DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.00899

土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响

曾勇军 周庆红 吕伟生 谭雪明 潘晓华 石庆华*

江西农业大学 / 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室 / 江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 江西南昌 330045

摘 要: 土壤 pH 是影响水稻生长的重要因素, 目前还不清楚土壤酸化对双季水稻产量的影响。本研究利用硫酸调节土壤 pH 结合移栽后浇灌不同 pH 的水使土壤酸化。结果表明, 随着土壤 pH 的下降, 双季早、晚稻生育期延长, 物质生产量下降, 产量降低, 当浇灌水 pH 下降至 4.5 以下, 土壤 pH 下降至 5.0 以下时, 双季早、晚稻产量下降明显, 其中早稻平均下降 7.82%, 晚稻平均下降 8.06%; 当浇灌水 pH 下降至 3.5 以下, 土壤 pH 下降至 4.5 以下时, 双季早、晚稻产量下降幅度更大。土壤酸化主要抑制双季早、晚稻前期分蘖的发生, 导致每穗粒数降低, 结实率和千粒重也表现出下降的趋势。

关键词: 土壤酸化; 双季水稻; 产量; 产量构成

Effects of Soil Acidification on the Yield of Double Season Rice

ZENG Yong-Jun, ZHOU Qing-Hong, LÜ Wei-Sheng, TAN Xue-Ming, PAN Xiao-Hua, and SHI Qing-Hua*

Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding of Jiangxi Province / Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: Soil pH is one of the important factors affecting rice growth and development, but little is known about the impact of soil acidification on the yield of double season rice. In the pot experiment, sulfuric acid was added to the soil and low pH water was used for irrigation after transplanting. The results showed that with the decrease of soil pH the plant growth duration extended, the dry mass accumulation and the grain yield decreased in double season rice. When the pH of irrigated water lowered than 4.5 and soil pH lowered than 5.0, the yield of double season rice decreased significantly, by 7.82% for early season rice and by 8.06% for late season rice. When the pH of irrigated water lowered than 3.5 and the soil pH lowered than 4.5, the yield of double season rice decreased even more sharply. Under the condition of soil acidification, the early tillering for double season rice was suppressed, leading to decrease of number of spikelets per panicle, seed setting rate and 1000-grain weight.

Keywords: Soil acidification; Double season rice; Yield; Yield components

土壤酸化是当今国际社会最引人注目的环境问题之一。从世界范围来看, 酸性土壤主要分布在热带、亚热带以及温带, 包括北欧和北美的灰化土地地区, 而我国的土壤酸化主要发生在长江以南地区^[1], 面积约为 200 万公顷^[2]。目前南方大部分土壤的 pH 值已下降至 5.5 以下, 其中很大一部分小于 5.0, 甚至是 4.5^[1]。王志刚等^[3]研究表明, 不同土壤类型的酸化程度存在差异, 与潮土、棕壤土等其他土壤类型相比, 水稻土酸化现象最为严重。魏林根等^[4]对江西省 472 个土壤监测点的土壤 pH 研究表明, 49 个县

市中有 41 个县市的土壤平均 pH 在 5.5 以下, 为典型的酸性土, 占总县市数的 83.7%, 全省土壤的平均 pH 已由 1980 年的 5.56 下降至目前的 5.22。土壤酸化的成因一般认为与化肥特别是氮肥的过量施用、工业污染以及农药的不科学使用有关^[1,5]。随着人口的增加和工业的发展, 我国南方的土壤酸化问题将日趋严重。土壤酸化条件下, H^+ 和 Al^{3+} 增加, 造成 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等盐基离子的大量淋失和有毒重金属的活化^[6], 进而影响作物的生长, 但目前关于土壤酸化对作物生长影响的研究主要集中在玉米^[7]、烟草^[8]、

本研究由国家自然科学基金项目(30960186)和国家科技支撑计划项目(2011BAD16B04)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 石庆华, E-mail: qinghua.shi@163.com

第一作者联系方式: E-mail: zengyj2002@163.com

Received(收稿日期): 2013-10-11; Accepted(接受日期): 2014-01-12; Published online(网络出版日期): 2014-03-25.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140325.0911.003.html>

