

鄱阳湖流域典型区限制水稻产量的土壤因素分析^①

姚利鹏^{1,2}, 黄 标^{1*}, 孙维侠¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 影响作物生产的土壤因素会随着耕作管理措施的变化而改变, 研究目前条件下影响作物生产的主要土壤因素并分析其变化的原因, 可以为作物的生产和管理提供重要决策支撑。本文以江西省鄱阳湖流域进贤县作为典型研究区, 在全县范围内布点采样分析, 获取 51 组土壤属性数据和野外水稻测产数据, 采用主成分分析法, 用主成分表征研究区内主要土壤因子, 并与水稻产量之间进行相关性分析, 获得了影响水稻产量的主要因子。结果表明: 钾素因子、物理结构因子与水稻产量之间达到显著相关水平, 相关系数分别为 0.325 ($P<0.05$)、0.411 ($P<0.01$), 成为当前研究区内水稻产量的主要限制因子; 淹水条件下, 土壤酸化对水稻生产的影响并不明显, 但其导致的钙、镁等盐基离子流失可影响作物产量; 稻田排灌体系的完善可以减弱土壤潜育化作用对水稻生长的影响。

关键词: 土壤因素; 演变; 限制因子; 水稻产量; 水稻土; 华中双季稻稻作区

中图分类号: S158.5; S159.2; S511

土壤是水稻生育最重要的物质基础, 水稻土的质量状况对于水稻的优质高产起着非常重要的作用。不合理的化肥施用等耕作管理措施会造成土壤酸化加剧、养分失调、土壤结构破坏等问题^[1], 进而限制水稻的生产, 水稻产量、质量的提升。随着现代农业的发展, 土壤利用强度的变化、耕作管理措施的改善, 影响作物生产的土壤障碍因素及其程度有无变化、如何变化? 这是大家关心的问题, 及时、有效地识别限制水稻产量的土壤因子对指导农业生产及农业管理科学决策具有重要的理论和现实意义。

鄱阳湖平原是我国著名的稻米产区之一, 位于华中单双季稻稻作区, 面积约 2.8 万 km², 水稻种植面积占江西省农作物总播种面积的 50% 以上^[2]。20 世纪 80 年代以来, 前人对鄱阳湖地区水稻土的质量状况、障碍因子开展了大量的研究工作。这些研究表明^[3–5], 鄱阳湖地区水稻生产中, 存在着潜育化、酸化、缺钾、板结等障碍因素。潜育型水稻土占鄱阳湖地区水稻土面积的 15.1%^[3]; 第二次土壤普查时, 强酸性土壤(pH 4.5 ~ 5.5)面积所占比例就已经达到 58.2%^[6]。随着几十年大量化肥的投入和对中低产田的治理, 该区的水稻生产在获得较高产量的同时, 土壤演变也可能会产生新的土壤障碍因素制约水稻产

量, 因此有必要研究当前条件下限制水稻生产的关键土壤因素。本文选择鄱阳湖流域典型区开展这方面的研究工作, 其结果对及时调整农业管理措施, 提升土地生产力具有参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

进贤县(28°09'41" ~ 28°46'13" N, 116°01'15" ~ 116°33'36"E)地处江西省中部偏北, 鄱阳湖南岸, 为滨湖丘陵地区, 境内地势东南高西北低, 东部与南部丘陵起伏, 多小山岭, 西北部与北部湖泊众多, 西南沿抚河一带地势平坦(图 1)。全县总面积 1 955 km², 其中耕地面积 689 km²(截止 2005 年)^[7]。进贤县是全国商品粮基地县, 主要粮食作物水稻的种植以双季稻为主, 其种植面积达到 762.97 km², 占粮食种植总面积的 89%。

研究区属亚热带湿润气候, 年平均气温 17.5℃, 年平均雨量 1 587 mm, 全区土壤母质主要为第四纪红色黏土, 土壤类型以红壤(55.9%)和水稻土(40.3%)为主, 少量草甸土(3.5%)和潮土(0.3%)^[8]。水稻土主要分布在抚河沿岸冲积平原, 以潜育型(88.0%)、潜育型(9.9%)和淹育型(2.1%)为主(图 1)。进贤县的地形

