为闽江口湿地土壤的可持续利用以及湿地环境的生态重建提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于闽江河口鳔鱼滩湿地(26°01'—26°03'N, 119°36'—119°38'E),地处福州市区东南部。该区域属典型的亚热带季风气候,具有暖热湿润的特点,年平均气温约 19.3 °C,年平均降水量 1 350 mm,降水主要集中在 3—9 月^[15]。该区域原生植物以芦苇为主,随着近几十年来城市化的发展,受人类活动的影响也越来越大,导致湿地生态功能退化。芦苇湿地主要位于滩间带,区域主要植被包括芦苇(*Phragmites australis*)生长茂密、少量短叶茭苳(*Cyperus malaccensis*)、扁穗莎草(*Cyperus compressus*)等;滩涂地位于潮间带,原为芦苇湿地,经人为强制去除地表芦苇后逐渐形成光滩;草地位于潮上带,芦苇生长带以上,受潮汐影响,由芦苇湿地慢慢退化为草地,间歇性受牛羊等干扰;农田位于堤岸内,为盐土脱盐形成的人工耕作土^[11],用于种植蔬菜,其他管理按常规进行;撂荒地处于堤坝内,不受潮汐影响,地上植物为灌草丛,生长繁茂,土层受人为扰动较小,地上生物量在死亡后,归还到该小区域生态系统。芦苇湿地、滩涂地和草地土壤类型为滨海盐土。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集于 2021 年 4 月,选取闽江口鳔鱼滩湿地包括芦苇湿地(LW)、滩涂地(TT)、草地(CD)、农田(NT)、撂荒地(LH)共 5 种不同土地利用类型。采样区域早期以芦苇湿地为主,后因人为干扰,形成不同土地利用类型^[11]。每种土地利用类型随机选择 3 个采样区,每个采样区大小为 5 m×5 m,去除表面植物后,用五点采样法采集 0—20 cm 表层土壤样品,共采集 15 份土壤样品,储存于冰盒中带回实验室。土壤样品去除

碎石、杂草、细根后用 2 mm 筛过筛。过筛后的土壤样品一部分放置于 4 °C 冰箱,用于酶活性等指标的测定,一部分风干过筛后用于理化指标的测定。

1.3 指标测定

土壤基本理化性质依据常规农业化学分析方法测定^[16],土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的测定为取新鲜土壤 5 g 于 50 mL 离心管中加入 25 mL 2 mol/L KCl 溶液,振荡 30 min 后浸提,连续流动分析仪(San⁺⁺ System, Skalar, Holland)测定。土壤 pH 和电导率(EC)的测定方法为取 5 g 风干土壤样品,加入 25 mL 去除 CO_2 的去离子水,振荡 30 min 后静置 1 h,使用 pH 计和电导率仪分别测定土壤 pH 和电导率。风干土样研磨过 100 目筛后利用碳氮元素分析仪(VarioMAX, Elementar, Germany)测定土壤总氮(TN)、总碳(TC)含量。土壤全磷(TP)含量测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HClO}_4$ 消煮,使用钼蓝比色法,酶标仪测定其在 880 nm 波长处吸光值并根据制定的磷标准曲线计算土壤全磷含量。土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 试剂,土水比为 1 : 10,振荡 30 min 后,使用定量滤纸过滤浸提,连续流动分析仪(San⁺⁺ System, Skalar, Holland)测定速效磷(AP)含量。可溶性有机碳(DOC)可溶性有机氮(DON)测定:取 10 g 新鲜土样,加入 40 mL 去离子水,25 °C 恒温振荡 30 min,离心后过 0.45 μm 滤头,使用岛津碳氮分析仪(TOC Vcph, Shimadzu, Kyoto Japan)和连续流动分析仪(San⁺⁺ System, Skalar, Holland)测定 DOC 和 DON 浓度。