油菜^[9]等旱地作物,对水稻方面的研究则相对较少。

水稻是我国的主要粮食作物,对粮食安全有举足轻重的地位。一般认为,水稻是耐酸性较强的作物,在 pH 5.0~6.0 条件下也能正常生长,苗期甚至能耐受 pH 4.5 的酸性环境,但生育中后期对酸性的耐受力则有所下降。随着土壤酸化问题的日趋严重,土壤酸化对水稻生长的影响正逐渐引起人们的重视。汪晓丽等^[10]研究认为低 pH 对水稻幼苗通气组织的形成有较大影响;刘拥海等^[11]研究认为低 pH 对水稻幼苗根系生长存在显著影响;时丽冉等^[12]研究认为低 pH 条件下旱稻的保护酶活性显著上升。但关于土壤酸化对水稻产量的影响鲜有报道。本研究拟探明土壤酸化对双季稻产量的影响,为评估土壤酸化对双季水稻产量的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2010—2012 年在江西农业大学农业科技示范园网室进行盆栽试验,供试土壤为该示范园的水稻土,其 pH 6.13,含有机质 25.8 g kg⁻¹、碱解氮 71.2 mg kg⁻¹、速效磷 51.6 mg kg⁻¹、速效钾 127.3 mg kg⁻¹。将土壤晒干粉碎后装入上部直径为 32 cm、底部直径为 25 cm、高为 30 cm 的塑料桶,每桶装干土 16.0 kg。移栽前根据预备试验所得参数用硫酸将土壤 pH 分别调整为 5.5、4.5 和 3.5 左右,对照不予酸处理。移栽后分别浇灌 pH 5.5、4.5、3.5 的水,对照浇灌自来水,各处理返青期灌 2~3 cm 的浅水,分蘖期灌 1~2 cm 的薄水,每蔸茎蘖数达 8 根时晒田,孕穗至抽穗期保持 2~3 cm 的浅水,抽穗后田间实行干湿交替处理,自来水 pH 为 6.5,试验区网室顶部用透明塑料薄膜遮盖以防止雨水进入,其他管理条件均相同,每处理重复 10 次,浇灌水的 pH 用 H₂SO₄ 逐步稀释法配制。试验过程中,每 20 d 测定一次土壤 pH。

1.2 材料种植

双季早、晚稻供试品种分别为淦鑫 203、金优 458、先农 25 和淦鑫 688、天优华占、汕优 10 号。每桶施纯氮 1.65 g,折合尿素 3.59 g,按基肥 分蘖肥 穗肥=5 2 3 施用;施钾(K₂O)量为 1.8 g,折合氯化钾 3.0 g,按基肥 分蘖肥 穗肥=7 0 3 施用;施磷(P₂O₅)量为 0.9 g,折合钙镁磷肥 7.5 g,全部作基肥施用。早稻于 2010 年 3 月 27 日播种,4 月 27 日移栽,2011 年于 3 月 29 日播种,4 月 27 日移栽,

2012 年 3 月 28 日播种,4 月 28 日移栽,每桶移栽 3 蔸苗,每蔸插 2 粒谷苗;晚稻于 2010 年和 2011 年 6 月 28 日播种,7 月 26 日移栽,2012 年 6 月 29 日播种,7 月 27 日移栽,每桶移栽 3 蔸苗,每蔸插 2 粒谷苗。

移栽后每 5 d 调查一次茎蘖动态;于分蘖期、幼穗分化 II 期、齐穗期和成熟期各取 1 桶(3 株)植株在 105℃ 下杀青,80℃ 下烘干称重,测定干物质生产量,成熟期取 6 株考种,调查理论产量,并实割 12 株测定实际产量。

1.3 分析和统计方法

用 1 mol L⁻¹ 的 NaCl 溶液浸提后以电位法测定土壤 pH。

利用 DPS 统计软件和 Microsoft Excel 统计分析,用 LSD 测验同一品种处理与对照间差异显著性。由于 3 年结果较为一致,文中数据除特别说明外均为 3 年平均数。