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(2012BAD05B05)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 姚利鹏(1989—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量评价及 3S 技术应用方面研究。E-mail: lpyao@issas.ac.cn

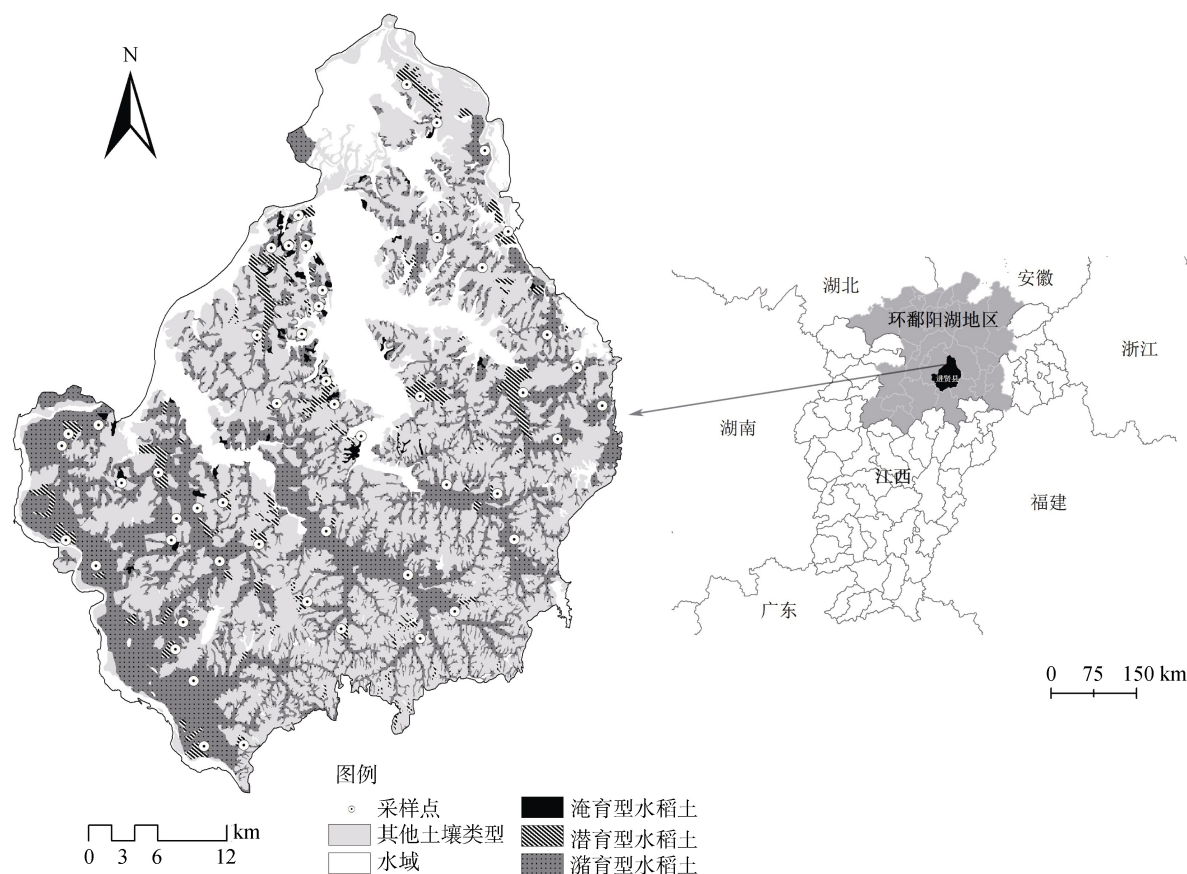


图 1 研究区土壤类型分布及样点图

Fig. 1 Distribution of soil types and sampling sites in the study area

地貌、水稻种植方式、气候、土壤等在鄱阳湖流域具有较好的典型性和代表性。

1.2 样品采集与分析

考虑土壤类型、空间上的均匀性及粮食作物产量分布状况,于 2012 年 10 月中旬晚稻收获前,采集了 51 个野外水稻测产样品以及对应点位的土壤团聚体样品、表层(0 ~ 20 cm)及亚表层(20 ~ 40 cm)土壤样品、土壤体积质量(容重)样品,其中,潴育型水稻土 29 个、潜育型水稻土 18 个、淹育型水稻土 4 个(图 1)。采样同时,进行了野外田间调查,包括灌溉方式、施肥情况等。

