

张莹,刘 畅,宋 昂,等.基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究[J].中国岩溶,2016,35(1):11-18.
DOI:10.11932/karst20160103

基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤 理化性质与土壤酶活性关系研究

张莹^{1,2},刘 畅^{1,2},宋 昂²,靳振江¹,李 强²

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院,广西 桂林 541004;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:为揭示湿地退化过程中土壤理化性质与土壤酶活性关系,文章以广西桂林市会仙岩溶湿地系统中的湿地、稻田和旱地三种土地利用类型的表层土壤为研究对象,运用描述性分析、相关性分析和典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)等方法来探讨它们之间的内在联系。结果表明:土壤理化性质除有效磷、速效钾外,土壤有机碳、全氮、碱解氮、阳离子交换量、交换性钙、交换性镁的质量分数均表现为湿地>稻田>旱地,说明岩溶湿地在维持土壤碳库以及营养元素方面具有重要的作用。会仙湿地中有效磷、速效钾的质量分数低于稻田和旱地,根本原因在于人类活动以及农业活动的影响。除蛋白酶外,脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和纤维素酶的质量分数均在湿地中最高,与土壤理化性质的质量分数在湿地中较高相吻合,并表现出较强的空间异质性。进一步分析典范对应分析图,可知会仙岩溶湿地受人类活动影响较大,湿地首先被开垦为稻田,随着土壤自然肥力的下降最后被开垦成旱地,因此在生态演替不可逆转的条件下,将稻田作为人工湿地加以保护是维持湿地生态环境最佳的土地利用方式。

关键词:湿地;土壤有机碳;土地利用方式;土壤酶;典范对应分析

中图分类号:X142

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2016)01-0011-08

0 引 言

湿地作为陆地生态系统和水生生态系统之间过渡的土地类型,在涵养水源、调蓄洪水、调节气候、固碳、控制侵蚀、促进营养循环等方面具有重要的生态服务功能^[1],被人们称为“地球之肾”、物种贮存库、气候调节器^[2]。然而,随着人地矛盾加剧,人类活动对湿地影响很大,我国湿地面积日益减少,生态功能衰减^[3]。

湿地作为碳、氮的源、汇或转化器,不但在全球碳循环中起着重要作用,而且还能通过土壤理化性质反映土壤有机质水平和氮、磷等营养元素的可利用状

态^[4]。而土壤酶作为土壤的重要组成成分之一,在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面扮演着重要的角色^[5]。因此,过去国内外关于湿地的土壤学研究主要集中在湿地土壤碳、氮分布格局^[6]以及土壤酶在碳、氮循环过程中的作用^[7]。然而,关于土地利用退化状况和演变格局研究的报道较少,主要是因为缺乏关于土壤理化性质与酶活性等生物过程相关联的综合研究。此外,在研究方法上缺少研究对象与环境因子之间联系的直观结果。

会仙岩溶湿地作为目前发现的中低海拔岩溶地区最具有代表性、保存良好、广西最大的天然湿地^[8],

基金项目:广西科学研究与技术开发计划(桂科合-14123001-13)、广西自然科学基金(2015GXNSFGA139010 和 2014GXNSFCA118012) 和国家自然科学基金项目(41361054)

第一作者简介:张莹(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为环境科学与工程。E-mail: xingful21711@sina.com。

通讯作者:李强(1978-),男,博士,研究员,主要从事岩溶生物地球化学研究。E-mail: glqiangli@163.com。

收稿日期:2015-09-02

土地利用方式转变对湿地功能的影响资料尚缺乏。为此,本文利用典范对应分析等方法来研究会仙岩溶湿地的土壤性质与土壤酶活性的关系,阐明会仙岩溶湿地的土地利用退化状况和格局演变,以期会为会仙湿地的环境保护与合理利用提供科学依据。

1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于广西壮族自治区桂林市临桂县会仙镇,处于峰丛洼地和峰林平原交界地带,年平均降雨量为 1 915.2 mm,年平均蒸发量为 1 378.3 mm,年平均气温为 18 °C^[9]。会仙湿地建有岩溶生态与石漠化综合防治研究基地,是原始半干扰湿地,其稻田和旱地多年来主要施用无机肥,已施用超过 20 多年^[10]。原始土壤均属于水成土^[11]。由于长期以来会仙湿地的面积、土地利用类型和结构发生巨大改变,致使湿地功能衰退,为此国家林业局于 2012 年批准桂林会仙岩溶湿地建立国家湿地公园^[12]。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