2 结果与分析

2.1 土壤酸化处理下土壤 pH 的变化

不同酸化处理下,土壤 pH 均随着移栽日数的增加表现出上升的趋势(图 1),移栽后 20~40 d 内土壤 pH 迅速上升,此后又有所下降,但土壤不同酸化处理下早、晚稻移栽后土壤 pH 上升的幅度存在差异,随着浇灌水 pH 的降低,土壤 pH 上升幅度增加。pH 3.5、4.5、5.5 和对照处理的早稻移栽后土壤 pH 分别在 3.52~4.49、4.51~5.04、5.53~5.77、6.01~6.15 范围内波动;晚稻移栽后土壤 pH 分别在 3.49~4.53、4.52~5.02、5.51~5.70、6.15~6.21 范围内波动。

2.2 土壤酸化对双季稻产量的影响

表 1 显示,随着浇灌水 pH 的下降,早、晚稻各品种各年度的产量及平均产量均表现出下降的趋势,但年度间差异不显著。与对照相比,pH 为 5.5 酸处理各品种的产量均有所下降,但差异未达显著水平;当浇灌水 pH 下降至 4.5,土壤 pH 下降至 5.0 以下时,早稻 3 品种产量平均下降 7.82%,晚稻 3 品种产量平均下降 8.06%;当浇灌水 pH 下降至 3.5,土壤 pH 下降至 4.0 以下时,双季稻产量下降幅度更大,早、晚稻产量分别下降 30.09%和 19.15%。

从早、晚稻不同品种对土壤酸化的反应看(图 2 和图 3),当浇灌水 pH 分别为 5.5 和 4.5 时,各品种产量下降的百分率之间没有显著差异,但当浇灌水 pH 下降至 3.5 时,早稻中淦鑫 203 和先农 25 产量下

图 1 不同土壤酸化处理下早、晚稻移栽后土壤的 pH 变化
Fig. 1 Changes of soil pH after transplanting for early and late rice under soil acidification condition

表 1 土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响
Table 1 Effects of soil acidification on yield of double season rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	产量 Yield (g hill ⁻¹)			
		2010	2011	2012	平均 Average
早稻 Early rice					
淦鑫 203 Ganxin 203	pH 3.5	18.20 c	19.02 c	19.80 c	19.41 c
	pH 4.5	26.92 b	25.90 b	26.38 b	26.40 b
	pH 5.5	27.45 ab	27.79 a	26.48 ab	27.24 ab
	CK	28.68 a	28.40 a	28.04 a	28.37 a
金优 458 Jinyou 458	pH 3.5	21.52 c	20.05 c	19.82 c	20.46 c
	pH 4.5	24.98 b	24.99 b	24.42 b	24.80 b
	pH 5.5	25.68 ab	25.61 ab	25.16 ab	25.48 ab
	CK	26.88 a	25.96 a	26.53 a	26.46 a
先农 25 Xiannong 25	pH 3.5	16.17 c	17.41 c	16.38 c	16.90 c
	pH 4.5	23.66 b	22.11 b	22.98 b	22.92 b
	pH 5.5	25.41 a	24.10 a	26.25 a	25.25 a
	CK	25.95 a	24.35 a	26.33 a	25.54 a
晚稻 Late rice					
淦鑫 688 Ganxin 688	pH 3.5	22.11 c	19.63 c	19.49 c	20.08 c
	pH 4.5	24.82 b	23.30 b	22.44 b	23.52 b
	pH 5.5	26.88 a	25.76 a	24.87 a	25.84 a
	CK	26.22 ab	25.40 a	26.97 a	26.20 a
天优华占 Tianyouhuazhan	pH 3.5	20.73 c	18.90 c	19.46 b	19.70 c
	pH 4.5	22.06 b	22.88 b	21.89 a	22.28 b
	pH 5.5	24.15 a	23.43 ab	21.91 a	23.16 ab
	CK	25.21 a	24.42 a	22.99 a	24.21 a
汕优 10 号 Shanyou 10	pH 3.5	24.25 c	24.67 c	24.42 b	24.45 c
	pH 4.5	26.52 b	26.69 b	28.29 a	27.17 b
	pH 5.5	27.21 ab	27.61 ab	29.21 a	28.01 ab
	CK	27.91 a	29.47 a	29.52 a	28.97 a