土壤水解酶活性 β -葡萄糖苷酶(BG)、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶(NAG)、L-亮氨酸-氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(ACP)采用荧光底物法测定^[17]。简要步骤为:称取 2.75 g 鲜土于烧杯中并加入 91 mL 醋酸钠缓冲液,使用磁力搅拌器破碎摇匀 10 min,小心吸取 200 μL 上清液移入全黑不透明 96 孔板中,以甲基伞形酮(MUB)和甲基香豆素(MUC)分别制定不同梯度浓度标准曲线,并设置相应样品和以醋酸缓冲液代替样品上清液的阴性对照重复,最后在样品和阴性对照孔中加入 50 μL 相应水解酶的特定底物溶液,在室温黑暗条件下培养 4 h,使用酶标仪在 450 nm 波长处进行荧光读数,根据标准曲线计算酶活性,酶活性单位为 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

土壤微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)测定使用氯仿熏蒸法^[18]:在氯仿熏蒸前称取相同量的 2 份土壤样品于玻璃培养皿中,装有土壤样品的培养皿分别放入真空干燥器中,一份通过真空抽气使气态氯仿在土壤孔隙中扩散,另一份不做真空抽气处理,黑暗

条件下培养 24 h,培养后的土壤用土水比 1 : 4 的 0.5 mol/L K_2SO_4 试剂浸提,通过 0.45 μm 滤头过滤,采用岛津碳氮分析仪(TOC Vcph, Shimadzu, Kyoto Japan)和连续流动分析仪(San⁺⁺ System, Skalar, Holland)测定,熏蒸样品结果减去未熏蒸样品,再除以转换系数,其中微生物生物量碳的转换系数为 0.45,微生物生物量氮的转换系数为 0.54。

1.4 数据处理

土壤酶活性 C : N : P 比值计算为 $\ln(\text{BG}) : \ln(\text{NAG} + \text{LAP}) : \ln(\text{ACP})$,土壤酶活性生态化学计量比值矢量角度(Vector A)和矢量长度(Vector L)计算公式为^[9]:

$$X = \ln(\text{BG}) / \ln(\text{ACP}) \quad (1)$$

$$Y = \ln(\text{BG}) / \ln(\text{NAG} + \text{LAP}) \quad (2)$$

$$\text{Vector } L = \text{SQRT}(X^2 + Y^2) \quad (3)$$

$$\text{Vector } A = \text{DEGREES}(\text{ATAN2}(X, Y)) \quad (4)$$

式中:Vector L 为量化受到碳养分限制的程度;Vector A 表示受到氮磷养分限制程度的高低,当矢量角度 $> 45^\circ$ 时,表示受到磷限制,当矢量角度 $< 45^\circ$ 时,表示受到氮的限制。

使用 Excel 2019、SPSS 26 软件对获取的数据进行整理和单因素方差分析。使用 Origin 2021 和 R 语言 vegan 包进行绘图。采用 Canoco 5.0 软件对土壤酶活性和土壤性质进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和微生物生物量碳氮

闽江口不同土地利用方式下土壤理化性质结果见表 1。土壤理化性质在不同土地利用方式间差异显著。农田土壤 pH 显著高于其他土地利用方式($p < 0.05$),均值达到 7.52,而草地土壤显著低于其他土地利用方式。另外,农田土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著高于其他土地利用方式,而土壤总碳、氮和磷的含量撂荒地和芦苇湿地显著高于其他 3 种土地利用方式,且农田和草地土壤间无显著差异。土壤有效磷在不同土地利用方式间无显著差异。滩涂地电导率最高达 5.73 mS/cm,其次是芦苇,而农田和撂荒地显著低于其他土地利用方式。

不同土地利用方式下土壤 DOC、DON、MBC 和 MBN 计算结果(表 2)发现,芦苇、农田和撂荒地土壤 DOC 和 DON 含量显著高于滩涂和草地土壤,其中芦苇湿地土壤 DOC 的含量为 60.78 mg/kg,而滩涂地和草地土壤 DOC 的含量分别为 35.56, 27.85 mg/kg,比芦苇湿地分别降低 41% 和 54%。土壤 MBC 和 MBN 含

