

唐 贤, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 774-782.

TANG Xian, CAI Ze-jiang, XU Ming-gang, et al. Research on buffering capacity and acidification rate of paddy soil profiles in Yujiang County[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 774-782.

余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率

唐 贤^{1,2,3}, 蔡泽江^{1,4}, 徐明岗^{1,4*}, 文石林^{1,4}, 高 强^{3*}, 姚 晨⁵, 陈玲英⁵

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 3. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 4. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182; 5. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434023)

摘 要:为探明不同母质发育的水稻土在剖面层次上的缓冲性能特征及酸化速率大小,以红砂岩和河流冲积物母质发育的水稻土为对象,测定不同层次(0~20、20~40、40~60、60~80 cm和80~100 cm)土壤的pH、有机质、全氮、阳离子交换量和酸碱缓冲容量,定量比较不同母质和不同土层酸碱缓冲容量的变化及差异。结果表明:以红砂岩和河流冲积物母质发育的水稻土酸碱缓冲容量在0~20 cm土层比80~100 cm土层分别显著升高10.14 mmol·kg⁻¹和4.18 mmol·kg⁻¹,且随着水稻土初始pH(不加酸碱的pH)的增加,其酸碱缓冲容量也呈增加趋势。在0~20 cm土层,红砂岩母质发育的水稻土酸碱缓冲容量比河流冲积物母质显著增加7.38 mmol·kg⁻¹;在20~100 cm土层,2种母质发育的水稻土酸碱缓冲容量无显著差异。红砂岩母质发育水稻土表层酸化速率(0.78 kmol H⁺·hm⁻²·a⁻¹)大于河流冲积物母质(0.36 kmol H⁺·hm⁻²·a⁻¹)。水稻土酸碱缓冲容量与pH呈极显著负相关($P<0.01$),与交换性盐基总量呈显著负相关($P<0.05$),与阳离子交换量、有机质、全氮和交换性酸呈极显著正相关($P<0.01$);水稻土pH与有机质、全氮和交换性酸呈极显著负相关,与交换性盐基总量呈极显著正相关($P<0.01$),与阳离子交换量无相关性。研究表明,酸碱缓冲曲线可以很好地反映不同母质发育的水稻土在不同土层上对加酸、加碱量的敏感程度;随着土层深度的增加,2种母质的酸碱缓冲容量呈下降趋势,其中在0~20 cm土层,红砂岩母质发育的水稻土酸碱缓冲容量和酸化速率最高,其酸碱缓冲容量主要与初始pH、有机质、全氮、阳离子交换量、交换性盐基总量和交换性酸有关,且2种母质发育水稻土均处于铝硅酸盐矿物分解和交换性盐基离子缓冲阶段。

关键词:水稻土;剖面;缓冲容量;缓冲阶段;酸化速率

中图分类号:S153

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)06-0774-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0220

Research on buffering capacity and acidification rate of paddy soil profiles in Yujiang County

TANG Xian^{1,2,3}, CAI Ze-jiang^{1,4}, XU Ming-gang^{1,4*}, WEN Shi-lin^{1,4}, GAO Qiang^{3*}, YAO Chen⁵, CHEN Ling-ying⁵

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 4. Red Soil Experimental Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences in Hengyang/National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, China; 5. School of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: To explore paddy soil acid buffering capacity and acidification rate characteristics, the study analyzed paddy soil pH, organic matter, total nitrogen, cation exchange capacity and acid buffering capacity of different depths (0~20, 20~40, 40~60, 60~80 cm and 80~

收稿日期:2018-09-03 录用日期:2018-10-30

作者简介:唐 贤(1992—),男,安徽滁州人,博士研究生,从事土壤酸化改良研究。E-mail:18910711250@163.com

*通信作者:徐明岗 E-mail:xuminggang@caas.cn;高 强 E-mail:gyt199962@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41701338);中国热带农业科学院基本科研业务费专项(1630062018005)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41701338); Special Fund Project of Basic Scientific Research of Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences(1630062018005)

100 cm) derived from red sandstone and river alluvial parent material, quantitatively compared the changes and differences of acid buffer capacity in different soil parent materials and depths. The results showed that paddy soil acid buffering capacity increased by 4.18~10.14 mmol·kg⁻¹ at the 0~20 cm than 80~100 cm soil layer, and it increased with the increasing of initial pH (pH without acid or alkali addition). At the 0~20 cm, paddy soil acid buffering capacity derived from red sandstone parent material significantly increased by 7.38 mmol·kg⁻¹ than that from river alluvium. At 20~100 cm, there were no significant difference between acid buffering capacity of paddy soil derived from two parent materials. Paddy soil acidification rate (0.78 kmol H⁺·hm⁻²·a⁻¹) at topsoil derived from red sandstone was greater than that from river alluvium (0.36 kmol H⁺·hm⁻²·a⁻¹). Paddy soil acid buffering capacity derived from two parent materials was significantly negatively correlated with pH, total exchangeable base ($P<0.05$), positively correlated with cation exchange capacity, organic matter, total nitrogen and exchangeable acid ($P<0.01$); Paddy soil pH was significantly negatively correlated with organic matter, total nitrogen and exchangeable acid, positively correlated with total exchangeable base ($P<0.01$), and not correlated with the cation exchange capacity ($P>0.05$). The results showed, the acid buffer curve could reflect the sensitivity of paddy soil derived from different parent materials on the amount of acid and alkali addition in different soil layers; With the increase of soil depth, paddy soil acid buffering capacities derived from two parent materials were on the decline, and at 0~20 cm, paddy soil acid buffering capacity and acidification rate derived from red sandstone parent material was highest, and its acid buffering capacity was mainly related to initial pH, organic matter, total nitrogen, cation exchange capacity, total exchangeable base and exchangeable acid; Paddy soil derived from two parent materials were mainly in the buffering phase of aluminosilicate mineral decomposition and exchange base ion.