2015 年 1 月于桂林会仙岩溶湿地采集了三种不同土地利用类型的土壤样品(代表性的湿地、稻田和旱地)。其中湿地土样 9 个(编号为 W1~W9),稻田土样 12 个(编号为 P1~P12),旱地土样 4 个(编号为 D1~D4)(图 1)。在每个样地采集 0~20 cm 的表层土壤,并将该样地周围相邻的三个等量样品均匀混合为一个土壤样品。

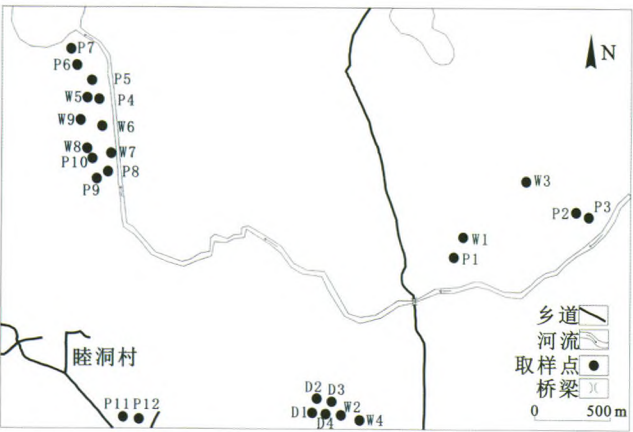


图 1 广西会仙湿地采样位置示意图
Fig.1 The sampling sites in Huixian wetland

将采集的样品带回实验室,去除植物根系和碎片

等侵入体,一部分过 2 mm 筛,放在 4 °C 冰箱保存,用于测定土壤酶活性;另一部分继续风干后,研磨过 0.15 mm 筛,用于测定土壤理化性质。

2.2 实验方法

土壤 pH 采用电位计法测定(水土比为 2.5 : 1)^[13];有机碳含量采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法测定;全氮含量采用浓硫酸消煮—凯氏定氮法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用盐酸—氟化铵法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提法测定;阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定;交换性钙和交换性镁采用乙酸铵交换—EDTA 络合滴定法测定^[14]。蔗糖酶活性和纤维素酶活性采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定;脲酶活性采用苯酚—次氯酸钠比色法测定;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;蛋白酶活性采用印三酮比色法测定^[15]。

2.3 数据处理

利用 SPSS 软件对数据进行描述性统计分析以及相关性分析。利用 canoco4.5 软件以土壤酶活性数据作为环境变量,土壤理化性质数据作为典范函数变量进行典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),探究土壤酶活性与土壤理化性质之间的动态关系^[16]。

3 结果与讨论

3.1 土壤理化性质和土壤酶活性的描述性分析

由表 1 可知,在三种土地利用方式下,土壤有机碳、全氮、碱解氮、土壤 pH 值阳离子交换量和交换性 Ca²⁺ 的质量分数均表现为湿地>稻田>旱地。这是因为在淹水环境下,厌氧微生物的呼吸作用能够造成还原条件下的土壤 pH 值升高,同时,还使土壤的碳矿化速率在厌氧条件下[C 0.11~0.17 mg/(g—SOC. d)]远低于好氧条件[C 0.2~0.5 mg/(g—SOC. d)]^[17],造成湿地有机碳的质量分数较高。而稻田受干湿交替影响,其土壤有机碳的质量分数介于湿地与旱地之间,以上研究结果与靳振江等^[10]关于会仙岩溶湿地有机碳质量分数较高的研究结果一致,说明稻田有利于维持湿地生态系统较高的土壤有机碳含量,旱地则导致土壤有机碳含量降低。淹水除造成湿地土壤有机碳矿化速率减缓外,还同步造成微生物参与的氮循环受阻,造成湿地中全氮、碱解氮的质

量分数较高,该研究结果与黄靖宇等^[18]关于三江平原天然沼泽湿地及湿地垦殖后的农田、弃耕还湿地、人工林地等的氮组分变化规律一致。土壤阳离子交换量由有机质的交换基与无机质的交换基构成,其大小主要取决于土壤有机质和土壤中粘土矿物的类型

