

长期施肥下我国灌淤土粮食产量和土壤养分的变化

段英华¹, 卢昌艾¹, 杨洪波¹, 马常宝², 刘亚男^{2,3}, 徐明岗^{1,3*}

(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 农业部耕地质量监测保护中心, 北京 100125; 3 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091)

摘要:【目的】灌淤土是我国西北地区重要的粮食和经济作物土壤。了解灌淤土上作物产量的变化, 及其对长期施肥的响应, 以及灌淤土生产力的变化与其氮磷钾含量的关系, 为西北地区作物增产和灌淤土培肥与可持续利用提供理论依据。【方法】1988 到 2004 年间, 在宁夏银川市、吴忠市、石嘴山市和新疆和田市典型灌淤土区域陆续建立了 7 个国家耕地质量监测点。2016 年, 利用时间趋势分析法, 探讨了作物产量随时间的变化趋势, 分析了长期不施肥和常规施肥条件下, 玉米、小麦和水稻产量、产量变异系数、可持续性指数、增产率及地力贡献指数的变化特征, 并进一步探讨了增产率与土壤养分的关系。【结果】灌淤土上小麦产量随时间呈现递增的趋势, 在 2004 年达到最高 (7.58 t/hm²), 之后保持稳定, 2016 年约为初始年产量的 3 倍; 玉米产量随时间一直呈递增趋势, 2016 年平均产量为 9.8 t/hm², 约为初始年的两倍; 水稻产量近年来变化不大。与不施肥相比, 常规施肥下小麦、玉米 (28 年间) 和水稻 (8 年间) 分别平均增产 3.43 倍、3.20 倍和 1.21 倍, 产量可持续性指数分别提高了 18.8%、148% 和 13.9%。监测以来, 小麦和玉米农田的地力贡献指数略有下降, 但变化不显著。水田的地力贡献指数以每年 0.0125 的速率增加。28 年间, 常规施肥使土壤全氮含量从 0.4 g/kg 提高到 1.1 g/kg, 有效磷和速效钾含量变化不大。小麦与玉米的增产率与土壤全氮含量呈显著直线正相关关系, 小麦、玉米和水稻的平均氮肥农学效率分别为 9.8、16.8 和 27.4 kg/kg。【结论】灌淤土上常规施肥 (主要是氮肥) 有效提高了玉米、小麦和水稻的产量。土壤全氮含量呈增加趋势, 有效磷和有效钾含量基本平稳。土壤肥力对玉米和小麦产量的贡献呈下降趋势, 对水稻产量的贡献高且平稳。因此, 灌淤土应在合理施用氮肥的同时, 注重采取提升地力, 实现作物的高产和高效。

关键词: 灌淤土; 产量; 地力贡献率; 产量可持续性; 氮肥农学效率

Productivity and soil nutrient evolution under long-term conventional fertilization in irrigation silting soils

DUAN Ying-hua¹, LU Chang-ai¹, YANG Hong-bo¹, MA Chang-bao², LIU Ya-nan^{2,3}, XU Ming-gang^{1,3*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 Arable Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China; 3 South Subtropical Crop Research Institute, China Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China)

Abstract: 【Objectives】Irrigation silting soil is an important soil type for grain and economical crop production in the northwest region of China. Studying the yield and soil fertility evolvement under long-term fertilization will provide reference for choosing proper strategy to improve soil fertility and high yields. 【Methods】Seven national farmland quality monitoring field were established in typical irrigation silting soil regions during 1988–2004, four of them located at Yinchuan, Wuzhong and Shizuishan regions in Ningxia, and the other three located at Hetian region in Xinjiang Autonomous Region. The yield data were collected, and the yield variation coefficients and sustainability yield index were calculated. The soil total N, available P and available K contents were collected, and the soil fertility contribution index to the yields of wheat, maize and rice were calculated. The

收稿日期: 2018-05-13 接受日期: 2018-10-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200301); 国家自然科学基金项目 (41471247) 资助。

联系方式: 段英华 E-mail: duanyinghua@caas.cn; * 通信作者 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