量在不同土地利用方式间变化趋势比较一致,即最高值在撂荒地,均值分别达 1 272.67,124.36 mg/kg,显著高于其他土地利用方式。

2.2 不同土地利用方式下土壤酶活性

由表 3 可知,土壤酸性磷酸酶(ACP)和 L—亮氨酸—氨基肽酶活性(LAP)2 种水解酶活性均在撂荒地最高分别达到 3 856.44,175.61 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。通

过单因素方差分析发现,撂荒地 ACP 和 LAP 酶活性显著高于其他几种土地利用方式,而芦苇湿地、滩涂地、草地和农田间没有显著差异。土壤 β —葡萄糖苷酶(BG)和 N—乙酰—氨基葡萄糖苷酶(NAG)在不同土地利用方式间变化趋势一致,即芦苇地和撂荒地土壤酶活性显著高于其他土地利用方式,而其他土地利用方式间无显著差异。

表 1 不同土地利用方式下土壤理化性质

土地利用方式	pH (H ₂ O)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	总磷/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	总碳/ (g · kg ⁻¹)	总氮/ (g · kg ⁻¹)	电导率/ (mS · cm ⁻¹)
芦苇(LW)	6.22±0.03b	4.11±0.69b	1.74±0.27b	0.59±0.01a	6.72±0.71a	26.10±0.25b	2.09±0.03b	4.53±0.41b
滩涂(TT)	6.33±0.09b	3.69±0.08b	1.83±0.35b	0.51±0.02b	5.89±0.76a	15.92±0.65c	1.30±0.03c	5.73±0.32a
草地(CD)	5.47±0.01c	2.49±0.33b	0.67±0.05b	0.38±0.04c	5.42±1.46a	11.92±1.62d	1.15±0.21c	1.99±0.32c
农田(NT)	7.52±0.18a	14.45±2.42a	6.84±1.13a	0.32±0.01c	5.67±1.61a	14.78±1.11cd	1.37±0.12c	0.31±0.19d
撂荒(LH)	6.45±0.15b	4.74±0.35b	1.51±0.47b	0.55±0.03ab	6.25±1.81a	38.72±0.87a	3.05±0.09a	0.29±0.04d

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 2 不同土地利用方式下微生物生物量碳氮和可溶性碳氮

单位:mg/kg

土地利用方式	微生物生物量碳	微生物生物量氮	可溶性有机碳	可溶性有机氮
LW	326.02±22.79b	42.58±6.64b	60.78±3.08a	41.29±1.16a
TT	131.29±27.43b	20.43±1.99b	35.56±3.24b	13.22±0.81b
CD	149.51±17.34b	20.61±4.56b	27.85±5.65b	6.39±0.43b
NT	232.94±18.02b	22.63±3.84b	74.18±4.10a	31.63±3.16a
LH	1272.67±275.53a	124.36±19.00a	73.89±7.71a	35.66±6.92a

表 3 不同土地利用方式下 4 种土壤酶活性

单位: $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$

土地利用方式	酸性磷酸酶	β —葡萄糖苷酶	N—乙酰—氨基葡萄糖苷酶	L—亮氨酸—氨基肽酶
LW	1529.94±636.92b	493.25±65.99a	403.43±37.39a	31.97±5.62b
TT	210.43±22.49b	78.44±4.21b	70.36±4.83b	10.31±2.44b
CD	245.22±45.40b	32.32±3.19b	24.46±2.11b	26.35±16.65b
NT	1229.49±619.24b	126.95±50.60b	185.22±67.85b	34.43±14.09b
LH	3856.44±589.73a	385.11±64.28a	433.29±113.13a	175.61±35.29a

2.3 不同土地利用方式下土壤酶生态化学计量比值和矢量特征

从表 4 可以看出,芦苇湿地和滩涂地酶 C:P 显著高于农田和撂荒地,而草地土壤最低,说明碳和磷是主要的限制因子。土壤酶 C:N 和 N:P 在不同土地利用方式间无显著差异($p>0.05$)。基于酶活性绝对值计量比值发现,大部分土壤落在 P 限制区域,也有部分交叉分布在 C 和 P 限制区域(图 1a)。