为保证所采样点具备代表性,采样时尽量选择在水稻长势均匀的大田块中央进行。在选定田块内收获 3 处面积为 1 m² 内的水稻,带回室内进行晒干、脱粒、称重,获得 51 个样点单位平方米的水稻产量,并转化成 t/hm²。

土壤体积质量测定用环刀法;土壤团聚体含量测定分别用干筛和湿筛法;土壤表层及亚表层样品风干磨细后分别过 10 目、60 目和 100 目筛,保存在自封袋中以备土壤理化性质的测定。土壤颗粒组成用吸管法测定;pH 测定用电位法;有机质含量测定用低温

外加热重铬酸钾氧化-滴定法,阳离子交换量测定用乙酸铵法;交换性钙、镁离子的提取采样用乙酸铵+EDTA 浸提-ICP 法;全氮含量测定用半微量凯氏法;全磷含量测定用氢氟酸+高氯酸+盐酸消煮-钼锑抗比色法;全钾含量测定用氢氟酸+高氯酸+盐酸消煮-火焰光度法;速效磷含量的测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾含量的测定采用乙酸铵浸提-ICP 法^[9]。

1.3 数据处理

采用主成分分析法对土壤属性进行分析,获取主成分,将产量与主成分进行 Pearson 相关性分析,获得研究区水稻产量的主要土壤限制因子。分析利用 SPSS 20.0 完成。

2 结果与分析

2.1 水稻产量与土壤属性统计特征及野外调查基本状况

对研究区内 51 个采样点的数据进行统计,全县晚稻平均产量 6.88 t/hm²,最低产量为 3.27 t/hm²,最高产量为 11.72 t/hm²,变异系数达到 23%。表 1 列出了研究区两类主要土壤类型上水稻产量和表层土壤

物理化学性质。方差分析结果表明,潜育型和潴育型水稻土上的水稻产量无明显差别($P>0.05$),但同一土壤类型上水稻产量变异明显,潜育型水稻土上,水稻产量变异系数为 20.70%,而潴育型水稻土上水稻产量变异系数达到了 25.55%。主要的土壤物理化学性质中,pH 平均值维持在 4.76 左右,且变异系数小于 10%,属于弱变异程度,相比第二次土壤普查时进贤县水稻土耕作层土壤 pH 均值 6.25^[6,8],目前研究区内水稻土酸化明显;此外,干筛>0.25 mm 团聚体的变异系数小于 10%,属弱变异性;其他土壤属性的变异

系数均在 10%~100%,属中等变异性,其中速效磷、速效钾、交换性钙和交换性镁的变异性相对较高。研究区内不同土壤类型间土壤物理化学性质也不存在明显差异($P>0.05$)。

表 1 同时列出了 20 世纪 80 年代进贤县第二次土壤普查时的相关数据,对比结果显示,两种土壤类型的变化趋势基本一致,土壤呈现进一步酸化趋势,土壤全磷和速效钾含量均有明显的下降趋势;然而,土壤有机质、全氮含量有显著提高,尤其是土壤中速效磷含量的增加,表明土壤的供磷能力显著增强。

表 1 进贤县水稻产量及表层土壤属性统计特征
Table 1 Descriptive statistics of rice yields and topsoil properties in Jinxian County