relationship between yield increment and soil nutrient contents were also calculated. **【 Results 】** After the long-term conventional fertilization, the wheat yield showed an increasing trend over time, reaching the highest point (7.58 t/hm^2) at 2004, and then remained stable. The wheat yield in 2016 was about 2 times higher than the initial year. There has been an increasing trend of maize production over time, with an average production of 9.8 t/hm^2 in 2016, which is about twice of the initial year. As the relative short years for rice production, the rice yield was not significantly changed. Compared with no fertilization, conventional fertilization increased the average yields of wheat, maize and rice by 3.43, 3.20 and 1.21 times, respectively, and the sustainability of yield index by 18.8%, 148% and 13.9%, respectively. The fertility contribution index of wheat and maize were consistent during the years, with a slight downward trend, while that of rice was increased at an annual rate of 0.0125. The total soil N content was increased from 0.4 g/kg to 1.1 g/kg , and the contents of available P and K changed little over 28 years. The increment of wheat and maize yield was linearly positive correlated with soil total nitrogen contents. The average nitrogen fertilizer agronomy efficiency of wheat, maize and rice were 9.8, 16.8 and 27.4 kg/kg respectively. **【 Conclusions 】** Conventional application of chemical fertilizers (mainly nitrogen fertilizer) has effectively increased the yield of maize, wheat and rice, but the increasing intensity showed decreasing with time. The soil total nitrogen content is increasing, and available P and K contents are stable at irrigation silting soil. Therefore, reasonable nitrogen fertilizer is still the most important and necessary for keeping stable and high crop yields, and soil fertility is also need to be improved for efficient crop production in irrigation silting soils in the Northwest of China.

Key words: irrigation silting soil; crop yield; fertility contribution rate; yield sustainability index; nitrogen agronomic efficiency

灌淤土是我国内陆灌溉农业区的一种重要灌溉耕作土壤类型。该类土壤主要是经人类长期灌溉淤积和冲积、淋溶淡化、耕种培肥、生物累积而成。由于灌淤土分布地势平坦、灌溉便利、土壤肥沃、生产性能良好,是优质多宜的耕种土壤,在农业生产中具有重要地位。全国灌淤土的面积为 152.7 万公顷 ^[1],主要分布于新疆昆仑山北麓和天山南北,甘肃的河西走廊,宁夏和内蒙古的河套地区,其他省(区)也有零星分布。

灌淤土具有质地适中、土壤结构和通气状况良好、有机质和养分含量丰富的特点,是我国西北地区非常重要的土壤类型之一。如在宁夏自治区,主要土类为灌淤土的引黄灌区以 34% 的耕地生产了该区 70% 的粮食^[2]。在大多数情况下,我国灌淤土都是种植旱作的粮食作物和经济作物。但在地下水位较高的地区,为了防止土壤的次生盐渍化,有部分农田种植水稻或实行稻旱轮作。一方面,灌溉水和泥沙中的有机物质和养分元素对灌淤土肥力的提升产生了积极作用;另一方面,受淹水和排水的影响,尤其是水稻田,耕作层氧化还原作用交替,具有铁、锰的离析聚集作用,因此易形成锈纹锈斑。可见,灌淤土既是一种重要的耕作土壤,其理化性状又明显区别于其他土壤类型。

由于灌淤土形成过程的特殊性,近年来围绕灌淤土逐渐形成了研究热点。曲潇琳等^[3]阐述了灌淤土的成土特点及系统分类,吕粉桃等^[4]发现长期耕作施肥 20 年后,灌淤土有机质含量年均增加了 0.32 g/kg ,全氮含量年均增加了 0.004 g/kg ;惠锦卓等^[5]采用淋溶试验研究了添加生物炭后灌淤土土壤养分含量和氮素淋失的变化,灌淤土全氮、速效磷和速效钾含量均随着生物炭添加量的增大而显著增加,且 2% 生物炭添加可减少 49% 的硝态氮淋溶损失。然而,对于长期施肥条件涵盖不同作物类型和区域的产量和养分利用率演变特征,尚鲜见报道。本研究对国家级耕地土壤监测数据中具有代表性的 7 个灌淤土监测点连续 12~28 年粮食作物产量及施肥量数据进行统计分析,探讨了氮肥利用率与土壤养分的关系,以期对西北部灌淤土区域的施肥管理及提高作物产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

我国先后在灌淤土分布区域建立了 7 个国家级长期定位监测点,分别位于甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区和内蒙古自治区(表 1),

表 1 灌淤土监测点基本情况
Table 1 Basic information of the irrigation silting soil in monitoring sites