与数量,与有机质含量有着显著的正相关关系^[19],因此湿地中的土壤阳离子交换量最高。土壤中的钾和磷主要来自土壤有机质的矿化以及施入土壤肥料中的速效成分,因此在人类生产活动的干预下旱地和稻田中有效钾和速效磷的质量分数较高。

表 1 土壤理化性质和酶活性的描述性分析
Table 1 Descriptive statistical analysis of soil physicochemical properties and enzyme activities

土地利 用类型		含量/g/kg		含量/mg/kg			pH (H ₂ O)	含量/mmol/kg			含量/mg/(g·24 h)				
		SOC	TN	AN	AP	AK		CEC	EC—Ca ²⁺	EC—Mg ²⁺	PRO	URE	CEL	SAC	ALP
湿地	均值	16.97	2.27	77.50	18.28	71.81	7.06	12.55	4.00	0.26	2.89	0.77	0.28	44.72	0.99
	标准差	4.94	1.34	49.13	29.59	38.88	0.74	4.70	1.46	0.10	1.73	0.45	0.35	40.28	0.81
	变异系数/%	29.10	59.12	63.39	161.92	54.13	10.50	37.44	36.59	37.84	59.78	58.69	125.41	90.07	81.94
稻田	均值	15.01	1.98	69.34	36.25	65.25	6.94	11.63	2.20	0.28	2.41	0.54	0.23	10.44	0.45
	标准差	3.16	0.56	12.17	33.50	26.08	0.42	3.06	1.22	0.08	1.56	0.13	0.10	7.70	0.25
	变异系数/%	21.08	28.21	17.55	92.39	39.96	6.06	26.32	55.41	29.77	64.88	24.05	45.91	73.75	55.08
旱地	均值	14.19	1.25	54.64	18.53	190.48	5.02	9.01	0.25	0.06	3.36	0.59	0.06	12.75	0.11
	标准差	2.80	0.14	8.26	24.64	32.97	0.10	1.02	0.10	0.03	1.31	0.09	0.04	6.49	0.03
	变异系数/%	19.77	11.01	15.12	133.00	17.31	2.05	11.30	42.61	57.85	39.06	14.95	61.13	50.88	23.21

注:SOC为土壤有机碳;TN为全氮;AN为碱解氮;AP为有效磷;AK为速效钾;CEC为阳离子交换量;EC-Ca²⁺为交换性Ca²⁺;EC-Mg²⁺为交换性Mg²⁺;PRO为蛋白酶;URE为脲酶;CEL为纤维素酶;SAC为蔗糖酶;ALP为碱性磷酸酶。

由表 1 可知,除蛋白酶外,脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和纤维素酶的质量分数均在湿地中最高,并与土壤理化性质的质量分数在湿地中较高相吻合,说明湿地退化能够造成土壤酶活性的降低^[20]。

变异系数是衡量各变量变异程度的统计量。变异系数≤10%时,表现为弱变异性;变异系数介于10%~100%之间表现为中等变异性;变异系数≥100%时表现为强变异性^[21]。在湿地中,除有效磷和纤维素酶表现为强变异性外,其他土壤因子均表现为中等变异性,有效磷的强变异性与含磷的生活污水、畜牧废水以及耕地肥料排放到湿地水域中有关,蔡德所^[8]等在调查会仙岩溶湿地生态环境时,发现大量没有经过处理的生活污水、畜牧废水直接排放到河道中。在稻田中,所有土壤因子均表现为中等变异性,这与稻田长期处于淹水状态,各种土壤因子呈现出均一化的现象有关;而在旱地中,除有效磷表现为强变异性以及 pH 值表现为弱变异性外,其他土壤因子均表现为中等变异性。旱地土壤 pH 值表现为弱变异性

的根本原因在于岩溶区土壤有机碳含量远远高于非岩溶区,当有机质含量高时,土壤具有良好的团粒结构,有效水含量高,土壤 pH 值稳定^[22],加之钙对有机碳具有稳定作用^[23],造成土壤 pH 值呈现出弱变异性。