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

降幅度均显著大于金优458, 表明这2个品种对土壤酸化的耐性相对较差; 而产量下降幅度以晚稻中的淦鑫688最大, 天优华占次之, 汕优10号最小, 淦鑫688与汕优10号下降幅度差异达显著水平, 表明

淦鑫688对土壤酸化的耐性相对较差。从图中还可以看出,当浇灌水 pH 下降至3.5时,早稻各品种产量的下降幅度平均为30.09%,而晚稻为19.15%,表明在本试验条件下早稻耐土壤酸化的能力要弱于晚稻。

2.3 土壤酸化对双季稻产量构成的影响

表 2、表 3 显示,除 pH 3.5 处理的早稻品种有效穗数较低外,早、晚稻其余处理间有效穗数差异较小,表明土壤酸化对双季稻有效穗数影响较小。但随着土壤酸化程度的增加,早晚每穗粒数、结实率和千粒重均表现下降趋势。

2.4 土壤酸化对双季稻分蘖的影响

由图 4 和图 5 可知,双季早、晚稻的茎蘖动态除 pH 5.5 处理的与对照基本一致外,其他处理与对照有较大差异。土壤酸化处理下双季早、晚稻各品种的分蘖发生速率、高峰苗数量均低于对照,其后期分蘖的下降速率也较小,各处理间的成穗数量差异不大,表明土壤酸化处理主要对双季早、晚稻前期分蘖有一定的抑制作用,但其后期发生的小分蘖也能成穗,从一定程度上弥补了穗数的不足。

图 2 早稻不同酸处理下各品种产量下降百分率
Fig. 2 Rates of yield dropped for different early rice cultivars under soil acidification condition

图 3 晚稻不同酸处理下各品种产量下降百分率
Fig. 3 Rates of yield dropped for different late rice cultivars under soil acidification condition

表 2 土壤酸化对双季早稻产量构成的影响
Table 2 Effects of soil acidification on yield components of early rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	有效穗 Effective panicles per hill	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Filled grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (%)
淦鑫 203 Ganxin 203	pH 3.5	9.34 b	89.77 c	84.42 b	26.87 b
	pH 4.5	10.21 a	102.13 b	85.99 ab	27.83 ab
	pH 5.5	10.32 a	109.11 ab	86.21 a	28.18 a
	CK	10.68 a	109.44 a	86.60 a	28.21 a
金优 458 Jinyou 458	pH 3.5	9.15 b	94.68 b	79.99 b	25.64 b
	pH 4.5	10.38 a	112.77 a	81.32 ab	25.94 ab
	pH 5.5	10.66 a	113.90 a	81.12 ab	26.55 a
	CK	10.71 a	114.39 a	82.08 a	26.50 a
先农 25 Xiannong 25	pH 3.5	8.99 b	81.29 c	81.33 c	26.25 b
	pH 4.5	10.12 a	104.12 b	82.35 bc	26.79 ab
	pH 5.5	10.34 a	111.50 a	83.91 ab	27.20 a
	CK	10.31 a	111.03 a	84.21 a	27.35 a

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

2.5 土壤酸化对双季稻物质生产的影响

表 4 和表 5 表明,双季早、晚稻各主要生育时期的物质积累量有随 pH 的降低而下降的趋势。各品种分蘖期和幼穗分化 II 期的物质积累明显下降, pH

3.5 和 pH 4.5 处理与对照差异显著,至齐穗期以后,除 pH 3.5 处理的干物质积累量下降严重外,其余各酸处理的干物质积累量差异较小。齐穗至成熟期物质生产量则有随土壤 pH 下降而下降的趋势。

表 3 土壤酸化对双季晚稻产量构成的影响
Table 3 Effects of soil acidification on yield components of late rice