自治区 Autonomous	地市 City	监测起止年 Monitoring year	土壤亚类 Soil subtype	土地利用方式 Land use	种植制度 Crop system	种植作物 Crop	土壤养分含量背景值 Soil nutrient background content				
							pH	有机质 (g/kg) OM	全氮 (g/kg) Total N	有效磷 (mg/kg) Olsen-P	速效钾 (mg/kg) Available K
宁夏 Ningxia	银川市 Yinchuan	2004—2016	典型灌淤土 Typical S	旱地/水田 ^a Irrigated land/ paddy field	一年一熟 One crop year	小麦/水稻 Wheat/rice	8.2	26.1	1.34	24.3	172.4
				水田 Paddy field	一年一熟 One crop year	水稻 Rice	8.1	13.4	0.89	29.0	173.4
	石嘴山 Shizuishan	1998—2016	潮灌淤土 Aquic S	旱地 Irrigated land	一年二熟 Two crop year	冬小麦、夏玉米 Winter wheat, summer corn	NA	20.4	1.26	22.0	260.0
				旱地/水田 ^b Irrigated/ paddy field	一年二熟 Two crop year	冬小麦、夏玉米/水稻 Winter wheat, summer corn/rice	NA	14.2	0.79	15.0	127.0
新疆 Xinjiang	和田市 Hetian	1988—2016	典型灌淤土 Typical S	旱地 Irrigated land	一年二熟 Two crop year	冬小麦、夏玉米 Winter wheat, summer corn	8.1	8.0	0.46	21.0	138.0
				旱地 Irrigated land	一年二熟 Two crop year	冬小麦、夏玉米 Winter wheat, summer corn	8.3	7.2	0.44	22.3	174.0
	和田市 Hetian	1988—2016	典型灌淤土 Typical S	旱地 Irrigated land	一年二熟 Two crop year	冬小麦、夏玉米 Winter wheat, summer corn	8.4	6.4	0.34	NA	120.0
				旱地 Irrigated land	一年二熟 Two crop year	冬小麦、夏玉米 Winter wheat, summer corn					

注 (Note): S—灌淤土 Irrigation silting soil; a—2004—2007 年种植小麦, 2008 年后改为水田 Wheat during 2004—2007 and rice after 2008; b—1999、2005、2009、2013、2015 和 2016 年种植水稻, 其他年份为冬小麦—夏玉米 Rice in 1999, 2005, 2009, 2013, 2015 and 2016, and winter wheat-summer corn in other years; NA—数据缺失 No data.

各监测点均设有不施肥和常规施肥(化肥或化肥配施有机肥)2个处理,种植制度分为一年一熟和一年两熟两种,一年一熟作物为小麦、玉米、水稻、大麦、向日葵、蔬菜和棉花,一年两熟作物为小麦、玉米、水稻和棉花,土地利用类型为水田、旱地及水浇地。其中,1988年在新疆和田市建立了3个旱地监测点;1998年在宁夏石嘴山和吴忠市建立了1个旱地和1个旱地水田交替管理监测点;2004年在宁夏银川市建立了2个水田监测点,其中一个点2004—2007年为旱地,2008—2016为水田。

1.2 田间试验设计

试验设两个处理:1)不施肥处理(空白区),小区面积60 m²,用设置保护行、垒区间小埂等方法隔离;2)施肥处理,施肥方式为常规施肥,可代表当地大多数农田的施肥水平,肥料种类分别为尿素、磷酸二铵、氯化钾(或硫酸钾)以及有机肥,面积不小于300 m²。种植作物为小麦、玉米和水稻。

银川市的2个监测点不施用有机肥,每年都施用氮、磷、钾化肥,其中氮肥年均施用量为310 kg/hm²,磷肥年均施用量98.6 kg/hm²,钾肥年均施用量33.4 kg/hm²。石嘴山市监测点1998—2005年间施用有机肥和化肥,之后仅施用氮、磷、钾化肥,其每季平均施用量分别为300、144和34.5 kg/hm²。吴忠市监测点仅施用氮、磷、钾化肥,其每季平均施用量分别为260、118和20.4 kg/hm²。新疆和田市3个监测点几乎每年施用有机肥,每季平均折合施氮量N 272.1 kg/hm²、P₂O₅ 166.8 kg/hm²、K₂O 249.1 kg/hm²;化肥年均施用量为氮肥293.7 kg/hm²、P₂O₅ 298.1 kg/hm²,未施用化学钾肥。

1.3 样品的采集与分析

在每年秋收后,采取0—20 cm耕层土样,风

干,研磨过筛。pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾等指标均采用国家标准方法测定:pH采用酸度计(水土比5:1);有机质测定采用重铬酸钾滴定法;全氮采用半微量凯氏定氮法;碱解氮采用扩散法;有效磷采用该碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度计法^[6]。

1.4 计算与统计方法

1.4.1 增产率 增产率=(施肥区产量-无肥区产量)/无肥区产量×100%

1.4.2 产量可持续性指数 产量的可持续性程度可用产量可持续性指数(sustainable yield index, SYI)来表示,它是测定系统是否能持续生产的一个可靠参数^[7],计算方法:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma_{n-1}) / Y_{\max}$$

其中: $\bar{Y}$ 为监测期间作物的平均产量; σ_{n-1} 为标准差; $Y_{\max}$ 为最高产量。

1.4.3 氮肥农学效率 采用氮肥农学效率来表征单位施氮量所增加的作物籽粒产量^[8-9]:

氮肥农学效率(AEN, kg/kg) = (施肥区产量-无肥区产量)/氮肥施用量

1.4.4 数据统计分析 试验数据用Excel 2016进行整理,运用Sigmaplot12.5和SAS 8.0软件进行相关性分析及显著性检验,多重检验采用Duncan法($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 作物产量演变特征