3.2 土壤理化性质与土壤酶活性之间的相关性分析

水分变化引起土壤酶活性的变化,导致物质循环转化强度改变,并造成土壤有机碳含量发生相应的改变^[24]。由表 2 可知,脲酶与土壤有机碳呈极显著负相关($R=-0.532, P<0.01$),与 TN 呈显著正相关($R=0.503, P<0.05$);蛋白酶与土壤有机碳呈显著负相关($R=-0.416, P<0.05$);纤维素酶与 TN、AN、呈极显著正相关(R 分别为 0.697、0.569, $P<0.01$),与 AP 呈显著正相关($R=-0.491, P<0.05$);蔗糖酶与 TN、AN 呈极显著正相关(R 分别为 0.706、0.635, $P<0.01$);碱性磷酸酶与土壤有机碳呈显著负相关($R=-0.416, P<0.05$),与 TN 呈极显著正相关($R=0.547, P<0.01$)。以往研究表明:全国大部分地区的土壤脲酶活性与有机碳、全氮等指

标均呈显著正相关。但本研究结果与同在岩溶地区的兰雪^[25]、刘淑娟等^[26]的研究结果相一致。脲酶活性与土壤有机碳呈极显著负相关、与全氮呈正相关,其根本原因在于岩溶地区的土壤全氮含量远高于其他地区,而全氮含量过高时会抑制脲酶的分泌,土壤中的氮不再是作物生长的限制因子^[26]。碱性磷酸酶与土壤有机碳呈显著负相关,这是因为湿地系统中的土壤水分含量较高,进而抑制了土壤酶活性,增加了土壤有机碳含量。

土壤氮素是调节土壤微生物竞争关系的一个主要因素,通过影响微生物的活动而影响土壤酶活性,并成为影响酶活性的一个重要因素。然而有关氮素对酶活性影响的研究尚未有一致结论。徐广平等^[27]在桂西南岩溶山地调查不同土地利用方式对土壤酶活性的影响时,发现脲酶、碱性磷酸酶等大多数酶均与土壤全氮

呈显著正相关,该研究结果与本文一致。

尽管不同酶活性在土壤中参与的生化反应过程不同,但土壤酶活性能够表征这些养分的循环状况。大量研究表明,有效磷是影响酶活性的主要因子,与土壤酶活性呈显著和极显著正相关,因此纤维素酶和蔗糖酶与碱解氮呈极显著正相关(R 分别为 0.569、0.635, $P<0.01$),纤维素酶与有效磷呈显著正相关($R=0.491$, $P<0.05$)。土壤微生物是土壤酶的主要来源,而土壤 pH 值控制微生物群落组成的多样性,且通过影响氨基酸官能团的变化而影响土壤酶的活性。尽管不同地区土壤 pH 值对不同种类酶活性的影响程度不同,但该区土壤 pH 值与碱性磷酸酶活性呈显著性正相关($R=0.498$, $P<0.05$),并与 Dick 等^[28]的研究结果一致。

表 2 土壤理化性质和酶活性之间的相关性分析

Table 2 Analysis of the correlation between soil physicochemical properties and enzyme activities

	SOC	TN	AN	AP	AK	pH	CEC	EC-Ca ²⁺	EC-Mg ²⁺	PRO	URE	CEL	SAC
TN	-0.38												
AN	-0.296	0.921 * *											
AP	-0.395	0.573 * *	0.458 *										
AK	-0.287	-0.043	0.025	0.088									
pH	-0.055	0.109	-0.074	0.126	-0.714 * *								
CEC	-0.37	0.784 * *	0.687 * *	0.544 * *	0.018	0.244							
EC-Ca ²⁺	-0.12	0.584 * *	0.381	0.396	-0.233	0.610 * *	0.679 * *						
EC-Mg ²⁺	0.105	0.428 *	0.438 *	0.299	-0.503 *	0.467 *	0.331	0.396 *					
PRO	-0.416 *	0.72	-0.017	0.177	0.067	0.11	0.143	0.104	-0.191				
URE	-0.532 * *	0.503 *	0.379	0.192	0.029	0.25	0.538 * *	0.526 * *	-0.137	0.541 * *			
CEL	-0.344	0.697 * *	0.569 * *	0.491 *	-0.122	0.19	0.608 * *	0.589 * *	0.225	0.305	0.713 * *		
SAC	-0.133	0.706 * *	0.635 * *	0.331	0.168	0.026	0.699 * *	0.685 * *	0.306	0.025	0.481 *	0.558 * *	
ALP	-0.416 *	0.547 * *	0.361	0.182	-0.223	0.498 *	0.611 * *	0.743 * *	0.074	0.444 *	0.906 * *	0.721 * *	0.552 * *

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关; * * 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