品种	处理	有效穗	每穗粒数	结实率	千粒重
Cultivar	Treatment	Effective panicles per hill	Spikelets per panicle	Filled grain percentage (%)	1000-grain weight (%)
淦鑫 688 Ganxin 688	pH 3.5	9.93 a	101.18 c	78.94 b	26.07 b
	pH 4.5	9.85 a	117.96 b	83.45 a	26.95 ab
	pH 5.5	9.39 a	121.28 ab	84.09 a	27.39 a
	CK	9.23 a	126.45 a	84.30 a	27.11 a
天优华占 Tianyouhuazhan	pH 3.5	9.86 a	134.36 b	71.64 b	23.06 b
	pH 4.5	10.12 a	136.17 b	82.43 a	24.55 a
	pH 5.5	9.64 a	140.80 ab	86.09 a	24.59 a
	CK	9.71 a	142.72 a	85.68 a	24.75 a
汕优 10 号 Shanyou 10	pH 3.5	8.87 a	137.82 c	83.02 a	24.73 b
	pH 4.5	9.06 a	145.28 b	83.51 a	25.30 ab
	pH 5.5	8.78 a	149.30 ab	85.51 a	25.39 ab
	CK	8.65 a	156.99 a	84.76 a	25.66 a

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

图 4 土壤酸化对早稻分蘖动态的影响
Fig. 4 Effects of soil acidification on tillering dynamics of early rice

图 5 土壤酸化对晚稻分蘖动态的影响
Fig. 5 Effects of soil acidification on tillering dynamic of late rice

表 4 土壤酸化对双季早稻各生育期物质积累量的影响
Table 4 Effects of soil acidification on dry matter accumulation of different stages for early rice (g hill⁻¹)

品种 Cultivar	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	幼穗分化 II 期 Panicle initiation	齐穗期 Full heading	成熟期 Maturity
淦鑫 203 Ganxin 203	pH 3.5	1.04 c	3.46 c	19.64 b	30.28 c
	pH 4.5	1.79 b	6.76 b	24.15 a	40.28 b
	pH 5.5	3.08 a	9.18 a	24.12 a	41.04 ab
	CK	3.23 a	10.27 a	25.18 a	42.87 a
金优 458 Jinyou 458	pH 3.5	1.06 c	3.82 c	20.66 b	32.89 b
	pH 4.5	1.85 b	6.80 b	23.14 a	39.33 a
	pH 5.5	3.11 a	9.88 a	23.72 a	40.66 a
	CK	3.23 a	9.70 a	23.94 a	40.86 a
先农 25 Xiannong 25	pH 3.5	0.87 c	4.34 c	17.01 c	27.94 c
	pH 4.5	1.71 b	7.30 b	23.87 b	36.04 b
	pH 5.5	2.59 a	9.68 a	26.64 a	38.74 a
	CK	2.65 a	9.53 a	26.32 a	38.42 a

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

表 5 土壤酸化对双季晚稻各生育期物质积累量的影响
Table 5 Effects of soil acidification on dry matter accumulation of different stages for late rice (g hill⁻¹)

品种 Cultivar	处理 Treatment	分蘖期 Tillering	幼穗分化 II 期 Panicle initiation	齐穗期 Full heading	成熟期 Maturity
淦鑫 688 Ganxin 688	pH 3.5	1.89 c	5.93 c	21.13 c	33.05 c
	pH 4.5	2.36 b	9.62 b	25.57 b	38.08 b
	pH 5.5	4.14 a	14.31 a	28.55 a	41.88 a
	CK	4.17 a	15.46 a	29.33 a	42.64 a
天优华占 Tianyouhuazhan	pH 3.5	1.90 c	6.01 c	22.38 c	32.76 c
	pH 4.5	2.91 b	9.58 b	24.37 b	36.14 b
	pH 5.5	3.68 a	12.30 a	26.00 ab	37.78 ab
	CK	3.96 a	14.33 a	26.80 a	38.63 a
汕优 10 号 Shanyou 10	pH 3.5	2.01 c	5.34 c	26.59 b	39.97 b
	pH 4.5	2.51 b	8.10 b	30.03 a	44.14 a
	pH 5.5	3.96 a	12.66 a	30.62 a	45.39 a
	CK	4.37 a	14.17 a	31.25 a	46.08 a

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

2.6 土壤酸化对双季稻生育进程的影响

表 6 和表 7 显示, 随着浇灌水 pH 的下降, 双季早、晚稻始穗期推迟, 全生育期延长。与对照相比, pH 5.5、4.5 和 3.5 的早稻各处理始穗期平均推迟 0.6 d、2.3 d 和 4.8 d, 生育期分别延长 0.8 d、3.9 d 和 6.7 d, 与对照差异显著; 晚稻各处理始穗期平均推迟 0.6 d、3.8 d 和 9.0 d, 生育期则分别延长 1.1 d、4.4 d 和 8.4 d, 与对照差异显著。