项目	土壤类型	极小值	极大值	变异系数(%)	均值 ± 标准差	1980 年代土壤数据
产量(t/hm ²)	潜育型	4.65	9.03	20.70	6.81 ± 1.41 a	—
	潴育型	3.27	11.72	25.55	6.85 ± 1.75 a	—
pH	潜育型	4.37	5.35	5.13	4.68 ± 0.24 aB	6.18 ± 0.73 A
	潴育型	4.32	6.14	7.97	4.77 ± 0.38 aB	6.33 ± 0.73 A
有机质(g/kg)	潜育型	25.57	45.15	18.58	33.48 ± 6.22 aA	26.35 ± 10.49 B
	潴育型	21.24	45.64	17.28	34.73 ± 6.00 aA	27.47 ± 8.35 B
阳离子交换量(cmol/kg)	潜育型	6.31	12.82	15.85	9.21 ± 1.46 a	—
	潴育型	7.00	13.33	16.82	8.68 ± 1.46 a	—
盐基饱和度(%)	潜育型	25.10	61.71	23.78	41.34 ± 9.83 a	—
	潴育型	23.99	79.22	32.19	43.83 ± 14.11 a	—
全氮(g/kg)	潜育型	1.34	2.31	18.86	1.75 ± 0.33 aA	1.51 ± 0.46 B
	潴育型	1.14	2.41	17.51	1.77 ± 0.31 aA	1.56 ± 0.46 B
全磷(g/kg)	潜育型	0.50	0.92	18.84	0.69 ± 0.13 aB	0.91 ± 0.24 A
	潴育型	0.44	1.19	26.15	0.65 ± 0.17 aB	0.84 ± 0.25 A
全钾(g/kg)	潜育型	12.53	23.94	20.38	15.41 ± 3.14 a	—
	潴育型	10.82	31.71	30.32	14.58 ± 4.42 a	—
速效磷(mg/kg)	潜育型	10.35	62.23	50.49	28.60 ± 14.44 aA	8.02 ± 4.38 B
	潴育型	11.76	75.46	49.46	29.70 ± 14.69 aA	3.55 ± 1.87 B
速效钾(mg/kg)	潜育型	32.50	88.25	30.98	56.59 ± 17.53 aB	71.43 ± 17.62 A
	潴育型	25.00	205.50	57.04	56.71 ± 32.35 aA	66.61 ± 22.83 A
交换性钙(cmol/kg)	潜育型	1.73	5.70	36.18	3.04 ± 1.10 a	—
	潴育型	1.29	6.70	42.35	3.07 ± 1.30 a	—
交换性镁(cmol/kg)	潜育型	0.28	0.95	34.00	0.50 ± 0.17 a	—
	潴育型	0.16	1.21	50.98	0.51 ± 0.26 a	—
体积质量(g/cm ³)	潜育型	0.85	1.36	11.00	1.09 ± 0.12 a	—
	潴育型	0.85	1.32	10.81	1.11 ± 0.12 a	—
黏粒(%)	潜育型	13.08	48.92	29.70	26.87 ± 7.98 a	—
	潴育型	17.24	40.60	21.53	24.90 ± 5.36 a	—
湿筛团聚体*(g/kg)	潜育型	500.4	860.5	18.73	665.3 ± 124.6 a	—
	潴育型	475.5	904.7	15.53	649.9 ± 100.9 a	—
干筛团聚体*(g/kg)	潜育型	915.5	995.6	2.45	974.0 ± 23.9 a	—
	潴育型	885.6	995.6	2.90	968.1 ± 28.1 a	—

注：* 均指直径>0.25 mm 的团聚体；同列小写字母不同表示同一项目不同土壤类型间差异显著($P<0.05$)，同行大写字母不同表示同一项目不同时期差异显著($P<0.05$)；表中 1980 年代的土壤属性数据来源于文献[8]。

有关水稻生产管理的野外调查数据显示,研究区内农户主要以施无机肥为主,通常为复合肥和尿素,仅 21% 的田块会施少量有机肥(牛粪、猪粪、鸡粪等),有机肥施用量和广泛程度均在逐渐减少(图 2a)。在调查的所有田块中,28% 的田块会额外增加施用专用的钾肥(图 2b)。