土壤酶活性矢量长度为 1.12~1.34,其中芦苇湿地(LW)显著高于草地(CD)和农田(NT)土壤($p<0.05$)。分析发现,所有土地利用方式下土壤胞外酶活性矢量角度均大于 45°,但不同土地利用方式间无显著差异($p>0.05$)。此外,不同土地利用方式下酶活性碳氮磷比值的平均值分别为 0.958,0.744,0.778,所有土壤胞外酶生态化学计量 C:N:P 总体上为 1:1.03:1.33。

表 4 不同土地利用方式下土壤酶生态化学计量比值和矢量特征

土地利用方式	N:P	C:P	C:N	矢量长度	矢量角度/(°)
LW	0.85±0.06a	0.87±0.03a	1.02±0.03a	1.34±0.01a	49.67±1.88a
TT	0.82±0.02a	0.82±0.02a	0.99±0.01a	1.29±0.02ab	50.61±0.84a
CD	0.69±0.04a	0.63±0.01c	0.92±0.05a	1.12±0.04b	55.30±1.46a
NT	0.76±0.08a	0.68±0.01bc	0.91±0.09a	1.14±0.07b	52.83±2.79a
LH	0.77±0.02a	0.72±0.01b	0.94±0.04a	1.18±0.04ab	52.45±0.79a

注:N:P、酶 C:P、酶 C:N 分别为 $\ln(\text{NAG}+\text{LAP}):\ln(\text{ACP})$ 、 $\ln(\text{BG}):\ln(\text{ACP})$ 、 $\ln(\text{BG}):\ln(\text{NAG}+\text{LAP})$ 。

2.4 土壤酶化学计量比与土壤性质的相关性

典范对应分析(CCA)表明,土壤性质对土壤酶活性变异的总累积解释率为 75.50%(图 1b),其中第 1 轴和第 2 轴分别解释变量的 48.25%和 22.77%。LH 和 NT 土壤酶活性组成和其他土壤利用方式沿第 1 排序轴分开。

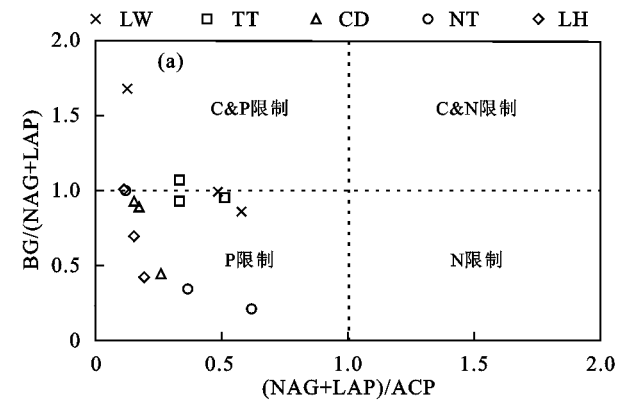


图 1 土壤酶化学计量比及与土壤性质的关系

相关分析表明,土壤酶活性与土壤碳氮含量紧密相关。由表 5 可知,在不同土地利用方式下,除 LAP 酶与 DON 没有显著相关,4 种酶活性与 DON、DOC、TC、TN、MBC 和 MBN 均呈显著正相关($p<0.05$)。

表 5 土壤酶活性与土壤性质的相关性

土壤酶	pH (H ₂ O)	铵态氮	硝态氮	总磷	有效磷	可溶性氮	可溶性碳	总碳	总氮	电导率	微生物 生物量碳	微生物 生物量氮
ACP	0.203	0.113	0.087	0.438	0.328	0.654 **	0.704 **	0.862 **	0.883 **	-0.513	0.846 **	0.823 **
BG	0.073	-0.085	-0.075	0.718 **	0.423	0.844 **	0.590 *	0.776 **	0.769 **	-0.012	0.564 *	0.590 *
NAG	0.125	0.056	0.056	0.608 *	0.456	0.847 **	0.729 **	0.825 **	0.825 **	-0.186	0.656 **	0.684 **
LAP	0.007	-0.076	-0.118	0.386	0.245	0.395	0.547 *	0.833 **	0.853 **	-0.527 *	0.834 **	0.855 **