阳离子交换量是土壤有机碳与全氮积累的主要控制因子,因此土壤酶在参与土壤碳-氮循环过程中也与阳离子交换量发生联系。米彩红等^[29]在研究黄土丘陵区凋落物对土壤性质极化的影响时,发现阳离子交换量与土壤酶的通径系数较小,即阳离子交换量

与土壤酶的相关性不强,而本文研究发现阳离子交换量与脲酶、纤维素酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶等存在极显著正相关关系(R 分别为 0.538、0.608、0.699、0.611, $P<0.01$),原因在于该区碳、氮含量较高,土壤中的碳、氮不再成为环境中的限制因子,且阳离子

交换量是保证土壤溶液成分的多样性和土壤溶液的“生理平衡”的主要因素^[30]。此外,章程等^[31]在调查该区的水化学性质时,认为该区的水化学类型为Ca—HCO₃⁻,因此受该区岩性影响,其土壤中的交换性钙的质量分数也较高,交换性钙也与脲酶、纤维素酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶等存在极显著正相关关系(R 分别为0.526、0.589、0.685、0.743, $P<0.01$)。

鉴于纤维素酶和蔗糖酶参与土壤有机碳累积与分解转化过程,脲酶和蛋白酶参与土壤氮循环过程,碱性磷酸酶参与土壤磷循环过程^[32],会仙岩溶湿地研究区中的蛋白酶、脲酶、纤维素酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶彼此之间呈显著或极显著正相关关系,这主要是因为他们在进行酶促反应时,既有专一性,又存在共性,进而反映了会仙岩溶湿地土壤中碳—氮—磷循环过程的相互联系,该研究结果与徐广平等^[27]、杨宁等^[33]的研究结果一致。

3.3 土壤理化性质与土壤酶之间的典范对应分析

CCA 分析作为一种非线性多元直接梯度分析方法,能够直观地将研究对象排序和环境因子排序表示在一个图上,并反映出各变量之间的关系^[34-35]。在 CCA 图上,箭头连线的长度代表着某个因子作用的大小,因而连线越长,影响越大;而两个箭头连线之间的夹角代表着两个因子之间的相关性,夹角越大,相关性越小^[36-37]。

根据 CCA 排序轴比例计算结果,CCA 图能够将各采样点土壤酶变化趋势反映出来^[34]。根据不同大小的圈点来表示每个样方中酶活性的高低,试值(酶活性的测试值)越高则圈点越大,由图 2 可知,该区脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和纤维素酶的空间格局变化较大,蛋白酶的空间格局变化较小。土壤酶变化趋势图与表 1 中的蛋白酶具有弱变异系数,而脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和纤维素酶具有中等及以上的变异系数相吻合,从而说明土壤酶是土壤学研究中的关键因子。