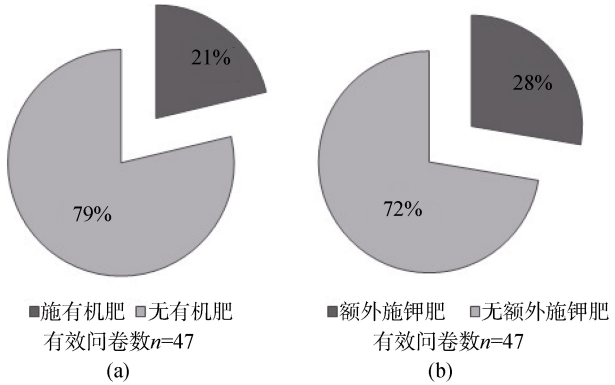


图 2 研究区施肥调研统计情况
Fig. 2 Survey information on fertilization in the study area

2.2 水稻产量与土壤性质及土壤性质间的相关性
进贤县水稻产量与水稻土表层土壤属性之间的相关性(表 2)显示,水稻的产量与土壤阳离子交换量、交换性镁、全钾、体积质量及黏粒含量呈现显著性甚至极显著性相关,其中,与土壤体积质量之间呈显著负相关;水稻产量与土壤中交换性钙、速效钾和直径 >0.25 mm 的湿筛团聚体含量存在一定的相关性,但并不

未达到显著水平;水稻产量与土壤 pH、有机质、全磷及有效磷含量不存在明显的相关性。

由于土壤属性之间存在良好的相关性(表 2),因此,仅根据水稻产量与土壤性质间的简单相关,无法判断影响作物产量的关键因素。为明确该区土壤属性对水稻产量影响的关键因素,运用主成分分析法,对研究区内 51 个样点的土壤化学性质、物理性质等 15 项相关土壤属性进行分析。

如表 3 所示,根据特征值大于 1 的选取原则,共获得 5 个主成分,累计贡献率达 85.11%(≥85%),可以反映该地区土壤主要变化过程。其中,第一主成分(F1, 27.13%)在盐基饱和度、pH、交换性钙、镁离子和速效钾的因子荷载较高,实际上土壤中的速效钾以交换性钾为主,占 95% 以上^[10],显然该因子是主要度量土壤酸碱过程和中量元素的因子;第二主成分(F2, 18.24%)在土壤黏粒和团聚体组成、阳离子交换量、体积质量上的因子荷载较高,交换性钙、镁离子的因子荷载也较高,由于土壤中大部分阳离子交换性能来源于黏粒的交换能力^[11],可认为 F2 是表征土壤物理结构的因子;第三主成分(F3, 16.58%)在有有机质和全氮含量的因子荷载较高,是反映土壤有机质积累过程的因子;第四主成分(F4, 14.13%)在全磷和速效磷含量上有较高的因子荷载,代表磷素度量的因子;第五主成分(F5, 9.03%)则在全钾含量有较高的因子荷载,说明其是衡量土壤中钾素的因子。

表 2 进贤县水稻产量与表层土壤属性相关系数
Table 2 Correlations between rice yields and topsoil properties in Jinxian County

	Yield	pH	SOM	CEC	BS	Ex.Ca	Ex.Mg	TN	TP	TK	AP	AK	SBD	Clay	WSA
pH	0.03	1													
SOM	0.12	-0.22	1												
CEC	0.45**	0.18	0.37**	1											
BS	0.16	0.85**	-0.17	0.28*	1										
Ex.Ca	0.27	0.76**	0.03	0.63**	0.91**	1									
Ex.Mg	0.39**	0.65**	0.02	0.63**	0.77**	0.83**	1								
TN	0.09	-0.30*	0.95**	0.35*	-0.25	-0.04	-0.07	1							
TP	0.16	0.19	0.23	0.53**	0.08	0.27	0.44**	0.16	1						
TK	0.45**	0.01	-0.14	0.31*	0.13	0.19	0.36*	-0.14	0.07	1					
AP	-0.01	-0.04	0.19	0.24	-0.14	-0.01	0.15	0.18	0.79**	-0.01	1				
AK	0.21	0.67**	-0.02	0.35*	0.56**	0.56**	0.65**	-0.10	0.37**	0.05	0.18	1			
SBD	-0.34*	-0.12	-0.44**	-0.58**	-0.22	-0.41**	-0.34*	-0.41	-0.11	-0.13	0.09	-0.12	1		
Clay	0.34*	0.01	0.10	0.68**	0.06	0.30*	0.35*	0.08	0.22	0.19	-0.15	0.23	-0.47**	1	
WSA	0.21	0.07	0.41**	0.43**	0.09	0.25	0.20	0.35*	0.11	-0.03	-0.28*	0.11	-0.63**	0.57**	1
DSA	0.15	0.22	-0.01	0.35*	0.24	0.35*	0.28*	-0.04	0.28*	-0.19	0.04	0.15	-0.29*	0.46**	0.27