3 讨论

由于水稻是耐酸性较强的作物^[13], 因此长期以来土壤酸化对水稻生长的影响未被引起重视。随着近年来土壤酸化的不断加剧, 该影响已开始引起人们的关注^[14-16], 但到目前为止, 关于土壤酸化对水稻生长及产量的影响并不明确。一般认为, 水稻苗期耐酸性较强, 但生育后期耐酸能力则有所下降。

表 6 土壤酸化对双季早稻生育进程的影响
Table 6 Effects of soil acidification on growth process of early rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	始穗期 Initial heading date (month/day)			全生育期 Growth duration (d)			
		2010	2011	2012	2010	2011	2012	平均 Average
淦鑫 203 Ganxin 203	pH 3.5	6/20	6/21	6/20	119	118	119	118.7 a
	pH 4.5	6/18	6/18	6/17	117	115	116	116.0 b
	pH 5.5	6/16	6/17	6/16	114	113	112	113.0 c
	CK	6/16	6/16	6/15	112	113	111	112.0 c
金优 458 Jinyou 458	pH 3.5	6/20	6/19	6/20	116	114	116	115.3 a
	pH 4.5	6/17	6/17	6/17	114	112	112	112.7 b
	pH 5.5	6/16	6/16	6/15	110	110	109	109.7 c
	CK	6/16	6/15	6/15	110	109	109	109.3 c
先农 25 Xiannong 25	pH 3.5	6/19	6/20	6/20	116	116	117	116.3 a
	pH 4.5	6/17	6/19	6/17	113	113	114	113.3 b
	pH 5.5	6/15	6/15	6/15	111	109	110	110.0 c
	CK	6/13	6/15	6/15	109	109	109	109.0 c

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

表 7 土壤酸化对双季晚稻生育进程的影响
Table 7 Effects of soil acidification on growth process of late rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	始穗期 Initial heading date (month/day)			全生育期 Growth duration (d)			
		2010	2011	2012	2010	2011	2012	平均 Average
淦鑫 688 Ganxin 688	pH 3.5	9/18	9/20	9/22	126	127	128	127.0 a
	pH 4.5	9/14	9/15	9/17	122	124	124	123.3 b
	pH 5.5	9/11	9/11	9/13	119	119	120	119.3 c
	CK	9/10	9/11	9/13	118	119	119	118.7 c
天优华占 Tianyouhuazhan	pH 3.5	9/21	9/21	9/23	126	127	128	127.0 a
	pH 4.5	9/15	9/15	9/17	123	123	124	123.3 b
	pH 5.5	9/12	9/13	9/14	120	121	121	120.7 c
	CK	9/12	9/12	9/13	119	119	119	119.0 d
汕优 10 号 Shanyou 10	pH 3.5	9/21	9/22	9/24	131	132	133	132.0 a
	pH 4.5	9/16	9/17	9/19	127	127	128	127.3 b
	pH 5.5	9/13	9/14	9/15	123	124	125	124.0 c
	CK	9/13	9/13	9/14	123	123	123	123.0 c

按照 LSD 测验($\alpha=0.05$)标以相同字母的值差异不显著。
Values followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD test.

全松华等^[17]研究表明苗床土壤 pH 值为 5.0 时, 秧苗百株干重大, 带蘖率高, 秧苗素质好, 耐低温能力较强, 是水稻苗床的适宜 pH 值。而刘少华等^[18]以两优培九为材料研究根际 pH 对水稻幼苗生长的影响后认为, 土壤 pH 为 6.0 条件下水稻的幼苗生长最好。喻崎雯等^[19]研究不同土壤 pH 对普通野生稻生理特性的影响表明, 普通野生稻对中性偏碱环境的适应性较强, 适宜的环境 pH 范围为 6.0~7.4。本研究表明, 当土壤 pH 下降至 5.0 以下时, 水稻生长明显受阻, 产量显著下降, 特别是当土壤 pH 下降至