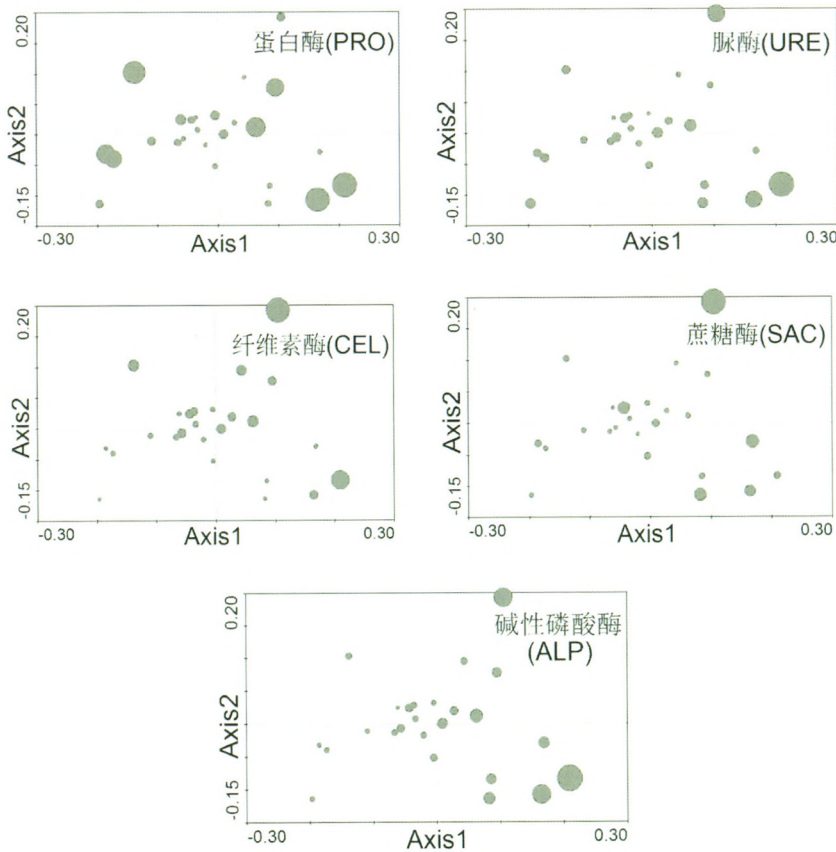


图 2 土壤酶活性的 CCA 排序轴特征

Fig. 2 The characters of ordination diagram based on CCA

研究区的土壤理化性质和土壤酶活性变化在 CCA 第一、第二排序轴平面上的结果可以分为四个象限,即纤维素酶、蔗糖酶、交换性钙镁以及总氮、土壤有机碳位于第一象限,直接表明岩溶湿地系统参与碳循环过程的土壤酶具有较高的代谢底物以及氮不再是作物生长的限制因子;碱解氮、有效磷、速效钾分别位于第二、三象限说明人类活动影响了旱地和稻田中的氮、钾和磷的速效部分;pH 值、阳离子交换量、蛋白酶、碱性磷酸酶和脲酶位于第四象限说明其对土壤有机碳的积累具有负反馈效应,进而验证了蛋白酶、碱性磷酸酶、脲酶与土壤呈显著负相关关系,而 pH 值、阳离子交换量与土壤负相关关系不显著(表 2,图 3)。此外,在本研究中,蛋白酶的箭头连线最短,纤维素酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和脲酶的箭头连线较长,说明纤维素酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和脲酶是参与土壤碳—氮—磷循环过程的关键酶(图 3)。脲酶和碱性磷酸酶的夹角最小,并且它们之间的相关系数在全部土壤酶中最高;蔗糖酶和纤维素酶位于第一象限,说明农业活动已经改变了原生湿地系统中的氮、磷自然循环规律,导致土壤中的有效磷和全氮、碱解氮呈极显著和显著正相关关系。

旱地。汪良奇等在会仙开展古环境研究时发现,自 1922 年以来,人类活动对湿地的干扰较强烈,部分湿地被开垦成农田^[38]。尽管稻田作为耕地,其施用的化肥会对岩溶地下水水质产生影响,播种收获时对稻田土壤的翻动也会影响土壤有机碳分解^[39],但相对旱地而言,稻田土壤具有较强的有机碳存储功能^[40]。因此稻田作为人工湿地^[41],在一定程度上具有湿地的特征,因此在人类活动干扰下,当退化的湿地不能恢复时,尽可能将土地利用类型维持在稻田状态具有重要的生态意义。为此,2011 年 10 月,苏州市政府在全国率先将百万亩水田也纳入湿地保护范围^[42],该结果表明,稻田兼有粮食生产和湿地生态双重功能在得到学术界的承认之后,已经上升到了加以立法保护的层面。当前,桂林会仙湿地也已经被列入国家湿地公园试点进行保护^[12]。在这个保护规划中,也需要把稻田作为一种湿地类型加以保留和保护,这不但符合我国保障国家粮食安全与减缓全球气候变化双重挑战的迫切需要,而且还对岩溶区地下水调节、促进碳固定具有重要的意义。

4 结 论

(1)在会仙岩溶湿地的三种土地利用类型当中,土壤有机碳的质量分数为湿地>稻田>旱地,故在这三种土地利用方式中,湿地有较高的碳储功能,同时稻田也具有类似的功能。

(2)由 CCA 分析可以看出,会仙岩溶湿地受人类活动影响,湿地首先被开垦成稻田,随着土壤自然肥力的下降,最后被开垦成旱地。

(3)在生态演替不可逆的条件下,将稻田作为人工湿地加以保护是维持湿地生态环境最佳的土地利用方式。

参考文献

[1] Ghermandi A, van den Bergh JCJM, Brander LM, et al. Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): 137–139.

[2] 郭占平. 辽河干流生态综合治理模式及示范应用[J]. 水利发展研究, 2015, 15(5): 35–38, 42.