Keywords: paddy soil; profile; acidity buffering capacity; buffering phase; acidification rate

南方地区是我国水稻土的主要分布区之一,在国家粮食生产中有重要的地位^[1]。水稻土是各种起源母土或其他母质经过平整造田、淹水种植水稻,进行周期性灌溉排水、施肥、耕作下逐步形成的,一般来说,水稻土经常处于淹水还原以及周期性的干湿交替和氧化还原交替条件下,形成了特殊的酸碱缓冲体系,随着水稻种植时间的增加,水稻土酸碱度逐渐向中性方向发展^[2]。而土壤酸碱缓冲容量是评价土壤抵抗酸、碱化能力的重要指标^[3],缓冲容量越大,土壤对外界酸沉降反映出的缓冲能力越强,土壤酸碱环境条件越稳定^[4],同时,不同母质类型的土壤酸碱缓冲能力也不同。因此,研究不同母质发育水稻土的酸碱度以及酸碱缓冲容量,同时揭示影响酸碱缓冲容量的因素,可为土壤酸化趋势及预测提供科学依据,对实现区域农业可持续发展具有重要意义。

土壤缓冲容量是指单位质量的土壤pH增加或降低1个单位所需酸或碱的量,是表示土壤缓冲性能的指标^[5],其主要影响因素除土壤的基础pH、阳离子交换量和有机质等土壤性质指标外,还要包括土壤成土母质,由于研究条件差异,各研究的影响程度不同^[6-7]。刘伟等^[8]研究吉林省长春市土壤酸缓冲性强弱结果为黑钙土>草甸土>黑土>白浆土>暗棕壤。韩春爽等^[9]的研究结果表明盐碱土酸缓冲容量与有机质之间呈负相关关系,与pH和阳离子交换量均呈正相关关系,但与廖柏寒等^[10]和王楠等^[11]研究结果不一

致,由此说明不同类型的土壤酸碱缓冲性能具有差异,其影响因素也不同。同时,针对土壤表层的酸碱缓冲性能的研究较多,如Aitken等^[12]采用酸碱滴定法研究了澳大利亚100多种酸性土壤,结果发现在pH 4.0~7.0范围内土壤pH与酸碱加入量之间呈线性相关,且土壤在该pH范围内的pH缓冲容量就是滴定曲线的斜率。姜军等^[13]采用类似的方法对我国酸性红壤pH缓冲容量进行测定,结果表明pH在4.0~6.0范围内土壤pH与酸碱加入量之间呈线性相关。

近年来,随着我国能源工业的高速发展和化石燃料消耗的不断增长,酸沉降逐渐增加^[14],另外高投入下的农业生产,尤其是铵态氮肥的过量施用和不合理的田间管理等都是造成土壤潜在酸化的重要原因^[15]。长期肥料试验地的相关研究也表明,肥料施用和作物收获都会产生不同程度的土壤酸化效应^[16],然而关于水稻土可持续利用的重要指标——酸碱缓冲能力和酸化速率的研究目前却较少。

当前,对酸碱缓冲性能的研究多为旱地红壤,且集中在土壤表层,针对水稻土的酸碱缓冲性能和酸化速率研究不够深入与系统。本研究采集余江县2种母质类型(红砂岩和河流冲积物)发育的水稻土,通过测定不同层次土壤的pH、酸碱缓冲容量以及阳离子交换量、有机质等土壤性质指标,比较不同土层酸碱缓冲性能的特征与差异,并分析影响酸碱缓冲容量的土壤性质因素,同时计算水稻土酸化速率,量化和揭示水稻土剖面的酸化特征,为缓解和改良酸化土壤

提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省鹰潭市余江县(28°04′~28°37′ N、116°41′~117°09′ E),该地区年平均温度17.6℃,年降水量1757.9 mm,年平均日照1777.6 h,年日照百分率为41%,无霜期270 d左右,属于亚热带湿润季风气候,主要种植作物是双季稻,土壤类型主要为红砂岩(占全县总面积57%)、河流冲积物(占全县总面积20%)母质发育的红壤性水稻土。在全县范

围内采集母质分别为红砂岩和河流冲积物的典型剖面4个和6个,采样点基本概况见表1。

1.2 样品采集

采用网格布点法(2 km×2 km)在余江县内进行取样,在每一点位所在的水田样地随机选取3个点位,用土钻进行样品采集,取样层次分别为0~20、20~40、40~60、60~80 cm和80~100 cm共5个土层,同一土层深度3个样品混合均匀后,按照四分法分取1 kg土样,分拣出石砾、根系等杂物,磨细分别依次过2、1 mm和0.25 mm筛,待测。采样点土壤基本理化性质见表2。