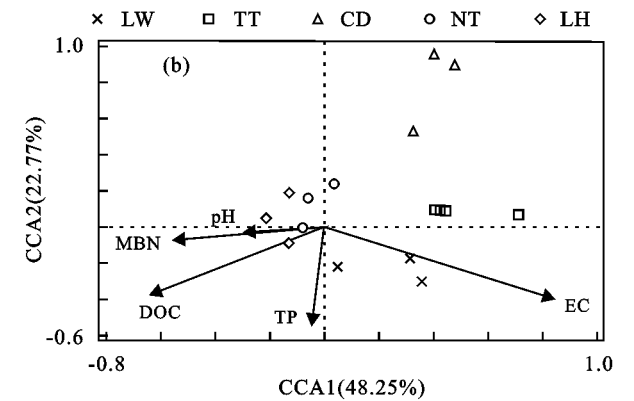
注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论

3.1 土地利用和恢复对土壤理化性质的影响

闽江口湿地是亚热带地区典型的海河口湿地,正受到因经济高速发展带来的负面影响,如湿地面积缩小、生态环境退化等问题。本研究发现,湿地土地利用方式的改变对土壤理化性质产生显著影响。芦苇湿地转变为滩涂后,由于海水入侵等因素,土壤 EC 值呈现升高趋势,对植物或土壤微生物生长产生胁迫,直接或间接影响湿地生态功能^[19]。而在其他土地利用方式土壤 EC 逐渐降低。可见,土地利用方式的变化及恢复有利于保持土壤较低的盐分水平,也有利于土壤微生物生长。本研究中,芦苇湿地转为其他土地利用后,土壤 pH 发生显著变化,其中农田土壤 pH 最高,主要原因为:一方面湿地土壤转化为旱地土壤,水盐梯度大幅度降低有利于土壤微团聚体的形成^[20],改善了通气环境;另一方面,土壤中含钙离子的增加促使土壤 pH 增加,这与三江平原湿地转化为

图 1(b)对土壤酶活性变化贡献显著的因子包括 EC($F=8.2, p=0.002$),DOC($F=4.4, p=0.014$),pH($F=3.0, p=0.042$),TP($F=2.2, p=0.082$),其贡献分别为 51.4%,21.6%,11.6%和 10.1%。从图 1 还可发现,EC 与 LW 和 TT 土壤酶活性呈显著正相关($p<0.05$)。



土壤 BG 和 NAG 酶活性与 TP 呈显著正相关($p<0.05$),而土壤 LAP 酶活性则与 EC 变化显著负相关。4 种土壤酶活性与 pH、AP、NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 之间相关性不显著($p>0.05$)。

农田土壤的结果^[21]一致。从表 1 可以看出,草地、滩涂和农田是芦苇湿地转化而成的土地利用方式,草地土壤除铵态氮和硝态氮之外,土壤 TC、TN、TP、AP 与农田土壤无显著差异,但均显著低于芦苇湿地和撂荒地,说明土地利用方式的变化对湿地土壤养分有显著的影响。研究还发现,农田土壤中 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 含量显著高于其他土地利用方式,这可能与外源农田氮肥的输入有关,进而提高土壤可利用性无机氮,而与土壤总碳氮磷含量的变化趋势不一致,后者从芦苇湿地到滩涂再到撂荒地呈现先降低后增加的趋势。原因可能是植被的恢复促进根系的生长和凋落物的输入,为土壤提供丰富的有机质,也显著提高土壤碳、氮、磷的累积,进而促进土壤微生物的生长和土壤酶活性。

3.2 不同土地利用方式对土壤微生物生物量碳氮和酶活性的影响

本研究中,撂荒地土壤微生物生物量碳氮含量最

高,可能是由于撂荒地植被丰富,微生物代谢强,根系生长状态适合,土壤输入大量有机物质,进而使土壤微生物生物量碳氮积累增多^[22]。而滩涂地微生物生物量碳氮含量较低的原因可能是滩涂地没有植被覆盖,加之由于潮水的淋洗,土壤长期受到水分胁迫,透气性较差,微生物活性较低。微生物生物量碳氮与酶活性显著相关,也说明微生物生物量碳氮可以用来指示土地利用方式变化导致的土壤生态功能变化^[22],是影响酶活性的显著影响因子。