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关(双尾检验); ** 表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关(双尾检验)。Yield: 水稻产量, SOM: 有机质, CEC: 阳离子交换量, BS: 盐基饱和度, TN: 全氮, TP: 全磷, TK: 全钾, AP: 速效磷, AK: 速效钾, Ex.Ca: 交换性钙, Ex.Mg: 交换性镁, SBD: 体积质量, Clay: 黏粒, WSA: 直径>0.25 mm 的湿筛团聚体, DSA: 直径>0.25 mm 的干筛团聚体; 下同。

表 3 进贤县表层土壤属性旋转因子荷载矩阵
Table 3 Rotated component matrix of topsoil properties in Jinxian County

土壤属性	旋转因子荷载				
	F1	F2	F3	F4	F5
BS	0.954	0.042	-0.087	-0.133	0.027
pH	0.922	-0.016	-0.156	-0.019	-0.132
Ex.Ca	0.898	0.282	0.086	0.030	0.117
Ex.Mg	0.812	0.276	0.028	0.241	0.303
AK	0.733	0.079	-0.022	0.264	-0.013
Clay	0.048	0.900	0.011	0.038	0.178
DSA	0.192	0.694	-0.171	0.190	-0.432
WSA	0.106	0.669	0.447	-0.244	-0.051
CEC	0.344	0.631	0.341	0.359	0.340
SBD	-0.229	-0.583	-0.531	0.137	-0.129
SOM	-0.079	0.083	0.950	0.152	-0.065
TN	-0.164	0.060	0.940	0.128	-0.052
AP	-0.015	-0.170	0.096	0.944	-0.007
TP	0.210	0.220	0.106	0.893	0.017
TK	0.090	0.084	-0.114	0.021	0.933
特征值	4.07	2.74	2.49	2.12	1.35
贡献率(%)	27.13	18.24	16.58	14.13	9.03
累计贡献率(%)	27.13	45.37	61.95	76.08	85.11

将各测产田块在各因子上的得分与水稻产量进行相关性分析可以看出(表 4)。水稻产量与土壤物理结构因子(F2)呈显著相关, 相关系数为 0.325($P<0.05$), 与钾素因子(F5)呈极显著相关, 相关系数为 0.411($P<0.01$)。同时, 水稻产量与度量酸碱过程和中量元素的第一主成分(F1)之间的相关系数也相对较高($r = 0.161$), 但并未达到显著性水平, 而与其他主

成分均无显著的相关性, 且相关度较低。由此, 可以推测, 进贤地区土壤物理结构和土壤中钾素及中量元素可能会影响水稻的生产。

除了分析整个研究区表层土壤性质外, 本研究还分别对不同类型的土壤性质和水稻产量、亚表层土壤性质和水稻产量也进行了主成分分析及相关分析, 均显示了上述类似的结果(结果未列出)。

表 4 进贤县水稻产量与主成分的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between rice yields and common factors in Jinxian County

	F1	F2	F3	F4	F5
产量	0.161	0.325*	0.106	0.063	0.411**
<i>P</i>	0.260	0.020	0.459	0.660	0.003

3 讨论

本研究表明, 随着耕种时间的推移, 水稻生产管理措施的变化, 土壤属性也会随之发生改变(表 1)。目前限制进贤县水稻生产的主要土壤因素来自于两方面: 一方面为土壤钾素, 另一个主要的限制因素则是土壤物理结构。与 20 世纪 80 年代第二次土壤普查结果相比(表 1), 当前研究区土壤酸化明显, 土壤全磷含量有小幅降低, 但土壤供磷能力则显著增强。而土壤速效钾含量有所减少, 这可能是钾素成为当前限制水稻生产的原因之一。此外, 两种主要类型的水稻