表1 采样点基本概况

Table 1 The basic information of soil sampling sites

样点编号 Sample No.	母质类型 Parent materials	采样地点 Location	种植年限 Cultivation ages/a	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	管理措施 Management measures
1	红砂岩	马荃镇管坊村	>30	62.0	116°53′00.37″	28°06′50.00″	复合肥作基肥,尿素作追肥;翻耕;秸秆还田
2	红砂岩	杨溪乡大塘村	>30	62.8	116°45′00.73″	28°13′44.57″	
3	红砂岩	刘家站垦殖场	5~10	50.0	116°55′00.37″	28°14′00.00″	
4	红砂岩	杨溪乡璜源村	>30	35.0	116°44′57.29″	28°15′09.91″	
5	河流冲积物	洪湖乡豪岭村	>30	38.5	116°56′57.09″	28°08′06.04″	
6	河流冲积物	马荃镇渔业村	>30	43.0	116°52′21.09″	28°09′16.84″	
7	河流冲积物	邓埠镇马岗村	>30	36.0	116°50′54.01″	28°11′01.05″	
8	河流冲积物	邓埠镇仪凤村	>30	33.0	116°48′19.02″	28°14′12.05″	
9	河流冲积物	平定乡弓塘村	>30	34.0	116°50′41.00″	28°13′48.00″	
10	河流冲积物	洪湖乡东阳村	>30	40.0	116°58′12.00″	28°14′04.00″	

表2 水稻土采样点基本理化性状

Table 2 The basic physical and chemical properties of paddy soil profiles

样点编号 Sample No.	深度 Soil depth/cm	pH	有机质 Soil organic matter (SOM)/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen (TN)/g·kg ⁻¹	阳离子交换量 Cation exchange capacity (CEC)/cmol·kg ⁻¹	交换性酸 Exchangeable acid (EA)/cmol·kg ⁻¹	交换性盐基总量 Total exchangeable base(TEB)/cmol·kg ⁻¹
1	0~20	4.90±0.01	32.87±0.25	1.71±0.00	13.40±2.50	1.37±0.04	2.56±0.04
	20~40	5.68±0.02	9.80±0.30	0.56±0.01	10.58±0.22	0.16±0.11	5.47±0.01
	40~60	5.77±0.01	8.15±0.30	0.40±0.03	10.19±0.60	0.09±0.02	7.40±0.04
	60~80	6.15±0.03	8.93±0.11	0.40±0.02	8.01±1.44	0.06±0.00	6.19±0.07
	80~100	6.09±0.01	8.01±0.05	0.37±0.01	7.44±0.34	0.14±0.09	5.56±0.54
2	0~20	5.32±0.02	25.99±0.62	1.31±0.09	7.57±0.26	1.38±0.45	3.65±0.06
	20~40	5.84±0.03	12.17±0.41	0.68±0.00	7.56±0.39	0.28±0.18	5.46±0.15
	40~60	6.35±0.02	5.28±0.04	0.32±0.02	8.12±0.07	0.30±0.23	6.54±0.02
	60~80	6.42±0.02	3.89±0.11	0.31±0.01	8.82±0.07	0.39±0.38	6.65±0.03
	80~100	6.34±0.01	4.29±0.43	0.34±0.02	10.45±0.14	0.72±0.39	7.74±0.08
3	0~20	4.80±0.01	40.41±0.26	2.16±0.15	10.88±0.64	3.14±0.14	3.36±0.00
	20~40	4.96±0.01	22.61±0.45	1.19±0.01	7.58±0.01	1.78±0.78	3.07±0.03
	40~60	5.28±0.01	9.38±0.59	0.48±0.07	5.27±0.53	0.52±0.07	2.91±0.04
	60~80	5.30±0.01	6.53±0.37	0.38±0.05	7.09±0.05	0.60±0.01	3.34±0.04
	80~100	5.88±0.02	6.63±0.47	0.56±0.02	16.50±0.25	0.36±0.30	7.07±0.12

续表2 水稻土采样点基本理化性状

Continued table 2 The basic physical and chemical properties of paddy soil profiles