土地利用方式的变化通过改变土壤性质、生物群落及土壤有机物质的输入和输出直接影响土壤酶活性^[23]。本研究中,在不同土地利用方式下,撂荒地 4 种酶活性均显著高于其他土地利用方式,出现这种情况是因为撂荒地与芦苇湿地等相比,土壤中的活性有机物增加,植物凋落物归还量和根系分泌物,它们作为土壤微生物养分来源,在一定程度上刺激土壤胞外酶的分泌^[24];另一方面,为了满足植物快速生长土壤微生物释放更多的养分需求。撂荒地 BG 酶活性与芦苇湿地无显著差异,但两者均显著高于其他 3 种土地利用方式,可能是撂荒地土壤碳的积累较高,对养分的需求不如芦苇湿地那么强烈,所以才没有产生更多的物质去获取养分。

在对数据进行对数转化后,本研究土壤酶活性生态化学计量比值 C : N : P 为 1 : 1.03 : 1.33,略高于全球生态系统 1 : 1 : 1^[25],表明该区域内不同土地利用方式下土壤都具有较高的 ACP 酶活性,该区域土壤磷相对缺乏,并且该区域内不同土地利用方式下土壤酶活性矢量角度都大于 45°,进一步表明该地区受到磷的限制,这可能是因为研究区土壤大多为酸性,磷元素易络合成不易被植物和微生物利用的形态,进一步加剧土壤磷元素的限制性。土壤酶活性碳氮比值被用来指示土壤微生物获取的碳,通常被用作土壤微生物相对资源分配的指标^[26],本研究中酶 C : N 比值的平均值为 0.958,小于 1,表明该区域土壤氮获取酶活性相对于碳获取酶活性较高,存在磷限制而碳匮乏的情况。

3.3 不同土地利用方式下土壤酶活性和酶生态计量与环境因子之间的关系

本研究指出,在不同土地利用方式下,土壤酶活性与 DOC、TC、TN、MBC 与 MBN 呈显著正相关关系,这与前人^[24]的研究一致,表明土壤酶是生态系统土壤养分循环的主要驱动者^[27],可直接或间接影响土壤微生物功能^[28]。LAP 酶与 EC 呈负相关关系,说明 EC 抑制土壤 LAP 酶活性,以往的研究^[29]也指

出,盐度是抑制土壤酶活性的主要因子。CCA 分析结果也进一步表明,EC 是影响土壤特别是芦苇和滩涂地酶活性的主要影响因子。

4 结论

(1)闽江口湿地不同土地利用方式间土壤理化性质差异显著,撂荒地土壤碳和氮含量与其他土地利用方式相比分别增长 48%~224%,45%~165%,与其他土地利用方式土壤相比,撂荒有利于土壤碳氮营养元素的累积和土壤质量的提升。

(2)水解酶在不同土地利用方式下呈现出类似的变化趋势,撂荒地 ACP、NAG 和 LAP 酶活性值最高,与芦苇湿地相比,ACP 和 LAP 分别增长 150%,449%,并且显著高于其他土地利用方式,进一步表明撂荒地土壤微生物活性更高,研究区酶计量矢量角度和酶计量比值进一步指出研究区存在磷限制和碳相对匮乏的现象。

(3)土壤 DOC、DON、TC、TN、MBC 和 MBN 是影响闽江口不同土地利用方式下土壤水解酶活性的主要驱动因子。

参考文献:

- [1] Sapkota Y, White J R. Long-term fate of rapidly eroding carbon stock soil profiles in coastal wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2021; e14913.
- [2] Geng X D, Zhou Y, Wang C Z, et al. Bacterial community structure and diversity in the soil of three different land use types in a coastal wetland[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18(6): 8131-8144.
- [3] Tan L S, Ge Z M, Zhou X H, et al. Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands, and peatlands increases greenhouse gas emissions: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1638-1653.
- [4] Xu C Y, Pu L J, Li J G, et al. Effect of reclamation on C, N, and P stoichiometry in soil and soil aggregates of a coastal wetland in eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1215-1225.
- [5] Sinsabaggh R L, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43(1): 313-343.
- [6] Dunn C, Jones T G, Girard A, et al. Methodologies for extracellular enzyme assays from wetland soils[J]. *Wetlands*, 2013, 34(1): 9-17.
- [7] Silva E D, de Medeiros E V, Duda G P, et al. Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region[J]. *Catena*, 2019, 172: 397-407.

- [8] Feng C, Ma Y H, Jin X, et al. Soil enzyme activities increase following restoration of degraded subtropical forests[J]. *Geoderma*, 2019, 351: 180-187.
- [9] 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.
- [10] Yang Y, Liang C, Wang Y Q, et al. Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects the shift from P- to N-limitation of microorganisms with grassland restoration [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 149: e107928.
- [11] 曾从盛, 全川, 孙志高, 等. 闽江河口湿地生物地球化学元素循环研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(3): 1-9.
- [12] Wang W, Sardans J, Zeng C, et al. Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in a subtropical tidal wetland[J]. *Geoderma*, 2014, 232/234: 459-470.
- [13] 刘盛林, 丁效东, 郑东峰, 等. 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[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 278-284.
- [14] 徐飞, 蔡体久, 杨雪, 等. 三江平原沼泽湿地垦殖及自然恢复对土壤细菌群落多样性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7412-7421.
- [15] Luo M, Huang J, Tong C, et al. Iron dynamics in a subtropical estuarine tidal marsh: Effect of season and vegetation[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 577: 1-15.
- [16] 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.
- [17] Bell C D, Fricks B E, Rocca J D, et al. High-throughput fluorometric measurement of potential soil extracellular enzyme activities[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2013, 81: e50961.
- [18] Li J, Sang C P, Yang J Y, et al. Stoichiometric imbalance and microbial community regulate microbial elements use efficiencies under nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: e108207.
- [19] Julkowska M M, Testerink C. Tuning plant signaling and growth to survive salt[J]. *Trends Plant Science*, 2015, 20(9): 586-594.
- [20] 王纯, 陈晓旋, 陈优阳, 等. 水盐梯度对闽江河口湿地土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(9): 3117-3125.
- [21] Chi G Y, Chen X, Shi Y, et al. Forms and profile distribution of soil Fe in the Sanjiang Plain of Northeast China as affected by land uses[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(4): 787-795.
- [22] 艾丽菲热, 王祥, 陈雪, 等. 4 种典型土地利用方式对山地草甸土壤微生物及酶活性特征的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2020, 43(1): 23-33.
- [23] Yu P J, Tang X G, Zhang A C, et al. Responses of soil specific enzyme activities to short-term land use conversions in a salt-affected region, northeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 939-945.
- [24] 孙彩丽, 王艺伟, 王从军, 等. 喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 4140-4149.
- [25] 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.
- [26] Mori T, Aoyagi R, Kitayama K, et al. Does the ratio of β -1, 4-glucosidase (BG) to β -1, 4-N-acetylglucosaminidase (NAG) indicate the relative resource allocation of soil microbes to C and N acquisition? [J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 160. DOI: <https://doi.org/10.1101/2021.02.08.430361>.
- [27] Zhang Q, Zhang D D, Wu J J, et al. Soil nitrogen-hydrolyzing enzyme activity and stoichiometry following a subtropical land use change[J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(15): 4277-4287.
- [28] Shahariar S, Helgason B, Soolanayakanakally R, et al. Soil enzyme activity as affected by land-use, salinity, and groundwater fluctuations in wetland soils of the prairie pothole region[J]. *Wetlands*, 2021, 41(2): 31-46.
- [29] Pan C C, Liu C A, Zhao H L, et al. Changes of soil physico-chemical properties and enzyme activities in relation to grassland salinization[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 13-19.