4.5 以下时, 产量下降更为明显。本研究采用盆栽试验, 土壤采用酸化后结合酸水浇灌处理, 土壤 pH 变化与大田土壤有一定差异, 盆栽中的秧苗生长与大田生长也有一定区别, 另外, 土壤 pH 下降还会带来活性铝的溶出和有毒重金属的活化等一系列深层次问题, 因此, 相关研究还有待于进一步深入。

关于土壤酸化影响双季稻产量的原因目前还未见有任何报道。本研究条件下, 随着浇灌水和土壤 pH 的降低, 双季稻前期分蘖生长受到抑制, 由于前期发生的分蘖均为低位分蘖, 因此土壤酸化处理影

响了大穗形成,导致每穗粒数下降。同时,土壤酸化条件下双季稻始穗期推迟、齐穗至成熟期物质生产量下降,结实率和千粒重也表现出下降的趋势,产量降低。本文仅从双季稻产量构成、分蘖动态、物质积累及生育进程等方面做了初步研究,而土壤酸化对双季稻生长的影响是多方面的,因此有必要从根系生长、养分吸收、光合生产等方面进一步深入研究。

由于土壤酸化主要与化肥特别是氮肥的过量施用有关^[1,5],因此,从农业措施上说,要防治土壤酸化最主要的是减少化肥特别是氮肥的施用,通过增加有机肥和生物肥料的施用,防止土壤进一步酸化,对于已经酸化的土壤,可以通过适量施用石灰来提高土壤 pH。另外,本研究结果也表明,双季稻品种对土壤酸化的耐性存在差异,因此,通过培育和筛选耐土壤酸化的双季稻品种进而减轻土壤酸化带来的产量损失有可能是应对土壤酸化的重要方面,同时,本试验中,早稻品种的耐酸化能力要弱于晚稻,其原因可能与早稻生长前期温度较低,分蘖的发生受到的抑制作用较重,而晚稻生长前期温度较高,分蘖受抑制的程度较轻有关,因此,通过加强田间管理,如提高土壤温度等也有可能从一定程度上缓解土壤酸化对水稻产量的影响。

4 结论

随着土壤 pH 的下降,双季早、晚稻始穗期推迟,生育期延长,物质生产量下降,产量降低。土壤酸化主要抑制双季早、晚稻前期分蘖的发生,导致每穗粒数降低,结实率和千粒重也表现出下降的趋势。