样点编号 Sample No.	深度 Soil depth/cm	pH	有机质 Soil organic matter (SOM)/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen (TN)/g·kg ⁻¹	阳离子交换量 Cation exchange capacity (CEC)/cmol·kg ⁻¹	交换性酸 Exchangeable acid (EA)/cmol·kg ⁻¹	交换性盐基总量 Total exchangeable base(TEB)/cmol·kg ⁻¹
4	0~20	4.59±0.03	59.29±0.25	3.35±0.04	10.21±0.26	2.84±0.11	2.26±0.23
	20~40	5.48±0.01	11.89±0.12	0.81±0.09	6.84±0.15	0.62±0.52	4.15±0.10
	40~60	6.07±0.04	9.19±0.03	0.61±0.01	9.94±0.14	0.16±0.01	7.41±0.03
	60~80	6.19±0.02	7.42±0.06	0.57±0.00	9.41±0.06	0.18±0.09	7.63±0.14
	80~100	6.49±0.01	5.32±0.22	0.47±0.00	7.45±0.35	0.26±0.12	6.69±0.04
5	0~20	4.79±0.00	12.31±0.33	1.32±0.02	9.23±0.32	2.38±0.02	1.39±0.02
	20~40	—	—	—	—	—	—
	40~60	5.60±0.01	7.57±0.05	0.37±0.05	7.71±0.08	0.40±0.02	3.60±0.01
	60~80	5.62±0.01	6.54±0.41	0.35±0.01	7.61±0.12	0.45±0.01	3.93±0.00
	80~100	5.73±0.02	6.34±0.33	0.34±0.02	8.23±0.02	0.38±0.00	4.63±0.02
6	0~20	4.72±0.03	36.67±0.09	1.94±0.01	8.73±0.24	1.95±0.11	1.70±0.06
	20~40	5.19±0.00	8.96±0.09	0.51±0.02	6.08±0.09	0.73±0.04	2.74±0.18
	40~60	5.51±0.02	5.60±0.42	0.29±0.05	5.34±0.09	0.35±0.07	2.99±0.02
	60~80	5.62±0.01	2.65±0.48	0.15±0.02	3.80±0.08	0.20±0.02	2.63±0.05
	80~100	5.75±0.01	3.08±0.07	0.18±0.02	3.43±0.03	0.95±0.31	2.51±0.08
7	0~20	4.96±0.01	24.50±0.30	1.25±0.02	9.63±0.06	0.38±0.04	3.01±0.04
	20~40	5.61±0.02	8.68±0.09	0.48±0.01	7.73±0.04	0.16±0.00	4.36±0.06
	40~60	5.87±0.01	5.37±0.31	0.27±0.01	6.28±0.08	0.12±0.04	4.59±0.03
	60~80	5.90±0.01	3.32±0.51	0.20±0.00	5.40±0.43	0.10±0.00	4.57±0.12
	80~100	5.98±0.02	3.32±0.19	0.19±0.01	7.80±3.38	0.18±0.04	3.55±1.54
8	0~20	4.75±0.01	40.55±0.27	2.18±0.07	9.59±0.09	2.61±0.01	2.43±0.10
	20~40	5.12±0.03	19.83±0.19	1.09±0.07	8.26±0.21	1.42±0.36	3.21±0.05
	40~60	6.22±0.08	4.31±0.22	0.36±0.04	10.97±0.10	0.20±0.09	6.28±0.05
	60~80	6.52±0.05	3.12±0.00	0.26±0.00	11.12±0.16	0.06±0.02	6.37±0.01
	80~100	6.61±0.03	4.76±0.33	0.28±0.01	11.14±0.00	0.08±0.03	6.16±0.09
9	0~20	4.77±0.01	35.81±0.08	1.90±0.01	7.56±0.51	0.42±0.10	1.96±0.05
	20~40	5.41±0.01	7.17±0.38	0.32±0.00	6.56±0.17	0.25±0.00	3.89±0.12
	40~60	5.72±0.01	5.01±0.14	0.25±0.01	7.15±0.20	0.13±0.03	5.48±0.05
	60~80	5.86±0.03	4.63±0.03	0.22±0.01	8.03±0.32	0.15±0.00	5.92±0.06
	80~100	6.47±0.01	4.47±0.09	0.22±0.01	10.41±0.21	0.11±0.05	7.15±0.05
10	0~20	5.13±0.02	40.21±0.27	2.06±0.09	9.81±0.03	0.91±0.03	5.56±0.08
	20~40	5.41±0.03	20.32±0.49	1.12±0.04	7.58±0.55	0.42±0.05	5.16±0.07
	40~60	5.56±0.02	18.32±0.46	0.99±0.11	8.23±0.06	0.21±0.04	6.47±0.19
	60~80	5.59±0.03	7.60±0.28	0.45±0.03	8.29±0.03	0.74±0.52	6.25±0.06
	80~100	5.98±0.02	6.39±0.50	0.53±0.01	18.56±0.19	0.31±0.22	11.45±0.06

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤理化性质测定

土壤pH值采用电极电位法(水土比2.5:1)测定,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮采用半微量开氏法测定,土壤容重采用环刀法测定^[17];阳离子交换量采用1 mol·L⁻¹乙酸铵振荡浸提-凯氏定氮法测定^[18]。

1.3.2 土壤酸碱缓冲容量测定

酸碱缓冲容量采用酸碱滴定法,具体步骤^[19-20]:分别称取4 g土壤样品于11个50 mL离心管中,然后分别在1~5号离心管中依次加入20 mL已调配好的NaOH溶液,浓度分别为0.002 50、0.005 00、0.010 00、0.015 00、0.020 00 mol·L⁻¹;6号离心管中不加酸碱,只加入20 mL的去离子水;7~11号离心管中依次加入与

NaOH溶液等量、等浓度的HCl溶液,待土壤悬液振荡1 h后,在室温下培养,期间每日用力往复摇匀一次,平衡7 d后用pH计测定土壤pH值,同一母质的剖面样品互为重复,以pH值为纵坐标,酸碱加入量为横坐标,建立酸碱缓冲曲线,选取中间变化接近直线的一段曲线,用线性方程拟合,拟合方程的斜率的倒数即为酸碱缓冲容量。

1.3.3 土壤酸化速率计算

土壤酸化速率的计算公式^[20-21]如式(1)所示:

$$AR = \Delta pH \times pHBC \times BD \times V / T \quad (1)$$

式中:AR为土壤酸化速率, $\text{kmol} \cdot \text{H}^+ \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;pHBC表示土壤酸碱缓冲容量, $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$;BD表示土壤容重, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;V表示土壤体积, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$;T表示pH变化的时间,a。

1.4 数据统计与分析

利用SPSS Statistics 19.0软件进行数据分析,用Duncan多重比较法检验不同母质或不同土层间的差异显著性($\alpha=0.05$),采用Excel 2016软件进行绘图和制表。

2 结果与分析

2.1 水稻土剖面酸碱滴定曲线

由图1A可以看出,红砂岩母质发育的水稻土pH

随着酸加入量的增加逐渐降低,降低的幅度在0~20 cm土层最小,而在20~100 cm的4个土层下降幅度基本一致;随着碱加入量的增加,水稻土pH在不同土层升高的幅度分别为40~60、60~80、80~100 cm>20~40 cm>0~20 cm,表明在40~100 cm土层水稻土对加碱的敏感程度高于0~20 cm土层。在0~20 cm土层,红砂岩母质发育的水稻土初始pH(不加酸碱的pH)为6.60,而在20~100 cm的4个土层,红砂岩水稻土的基础pH随着土壤层次的加深而升高,且都在6.0~7.0的范围内。