土间土壤性质的差异明显减弱, 且差异不显著(表 1)。

施肥一直是水稻生产的重要措施, 有研究显示^[12], 我国钾肥施用量变化很大, 平均每公顷水稻田施钾肥 19 ~ 155 kg, 农民习惯使用氮、磷用量偏高肥料, 施钾量一直普遍较低。南方地区土壤全钾含量普遍较低, 滨湖丘陵地势更是加速了土壤钾素的流失^[13], 加之土壤酸化, 使得土壤固钾能力下降, 钾素等养分离于淋溶流失加剧^[14-15]。蒋小燕等^[5]对鄱阳湖地区表层土壤营养元素分布现状与丰缺评价显示, 进贤县地区土壤表层全钾含量处于相对缺乏至适度的范围内。尽管研究区的生产者和管理者一直较为重视钾素的

施用,但野外调查结果显示(图 2b),除施用复合肥之外,仅有 28% 的农户额外施用钾肥(如 KCl)。水稻生产过程中钾素供应并不能满足水稻生长的需求,钾素依然是限制该地区水稻生产的重要因素之一。有机肥的施用在一定程度上不仅可以补充土壤全钾,对提高土壤速效钾也有一定作用^[16],而近年来有机肥的施用逐渐减少^[17]。研究区调查田块中,仅有 21% 的农户施用有机肥(图 2a),且量极少,如此,获取钾素的途径减少,更加剧了钾素对水稻生产的影响。综上所述,今后水稻生产的施肥过程中应该继续加强钾素的供应。

土壤的团粒结构对水稻生产的影响容易被人忽视。目前当地开展的测土配方施肥并没有关于土壤物理性质的调查测定,尤其当前,有机肥投入减少、耕作措施越来越简单,耕作层越来越浅,这些都使得土壤的结构性能发生明显退化。通过主成分分析及主成分与产量间的相关性分析(表 2,表 3)可以得知,表征土壤物理结构的因子与水稻产量之间呈显著相关性($r = 0.325$, $P < 0.05$),土壤物理结构愈发成为影响水稻生产的主要限制因子,这应该引起重视。土壤物理结构的改善除了可以提高水稻产量外,还可以提高土壤养分的利用效率,从而可以减少施肥量,节约肥料资源。

研究区土壤普遍酸化,并有加剧的趋势,这一特征也是鄱阳湖流域普遍存在的现状^[4],与第二次土壤普查结果相比,2002—2005 年全国多目标区域地球化学调查显示该地区强酸性土壤面积已增加到 78.44%^[4]。然而,从本研究结果来看,淹水条件下,土壤酸化对水稻生产的影响并不明显,但酸化可导致其他盐基离子(如钙、镁)的流失、阳离子交换量降低等问题^[18]。表 3、表 4 分析结果显示,在盐基饱和度、pH、交换性钙、镁离子和速效钾的因子荷载较高的 F1 主成分与水稻产量之间具有一定程度的相关性,研究区内土壤酸化导致的钙、镁离子的缺乏(表 1)可能会影响水稻的生长。调整土壤 pH 或补充中量元素的供应,也是今后施肥过程中需要加强的方面。

进贤县地处鄱阳湖流域,水资源丰富,全县水域、耕地、山丘各占总面积的 30% 左右。一般而言,稻田长期的淹水特征,增加了水稻土潜育化的可能性^[19]。然而,近年来,研究区开挖沟渠,兴建湖区水利设施,稻田的排灌系统不断完善,灌溉设施状况得以优化,加之,大量化肥的投入,使得土壤潜育化作用对水稻生长的影响有所减弱。

4 结论

影响作物生产的土壤因素会随着耕作管理措施的变化而改变,土壤钾素和物理结构是当前影响江西省进贤县水稻生产的两大关键因素。尽管大量化肥的投入,钾素依然是限制水稻生长的主要养分因子;耕作强度的减弱、有机肥投入的减少,可能导致的土壤结构退化也会影响到水稻的生长。进一步完善稻田排灌系统、适当调整土壤 pH、加强钾素的供应、补充中量元素的供应、重视并改善土壤物理结构问题,可能会对今后的水稻生产起到一定积极作用。

参考文献:

- [1] 赵其国,周生路,吴绍华,任奎. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 662-672
- [2] 闫慧敏,黄河清,肖向明,姜鲁光. 鄱阳湖农业区多熟种植时空格局特征遥感分析[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4 517-4 523
- [3] 赖庆旺,刘勋,黄庆海. 鄱阳湖地区水稻土潜育化的发生及其改良对策[J]. 中国农业科学, 1989, 22(4): 65-74
- [4] 文帮勇,杨忠芳,侯青叶,杨晓燕,尹国胜,袁存堤. 江西鄱阳湖地区土壤酸化与人为源氮的关系[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 562-568
- [5] 蒋小燕,张琴,谢振东. 鄱阳湖及周边经济区表层土壤营养元素分布现状与丰缺评价[J]. 地质调查与研究, 2010, 33(3): 226-231
- [6] 江西省土地利用管理局,江西省土壤普查办公室. 江西土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 368-372
- [7] 进贤县人民政府. 进贤县土地利用总体规划(2006—2020)说明[EB/OL]. <http://ncjxx.jxggt.gov.cn/News.shtml?p5=25883762>. 2012-06-28
- [8] 进贤县农业区划委员会. 进贤县土壤[M]. 江西进贤: 江西省进贤县印刷厂, 1985
- [9] 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
- [10] 高颀,张清,崔运成,李筱琳,滕飞,李蒙,陈智文. 研磨方法对土壤速效钾测定值的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 152-156
- [11] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 53-56, 60, 79
- [12] 杜加银,茹美,倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 523-533
- [13] 袁东海,王兆骞,陈欣,郭新波,张如良. 不同农作措施下红壤坡耕地土壤钾素流失特征的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1 257-1 260
- [14] RF Brennan, MDA Bolland, JW Bowden. Potassium deficiency, and molybdenum deficiency and aluminium toxicity due to soil acidification, have become problems for cropping sandy soils in south-western Australia[J]. Animal Production Science, 2004, 44(10): 1 031-1 039

- [15] 尹永强, 何明雄, 邓明军. 土壤酸化对土壤养分及烟叶品质的影响及改良措施[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(1): 51–54
- [16] Dong WY, Zhang XY, Wang HM, Dai XQ, Sun XM, Qiu WW, Yang FT. Effect of different fertilizer application on the soil fertility of paddy soils in red soil region of southern China[J]. Plos ONE, 2012, 7(9): e44504
- [17] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 李冬初, 宝川靖和, 八木一行. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51–56
- [18] 袁颖红, 樊后保, 李燕燕, 刘文飞, 廖迎春, 沈芳芳, 黄荣珍. 模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 461–466
- [19] 唐建军, 李达模, 苏以荣. 水稻耐土壤潜育性及其鉴定评价方法的研究与应用[J]. 湖南农业科学, 1990(4): 44–45

Limiting Soil Factors on Rice Yield in Typical Area of Poyang Lake Region, China

YAO Li-peng^{1,2}, HUANG Biao^{1*}, SUN Wei-xia¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Limiting soil factors on rice yield vary with the change in agricultural management. Identifying and analyzing the main limiting soil factors on rice production under the current conditions play a key role on decision-making in rice production management. 51 couples of soil samples and soil properties from Jinxian County in the Poyang Lake region, China, were collected and analyzed. The estimation of crop yield in the same soil sampling site was also carried out. Based on PCA for soil properties and correlation analysis between principal components and rice yield, the dominant limiting soil factors on rice production were discussed. The results indicated that 1) soil potassium factor and soil physical structure factor were significantly correlated with the rice yields as the two limiting soil factors with the Pearson coefficient of 0.325 ($P < 0.05$) and 0.411 ($P < 0.01$), respectively; 2) under the waterlogged conditions, although soil acidification contributed to rice production insignificantly, the leaching loss of base cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+} caused by soil acidification could also affect the crop production; and 3) the impact of soil gleying on rice growth was weakened with the improvement of drainage and irrigation facilities in the paddy.

Key words: Soil factor; Changing; Limiting factor; Rice yield; Paddy soil; Cultivation region for double-cropping rice in Central China