References

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008–1010
- [2] 赵其国. 我国红壤的退化问题. *土壤*, 1995, (6): 281–285
Zhao Q G. The Problems of Red Soil Degradation in China. *Soils*, 1995, (6): 281–285 (in Chinese)
- [3] 王志刚, 赵永存, 廖启林, 黄标, 孙维侠, 齐雁冰, 史学正, 于东升. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力. *生态学报*, 2008, 28: 720–727
Wang Z G, Zhao Y C, Liao Q L, Huang B, Shun W X, Qi Y B, Shi X Z, Yu D S. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28: 720–727 (in Chinese with English abstract)
- [4] 魏林根, 李建国, 刘光荣, 苏全平, 杨涛, 范芳. 江西土壤环境质量与绿色食品可持续发展. *江西农业学报*, 2008, 20(1): 159–162
Wei L G, Li J G, Liu G R, Shu Q P, Yang T, Fan F. Soil environmental quality and sustainable development of green food in Jiangxi. *Acta Agric Jiangxi*, 2008, 20(1): 159–162 (in Chinese)
- [5] 李继红. 我国土壤酸化的成因与防控研究. *农业灾害研究*, 2012, 2(6): 42–45
Li J H. Study on the cause, prevention and control of soil acidification in China. *J Agric Catastrophol*, 2012, 2(6): 42–45 (in Chinese with English abstract)
- [6] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究. *华南热带农业大学学报*, 2006, 12(1): 23–28
Yi J X, Lü L X, Liu G D. Research on soil acidification and acidic soil's melioration. *J South China Univ Trop Agric*, 2006, 12(1): 23–28 (in Chinese with English abstract)
- [7] Walter A, Silk W K, Schurr U. Effect of soil pH on growth and cation deposition in the root tip of *Zea mays* L. *J Plant Growth Regul*, 2000, 19: 65–76
- [8] 郭培国, 陈建军, 李荣华. pH 值对烤烟根系活力及烤后烟叶化学成分的影响. *中国农业科学*, 2000, 33: 39–45
Guo P G, Chen J J, Li R H. Effects of pH values on the activity of roots and chemical compositions of the cured leaves in flue-cured tobacco. *Sci Agric Sin*, 2000, 33: 39–45 (in Chinese with English abstract)
- [9] 马成仓, 洪法水. pH 对油菜种子萌发和幼苗生长代谢的影响. *作物学报*, 1998, 24: 509–512
Ma C C, Hong F S. Effect of pH on seed germination and seedlings growth and metabolism in rape. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 509–512 (in Chinese)
- [10] 汪晓丽, 司江英, 陈冬梅, 封克. 低 pH 条件下不同氮源对水稻根通气组织形成的影响. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2005, 26(2): 66–70
Wang X L, Si J Y, Chen D M, Feng K. Effects of different nitrogen sources on rice root aerenchyma formation at low pH level. *J Yangzhou Univ (Agric & Life Sci Edn)*, 2005, 26(2): 66–70 (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘拥海, 俞乐, 吴国创. 不同 pH 值条件下酸铝对水稻种子萌发和根系生长的影响. *安徽农业科学*, 2008, 36: 4397–4398
Liu Y H, Yu L, Wu G C. Influences of acid-Al on the seed germination and root growth of rice under different pH values. *J Anhui Agric Sci*, 2008, 36: 4397–4398 (in Chinese with English abstract)
- [12] 时丽冉, 刘志华, 白丽荣, 李凯, 孙明星. 不同 pH 值对旱稻幼苗保护酶活性的影响. *江苏农业科学*, 2008, 36(5): 34–35
Shi L R, Liu Z H, Bai L R, Li K, Shun M X. Effects of different pH on the activities of protective enzyme in upland rice. *Jiangsu Agric Sci*, 2008, 36(5): 34–35 (in Chinese)
- [13] Fageria N K, Dos Santos A B, De Moraes M F. Influence of urea and ammonium sulfate on soil acidity indices in lowland rice production. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2010, 41: 1565–1575
- [14] Fageria N K, Castro E M, Baligar V C. Response of Upland Rice Genotypes to Soil Acidity, The Red Soils of China. Embrapa: Kluwer Academic Publishers, 2004. pp 219–237
- [15] Xiang J, Haden V R, Peng S B, Bouman B A M, Visperas R M, Nie L X, Huang J L, Cui K H. Improvement in nitrogen availability, nitrogen uptake and growth of aerobic rice following soil acidification. *Soil Sci Plant Nutr*, 2009, 55: 705–714

- [16] Bhaskaran U P D, Varghese, T D. Effect of submergence on alleviation of soil acidity and availability of nutrients in a rice-rice ecosystem. In: The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI. Department of Plant Sciences, UC Davis, 2009. pp 213–222
- [17] 全松华, 汪永国, 罗绍球, 唐方兰. 苗床土壤 pH 值对水稻秧苗素质的影响. 杂交水稻, 2004, 19(4): 45–46
Quan S H, Wang Y G, Luo S Q, Tang F L. Effects of the pH value of bed soil on seedling quality in rice. *Hybrid Rice*, 2004, 19(4): 45–46 (in Chinese)
- [18] 刘少华, 谢鹏飞, 徐国华, 王仁雷. 根际 pH 值对高产杂交稻幼苗根系生长特性的影响. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 70–72
Liu S H, Xie P F, Xu G H, Wang R L. The effects of rhizosphere pH on the growth characteristics of high yielding hybrid rice seedling roots. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(1): 70–72 (in Chinese)
- [19] 喻崎雯, 马祖陆, 伊文超, 梁晓. 不同土壤 pH 对普通野生稻生理特性的影响. 安徽农业科学, 2013, 41: 473–475
Yu Q W, Ma Z L, Yi W C, Liang X. Effects of soil pH on physiological characteristics of *Oryza rufipogon* Griff. *J Anhui Agric Sci*, 2013, 41: 473–475 (in Chinese with English abstract)