由图1B可以看出,河流冲积物母质发育的水稻土pH在0~20 cm土层随着加酸量的增加而呈降低趋势;在20~100 cm土层,随着加酸量的增加呈先降低后升高趋势;随着碱加入量的增加,水稻土pH在不同土层升高的幅度分别为40~60、60~80、80~100 cm>20~40 cm>0~20 cm,表明在40~100 cm土层水稻土对加碱的敏感程度高于0~20 cm土层。基础pH(不加酸碱的pH)在20~40 cm土层最低,随着土层加深而逐渐升高,在80~100 cm土层最高,达到6.11(0~20 cm土层除外)。

2.2 水稻土剖面酸碱缓冲容量

不同母质发育的水稻土在不同土层上酸碱缓冲容量具有差异,均随着土层的加深,酸碱缓冲容量显

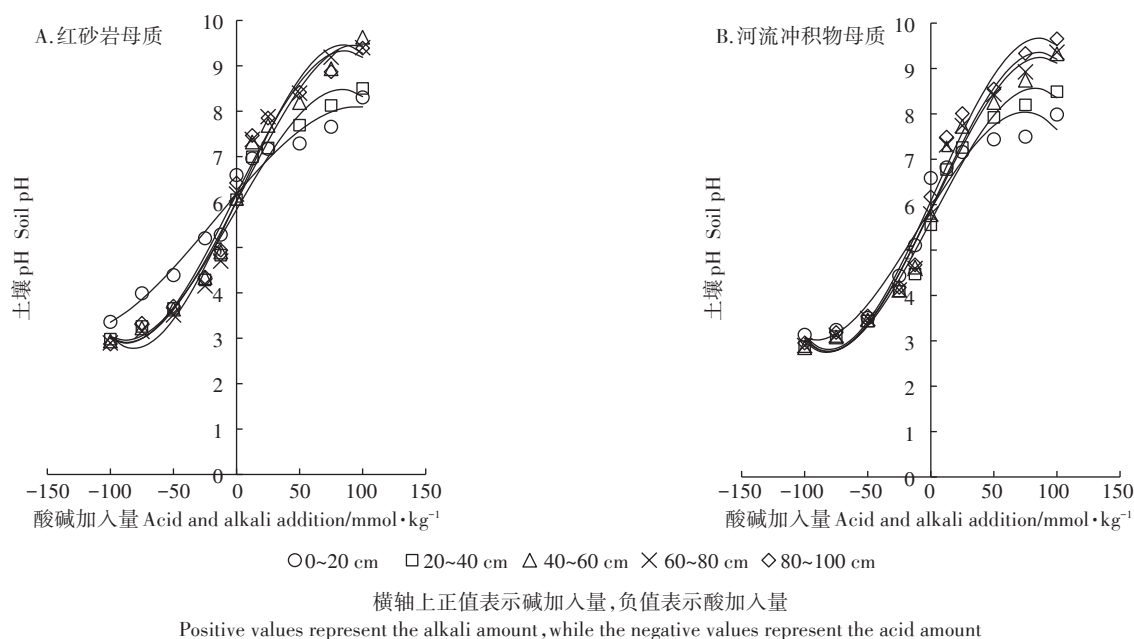


图1 红砂岩(A)和河流冲积物(B)母质发育的水稻土剖面酸碱滴定曲线

Figure 1 Integrated titration curve determined by acid and alkali addition of paddy soil profiles derived from red sandstone(A) and river alluvium(B) parent materials

著下降(表3)。在红砂岩母质上,0~20 cm土层酸碱缓冲容量最大,为 $20.11\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别显著高于20~40、40~60、60~80 cm和80~100 cm土层 7.81 、 9.62 、 $10.72\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.14\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,且在20~100 cm之间的各土层酸碱缓冲容量无显著差异,说明红砂岩母质发育的水稻土表层对外源酸碱的缓冲能力比底层强。在河流冲积物母质上,酸碱缓冲容量在0~20 cm土层最大,分别比40~60、60~80 cm和80~100 cm显著增加了 2.43 、 $3.49\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.18\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中在20~100 cm随着土层的加深,酸碱缓冲容量显著降低,降低的幅度为 $3.27\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明随着土层的加深,河流冲积物母质发育的水稻土耐酸、耐碱能力显著下降。

在0~20 cm土层,红砂岩母质发育的水稻土酸碱缓冲容量比河流冲积物母质显著增加 $7.38\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;在20~100 cm土层,2种母质发育的水稻土酸碱缓冲容量无显著差异。

2.3 水稻土表层酸化速率

将全国第二次土壤普查(1985年)测得的余江县

水稻土pH作为初始pH即可计算不同母质类型下的水稻土的酸化速率,植被的生长年限作为时间计算得到的酸化速率和酸化趋势如表4所示。从表4可以看出,水田利用方式下2种母质水稻土酸化速率的大小表现为红砂岩($0.78\text{ kmol H}^{+}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>河流冲积物($0.36\text{ kmol H}^{+}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

2.4 水稻土酸碱缓冲容量与土壤性质的关系

由表5可以看出,水稻土酸碱缓冲容量与pH呈极显著负相关($P<0.01$),与交换性盐基总量呈显著负相关($P<0.05$),与阳离子交换量、有机质、全氮和交换性酸呈极显著正相关($P<0.01$);水稻土pH与有机质、全氮和交换性酸呈极显著负相关($P<0.01$),与交换性盐基总量呈极显著正相关($P<0.01$),与阳离子交换量无显著相关性,表明水稻田pH和酸碱缓冲性能主要受土壤有机质、全氮、阳离子交换量、交换性盐基总量和交换性酸的影响。