[3] 安娜, 高乃云, 刘长娥. 中国湿地的退化原因、评价及保护[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 821–828.

[4] 曹萍麟, 陆梅, 田昆, 等. 纳帕海高原湿地不同干扰强度下土壤真

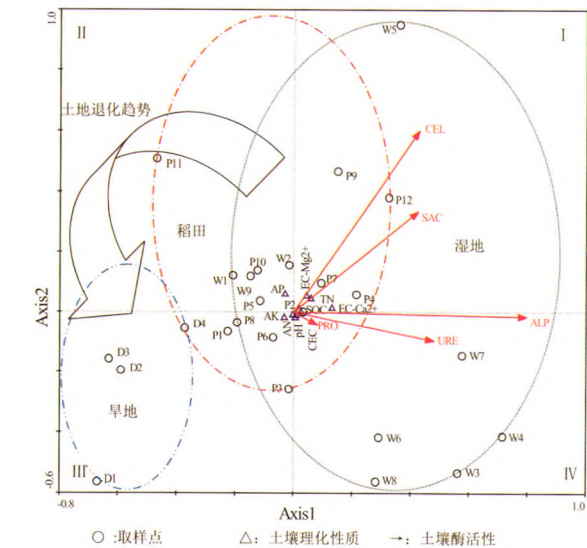


图 3 会仙湿地土壤性质与土壤酶活性的 CCA 二维排序图
Fig. 3 CCA biplot of soil physicochemical properties and enzyme activities in Huixian wetland

由图 3 可知,研究区中的土壤因子和土壤酶分析结果集中分布在湿地和稻田取样区,因此 CCA biplot 直观呈现出该区土地退化趋势为:湿地首先被开垦成稻田,随着土壤肥力的下降,再逐渐被开垦成为

- 菌的分布格局[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1166—1173.
- [5] 刘庆新, 吴发启, 刘海斌, 等. 纸坊沟流域土壤酶活性与土壤肥力关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1100—1106.
- [6] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口滨岸潮滩湿地土壤碳、氮的空间分异特征[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1521—1529.
- [7] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原4种典型湿地土壤碳氮分布差异和微生物特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2847—2854.
- [8] 蔡德所. 会仙岩溶湿地生态系统研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [9] 吴华英, 覃星铭, 蒋忠诚, 等. 桂林会仙岩溶作用对石灰土壤水锌离子浓度的影响[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(6): 761—765.
- [10] 靳振江, 程亚平, 李强, 等. 会仙喀斯特溶洞湿地、稻田和旱田土壤有机碳含量及其与养分的关系[J]. 湿地科学, 2014, 12(4): 485—490.
- [11] 张维理, 徐爱国, 张认连, 等. 土壤分类研究回顾与中国土壤分类系统的修编[J]. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3214—3230.
- [12] 桂林会仙湿地被列入国家湿地公园试点[EB/OL]. [2012-04-09]. <http://www.guilin.gov.cn/news/xqdt/2012/04/0903.htm>.
- [13] 毕桂英, 马新民. 影响石灰性土壤pH值测定因素的探讨[J]. 水土保持通报, 1998, 18(7): 24—27.
- [14] 鲁如坤. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 275—276, 294—296, 310—312.
- [16] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 157—164.
- [17] Sun Lina, Chen Su, Chao Lei, et al. Effects of Flooding on Changes in Eh, pH and Speciation of Cadmium and Lead in Contaminated Soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79(5): 514—518.
- [18] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1380—1387.
- [19] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(S1): 24—29.
- [20] 王笛, 马风云, 姚秀粉, 等. 黄河三角洲退化湿地土壤养分、微生物与土壤酶特性及其关系分析[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 94—98.
- [21] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [22] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37—44.
- [23] 陈家瑞, 曹建华, 梁毅, 等. 石灰土发育过程中土壤腐殖质组成及其与土壤钙赋存形态关系[J]. 中国岩溶, 2012, 31(1): 7—11.
- [24] 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 等. 毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5980—5986.
- [25] 兰雪, 戴全厚, 喻理飞, 等. 喀斯特退化森林不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(5): 620—624.
- [26] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5789—5796.
- [27] 徐广平, 顾大形, 孙英杰, 等. 不同土地利用方式对桂西南岩溶山地土壤酶活性的影响[J]. 广西植物, 2014, 34(4): 460—466.
- [28] Dick WA, Cheng L, Wang P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(13): 1915—1919.
- [29] 米彩红, 刘增文, 李茜, 黄土丘陵区3种典型人工阔叶纯林枯落物分解对土壤性质极化的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 120—126.
- [30] 王启兰, 王溪, 王长庭, 等. 高寒矮嵩草草甸土壤酶活性与土壤性质关系的研究[J]. 中国草地学报, 2010, 32(3): 51—56.
- [31] 章程, 谢运球, 宁良丹, 等. 桂林会仙岩溶湿地典型水生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 特征与固碳量估算[J]. 中国岩溶, 2013, 32(3): 247—252.
- [32] 李强, 胡清菁, 张超兰, 等. 基于土壤酶总体活性评价铅锌尾矿砂坝区土壤重金属污染[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1839—1844.
- [33] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 575—580.
- [34] 曹彤, 江源, 宋阳, 等. 陕北种植业土地利用与农业投入关系的典范对应分析[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 56—62.
- [35] 岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤—环境关系研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1400—1405.
- [36] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5): 1167—1179.
- [37] Mench M, Bes C. Assessment of ecotoxicity of topsoils from a wood treatment site[J]. Pedosphere, 2009, 19(2): 143—155.
- [38] 汪良奇, 张强, 萧良坚, 等. 基于湖积物硅藻与地球化学记录的古环境变迁反演: 以桂林会仙岩溶湿地为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(2): 129—135.
- [39] 丁长欢, 慈恩, 邵景安, 等. 近30年黔西喀斯特区典型县域农田土壤有机碳动态研究: 以贵州普定县为例[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 281—291.
- [40] 方芳, 靳振江, 李强, 等. 岩溶区与非岩溶区土壤有机碳、养分及特征元素对比研究[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 已接收.
- [41] 徐琪. 湿地农田生态系统的特点及其调节[J]. 生态学杂志, 1989, 8(3): 8—13, 23.
- [42] 邱峰. 百万亩水稻田纳入湿地保护[EB/OL]. [2011-10-28] <http://www.nb.suzhou.gov.cn/newsview.asp?id=1359>.

Relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities in Huixian karst wetland system based on Canonical Correspondence Analysis

ZHANG Ying^{1,2}, LIU Chang^{1,2}, SONG Ang², JIN Zhen-jiang¹, LI Qiang²

(1. Environmental Science and Engineering College, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Wetland as an important ecological system plays an important role in regulating water and climate change, which was affected by human activities. Therefore, wetland degradation becomes a global phenomenon and the focus of many scientists. Huixian karst wetland system has the research base for comprehensive control of karst ecology and rocky desertification, belonging to original semi-disturbed wetland where in the past 20 years fertilizers have been applied to paddy field and dry land. In order to reveal the relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities in Huixian karst wetland system, soil samples from three kinds of lands (wetland, paddy field and dry land) were collected. To gain a better understanding of the impact from the human and agricultural activities on the karst wetland system, a suitable evaluation method based on descriptive analysis, correlation analysis and canonical correspondence analysis (CCA) was employed. The highest content of soil organic carbon, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, cation exchange capacity, exchangeable calcium and exchangeable magnesium appears in the wetland, followed by the paddy field and dry land, respectively; the lowest content of available phosphorus and potassium occurs in the wetland. Therefore, the karst wetland system has an important function in the maintenance of soil carbon sink and nutrition cycle. The content of available phosphorus and potassium in wetland was lower than those in the paddy field and dry land, which was affected by human and agricultural activities. The concentrations of urease, invertase, alkaline phosphatase and cellulose are also quite high in the wetland and show a strong spatial heterogeneity. By analyzing soil factors and soil enzymes confined to wetland and paddy field of the study area, the CCA biplot shows a trend of land degradation in this area, from which it can be seen that the wetland is influenced by human activities. Wetland was first cultivated as paddy field, later it was eventually reclaimed into dry land with the decline of soil natural fertility. Therefore, among these three types of lands, the wetland has a high carbon storage function, while the paddy field has the similar one. If the ecological succession is irreversible, the best way to maintain the ecological environment of wetland system is to protect paddy field as constructed wetland. It is also important to regulate and promote carbon sequestration in karst area.

Key words wetland, soil organic carbon, land use pattern, soil enzyme, canonical correspondence analysis

(编辑 黄晨晖)