3 讨论

土壤缓冲能力的强弱一般用缓冲容量来衡量,即

表3 不同母质水稻土剖面缓冲曲线在突跃范围内的直线拟合结果及酸碱缓冲容量

Table 3 The linear fitting equation and acid-base buffer capacity of the buffer curve of paddy soil profile derived from different parent materials

母质类型 Parent materials	深度 Soil depth/cm	$Y=aX+b$		R^2	酸碱缓冲容量 Acid buffering capacity(pHBC)/ $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$
		a	b		
红砂岩	0~20	0.053 2	6.951 7	0.997 7	$20.11\pm 2.94\text{aA}$
	20~40	0.094 4	5.973 3	0.993 9	$12.30\pm 2.12\text{bA}$
	40~60	0.096 0	6.350 0	0.989 9	$10.49\pm 1.59\text{bA}$
	60~80	0.110 8	5.530 0	0.983 0	$9.39\pm 0.94\text{bA}$
	80~100	0.105 6	6.450 0	0.991 6	$9.97\pm 1.12\text{bA}$
河流冲积物	0~20	0.072 5	6.263 0	0.928 6	$12.73\pm 1.88\text{aB}$
	20~40	0.080 4	5.386 7	0.999 8	$11.82\pm 0.54\text{abA}$
	40~60	0.098 0	5.980 0	0.998 8	$10.30\pm 1.14\text{bcA}$
	60~80	0.107 6	5.620 0	0.934 8	$9.24\pm 0.78\text{cdA}$
	80~100	0.110 0	6.296 7	0.995 8	$8.55\pm 0.76\text{dA}$

注:Y表示水稻土pH,X表示加酸量或加碱量($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$);同列不同小写字母代表同一母质不同土层间0.05水平差异显著,不同大写字母代表同一土层不同母质间0.05水平差异显著。下同。

Note: Y means the soil pH, X means amendment rate($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$); Different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level in different layers under the same parent material, and different capital letters mean significant differences at 0.05 level in the same layer under different parent materials. The same below.

表4 0~20 cm土层水稻土的酸化速率

Table 4 Acidification rate of paddy soil at the layers of 0~20 cm

利用方式 Land use	母质类型 Parent materials	种植年限 Cultivation ages/a	ΔpH	酸化速率 Acidification rates/ $\text{kmol H}^{+}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
水田	红砂岩	31	0.67	0.78
	河流冲积物	31	0.39	0.36

表5 水稻土酸碱缓冲容量与土壤性质的相关性

Table 5 Correlation between soil pH buffering capacity and soil properties

项目 Items	酸碱缓冲容量 pHBC	pH	阳离子交换量 CEC	有机质 SOM	全氮 TN	交换性盐基总量 TEB	交换性酸 EA
酸碱缓冲容量 pHBC	1						
pH	-0.650**	1					
阳离子交换量 CEC	0.484**	-0.018	1				
有机质 SOM	0.757**	-0.808**	0.280	1			
全氮 TN	0.755**	-0.792**	0.313*	0.996**	1		
交换性盐基总量 TEB	-0.370*	0.780**	0.357*	-0.507**	-0.483**	1	
交换性酸 EA	0.682**	-0.799**	0.185	0.866**	0.866**	-0.629**	1

注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

Note:* and ** mean significant correlation at the $P<0.05$ (two-tailed) and $P<0.01$ (two-tailed) levels, respectively.

土壤改变一个单位 pH 值,需要向土壤中加入的酸量或碱量^[22]。酸碱缓冲容量表示土壤 pH 改变一个单位的情况下所添加的酸或碱的当量($\Delta H/\Delta pH$ 或 $\Delta OH/\Delta pH$)^[23],其值可根据酸碱滴定曲线图解法求得。土壤酸碱缓冲曲线反映了土壤缓冲性能的变化趋势,缓冲曲线越平缓,说明在这个阶段土壤抵抗酸的能力越强^[24]。本研究表明酸碱滴定曲线近似呈“S”形,且在 pH=4~6(或 7)的范围近似为直线,因而可以采用线性方程拟合得到酸碱缓冲容量^[25]。

酸滴定曲线表征土壤各种共轭碱的质子化过程:大量共轭碱的存在可缓冲质子添加对 pH 的显著改变;共轭碱缺乏,继续添加质子将引起 pH 的迅速下降^[26]。本研究通过比较两种母质发育的水稻土酸碱缓冲曲线来表征土壤的缓冲性能,结果说明初始 pH 值对缓冲曲线的趋势有重要影响。与沈月等^[27]研究结果一致。土壤的这些对 pH 值变化的缓冲能力涉及很多机理,按其发挥缓冲功能的 pH 值范围分为以下几点^[28]:一是碳酸盐矿物的缓冲作用(pH 7.4~7.8);二是硅酸盐矿物的缓冲作用(pH 6.1~7.3);三是土壤中的交换性盐基离子的缓冲作用(pH 5.6~6.0);四是土壤中的铝硅酸盐矿物分解产生的缓冲作用(pH 4.5~5.5);五是铁铝缓冲作用(pH<4.5)。本研究表明 2 种母质发育的水稻土剖面 pH 为 4.76~6.11,且酸碱缓冲容量与交换性盐基总量、交换性酸和阳离子交换量均显著相关(表 5),可以初步表明余江县水稻土处于铝硅酸盐矿物分解和交换性盐基离子缓冲作用阶段。

本研究结果表明,不同母质发育水稻土 pH 随着加酸量的增加而逐渐降低,随着加碱量的增加而逐渐增加,这与汪吉东等^[29]研究结果一致。同时,红砂岩和河流冲积物母质发育的水稻土在 0~20 cm 土层缓冲容量最大,而在 80~100 cm 土层缓冲容量最小,且

随着土层的加深,缓冲容量逐渐降低,酸化程度逐渐减弱。

影响土壤酸碱缓冲性能的因素主要包括 pH、有机质、交换性盐基离子和阳离子交换量等^[30]。本研究表明,红砂岩母质发育的水稻土酸碱缓冲容量和酸化速率均显著大于河流冲积物母质,主要由于:①2 种母质发育的水稻土酸缓冲容量与初始 pH 呈显著负相关($P<0.01$),与有机质、全氮和阳离子交换量呈极显著正相关($P<0.01$),且土壤性质较大程度上继承母质母岩^[31],与河流冲积物母质相比,红砂岩母质发育的水稻土 pH 较低,有机质、全氮和阳离子交换量含量较高(表 2);②土壤的基础 pH 越高,土壤胶体上吸附的盐基离子越多,缓冲作用就越强。因此,土壤在一定 pH 范围内,pH 越高土壤胶体吸附的阳离子越多;③土壤有机质含量虽然仅占土壤的百分之几,但腐殖质含有大量负电荷,对阳离子交换量贡献大。通常有机质含量高的土壤具有较强的缓冲能力。表明丰富的有机质可显著增强土壤缓冲作用^[32],一般来说,土壤有机质含量与土壤缓冲性能成正相关,主要由于土壤有机质含有大量的含氧官能团,如羧基($-\text{COOH}$)、酚羟基和醇羟基($-\text{OH}$)等活性基团,是影响酸碱缓冲容量的重要因素^[33]。当 pH 较高时,有机质含量也较高,但并不是一成不变,当 pH 降至 5 以下时,土壤有机质含量处于缺乏水平,相对单一的缓冲体系对外界环境改变的敏感性较高,同时,更有利于土壤的风化和淋溶,土壤盐基大量淋失,增高活性 Al^{3+} 浓度,降低土壤缓冲性能^[33];④土壤胶体的交换性阳离子是土壤具有缓冲性的主要原因之一,阳离子交换量愈大,缓冲性也愈强^[24]。因此,红砂岩母质发育的水稻土酸缓冲能力比河流冲积物母质强。

4 结论

(1)酸碱缓冲曲线可以很好地反映不同母质发育的水稻土在不同土层上对加酸、加碱量的敏感程度。

(2)随着土层深度的增加,2种母质的酸碱缓冲容量呈下降趋势,其中在0~20 cm土层,红砂岩母质发育的水稻土缓冲容量和酸化速率最高。

(3)水稻土酸碱缓冲容量主要与初始pH、有机质、全氮、阳离子交换量、交换性盐基总量和交换性酸有关,2种母质发育水稻土均处于铝硅酸盐矿物分解和交换性盐基离子缓冲阶段。

参考文献:

- [1] 李艾芬,麻万诸,章明奎,等. 水稻土的酸度特征及其起因[J]. 江西农业学报, 2014, 26(1):72-76.
LI Ai-fen, MA Wan-zhu, ZHANG Ming-kui, et al. Characteristics and causes of acidification of paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(1):72-76.
- [2] 徐颖菲,谢莉莉,章明奎,等. 浙江河网平原水稻土的肥力特点及其变化[J]. 农学学报, 2017, 7(8):29-34.
XU Ying-fei, XIE Li-li, ZHANG Ming-kui, et al. Characteristics and variations of soil fertility of paddy fields in river-network plains of Zhejiang[J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7(8):29-34.
- [3] 吴杰民,邵 峰. 碱性改良剂对富铝化淋溶土酸缓冲性能影响研究[J]. 环境科学学报, 1994, 14(4):482-487.
WU Jie-min, SHAO Feng. The study of the effect of alkaline amendment on acid buffer capacity of rich aluminized luvisols[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1994, 14(4):482-487.
- [4] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1987.
YU Tian-ren. Soil chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [5] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [6] 陈翠玲. 潮土地地区不同质地类型土壤对酸缓冲性能的研究[J]. 河南农业科学, 2005(10):64-65.
CHEN Cui-ling. Studies on acidic buffering capacity in different soil texture types in moisture soil area[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005(10):64-65.
- [7] 吴甫成,王晓燕,邹 君. 湖南土壤酸缓冲性能研究[J]. 农业现代化研究, 2001, 22(1):58-61.
WU Fu-cheng, WANG Xiao-yan, ZOU Jun, et al. A study on acidic buffering ability of soils in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001, 22(1):58-61.
- [8] 刘 伟,尚庆昌. 长春地区不同类型土壤的缓冲性及其影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(3):78-82.
LIU Wei, SHANG Qing-chang. Buffer action and its influencing factors of different types of soil in Changchun region[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2001, 23(3):78-82.
- [9] 韩春爽,武俊男,秦治家,等. 吉林西部不同种植年限水稻土酸缓冲性能研究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(2):56-61.
HAN Chun-shuang, WU Jun-nan, QIN Zhi-jia, et al. Studies on acid buffering ability of saline-alkali paddy soil of different cultivation years in western Jilin Province[J]. *Journal Northeast Agricultural Science*, 2016, 41(2):56-61.
- [10] 廖柏寒,戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征[J]. 环境科学学报, 1991, 11(4):423-430.
LIAO Bo-han, DAI Zhao-hua. Soil buffering capacity to acid precipitation and weathering characteristics of soil minerals[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, 11(4):423-430.
- [11] 王 楠,赵兰坡,周彦明,等. 玉米(超)高产与普通生产田土壤酸碱缓冲作用的研究[J]. 吉林农业科学, 2009, 34(2):24-27.
WANG Nan, ZHAO Lan-po, ZHOU Yan-ming, et al. Studies on acid-alkali buffer action of super or high yield and ordinary yield maize soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2009, 34(2):24-27.
- [12] Aitken R L, Moody P W. The effect of valence and ionic strength on the measurement of pH buffer capacity[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(5):975-984.
- [13] 姜 军,徐仁扣,赵安珍. 用酸碱滴定法测定酸性红壤的pH缓冲容量[J]. 土壤通报, 2006, 37(6):1247-1248.
JIANG Jun, XU Ren-kou, ZHAO An-zhen. Determination of pH buffer capacity of acid red soils by acid-base titration[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6):1247-1248.
- [14] Hu Z Y, Xu C K, Zhou L N, et al. Contribution of atmospheric nitrogen compounds to N deposition in a broadleaf forest of southern China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3):360-365.
- [15] Zhang H M, Wang B R, Xu M G. Effects of inorganic fertilizer inputs on grain yields and soil properties in a long-term wheat-corn cropping system in south China[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, 39(11/12):1583-1599.
- [16] Chu H Y, Fu J T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(2):485-491.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis in soil agrochemistry[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] 赵 莉. 乙酸铵交换法测定土壤阳离子交换量的不确定度评定研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(10):146-149.
ZHAO Li. Uncertainty in determining of cation exchange capacity in soil samples by ammonium acetate exchange method[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(10):146-149.
- [19] 姬 钢. 不同土地利用方式下红壤酸化特征及趋势[D]. 北京:中国农业科学院, 2015.
JI Gang. Characteristics and trends of red soil acidification under different land use methods[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [20] 赵凯丽. 不同母质红壤的酸化特征及趋势[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.
ZHAO Kai-li. Acidification characteristics and trend of red soil from different parent materials[D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture-

- al Sciences, 2016.
- [21] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3):465-472.
ZHANG Yong-chun, WANG Ji-dong, SHEN Ming-xing, et al. Effects of long-term fertilization on soil acidification in Taihu Lake region, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3):465-472.
- [22] Vieira F C B, Bayer C, Mielniczuk J, et al. Long-term acidification of a Brazilian Acrisol as affected by no till cropping systems and nitrogen in soil ANC under long-term different fertilizations 34 fertilizer[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(1):17-26.
- [23] Nelson P N, Su N. Soil pH buffering capacity: A descriptive function and its application to some acidic tropical soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(3):201-207.
- [24] 王文婧, 戴万宏. 安徽主要土壤酸碱性及其酸缓冲性能研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(15):67-72.
WANG Wen-jing, DAI Wan-hong. Study on soil pH and acidic buffering properties in Anhui Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(15):67-72.
- [25] 成杰民, 胡光鲁, 潘根兴. 用酸碱滴定曲线拟合参数表征土壤对酸缓冲能力的新方法[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3):569-573.
CHENG Jie-min, HU Guang-lu, PAN Gen-xing. New method for evaluating buffering capacity and equilibrium pH of paddy soil with simulation parameter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3):569-573.
- [26] Van Breenmen N, Mulder J, Driscoll C T. Acidification and alkalization of soils[J]. *Plant and Soil*, 1983, 75:283-308.
- [27] 沈月, 依艳丽, 张大庚, 等. 耕地棕壤酸碱缓冲性能及酸化速率研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1):95-100.
SHEN Yue, YI Yan-li, ZHANG Da-geng, et al. Research on pH buffer capacity and acidification rate of arable brown soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1):95-100.
- [28] 王代长. 酸化土壤中养分离子的淋失机理及金属离子的反应动力学[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
WANG Dai-zhang. Mechanisms of nutrient ions leaching and reaction kinetics of cations in acidified soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2003.
- [29] 汪吉东, 戚冰洁, 张永春, 等. 长期施肥对砂壤质石灰性潮土土壤酸碱缓冲体系的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4):1031-1036.
WANG Ji-dong, QI Bing-jie, ZHANG Yong-chun, et al. Effects of long-term fertilization on pH buffer system of sandy loam calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4):1031-1036.
- [30] 杨杉, 吴胜军, 周文佐, 等. 三峡库区典型土壤酸碱缓冲性能及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1):163-170.
YANG Shan, WU Sheng-jun, ZHOU Wen-zuo, et al. Acid and alkaline buffering capacity and its influencing factors of typical soils in the Three Gorges reservoir area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1):163-170.
- [31] 吴蔚东, 张桃林, 高超, 等. 中亚热带天然常绿阔叶林下不同母质的土壤质量性状[J]. 山地学报, 2003, 21(1):73-79.
WU Wei-dong, ZHANG Tao-lin, GAO Chao, et al. Study on the soil quality of soils formed from two kinds of parent material under mid-sub-tropic primary broad-leaved forest[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1):73-79.
- [32] 潘根兴. 改进的酸碱滴定曲线法应用于研究土壤对酸雨的反应[J]. 南京农业大学学报, 1991, 14(4):128-132.
PAN Gen-xing. Improved acid-base titration curve method is applied to study the soil response to acid rain[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1991, 14(4):128-132.
- [33] Weaver A R, Kissel D E, Chen F, et al. Mapping soil pH buffering capacity of selected fields in the coastal plain[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2):662-668.