图1为小麦、玉米和水稻为7个监测点的平均产量。由该图可见,在施肥处理下,小麦的产量随时间呈现递增的趋势,在2004年达到最高,为7.58 t/hm²,之后产量趋于稳定;玉米产量也随施肥年份呈现递增的趋势,而水稻产量在整个监测期无显著变化。

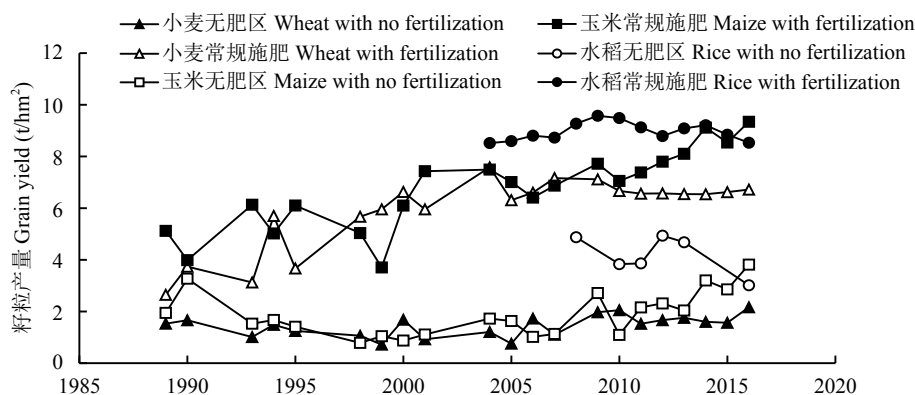


图1 灌淤土长期监测点小麦、玉米和水稻的产量演变

Fig. 1 Crop yield dynamics at long-term observation sites of irrigation silting soil

2016 年, 小麦产量是初始年的 3 倍, 玉米产量是初始年的 2 倍, 施肥对小麦和玉米产量的作用显著, 对水稻没有直接作用。

产量变异系数是衡量产量是否稳定的一个指标。由表 2 可知, 不施肥下的玉米、水稻的变异系数较高, 常规施肥下玉米和水稻的产变异系数小, 产量分别比不施肥的提高了 167%~334% 和 106%~112%, 说明施肥不仅有促产也有稳产作用。施肥后小麦的平均产量为不施肥田块的 2~3 倍, 但其变异系数在施肥后的变化在各试验点表现不一。

2.2 不同施肥下的作物产量可持续性

施肥明显提高了小麦、玉米和水稻的产量可持续性指数 (SYI, 图 2)。总体来说, 水稻的 SYI 明显高于小麦和玉米。与不施肥相比, 施肥后小麦、玉米和水稻的 SYI 分布增加了 18.8%、148% 和 13.9%。

可见, 玉米产量的可持续性对肥料的依赖性最强, 而水稻相对较弱。

2.3 施肥增产率的演变特征

与不施肥相比, 常规施肥下小麦、玉米和水稻的平均增产率分别为 343%、320% 和 121%, 由图 3 可以得出, 小麦、玉米的增产率随着年限的增加呈现先增高后降低的趋势, 其中小麦增产率在 1998—2005 年达到最大, 玉米增产率在 2000、2001 和 2007 年最高, 水稻的增产率随施肥年限变化不大, 在 80%~180% 范围内波动。

从图 4 的频率分布图中可以看出, 小麦和玉米的增产 1~3 倍所占的比例最大, 分别为 52% 和 48%, 其次是增产大于 5 倍, 分别为 24% 和 29%; 水稻增产倍数小于 3 倍, 其中 50% 监测点增产了 1 倍, 50% 监测点增产了 1~3 倍。

表 2 灌淤土长期监测点小麦、玉米和水稻产量变化 (1989—2016 年)

Table 2 Changes of crop yields in monitoring sites of irrigation silting soils under long-term conventional fertilization

监测点 Site	平均产量 Average yield (kg/hm ²)						变异系数 CV (%)					
	小麦 Wheat		玉米 Corn		水稻 Rice		小麦 Wheat		玉米 Corn		水稻 Rice	
	CK	F	CK	F	CK	F	CK	F	CK	F	CK	F
银川 Yinchuan		13091			4245	8987		6			16	6
银川 Yinchuan					4404	9074					11	5
石嘴山 Shizuishan	3299	9139	2375	6350			33	43	83	7		
吴中市 Wuzhong	2111	7117	1977	8586			84	28	94	24		
和田市 Hetian	1350	4906	1692	5881			45	45	42	22		
和田市 Hetian	1268	5314	1548	6313			41	42	41	19		
和田市 Hetian	1252	4825	1483	6164			50	41	51	25		
总体 Total	2007	7398	1898	6783	4325	9031	47	44	19	18	3	1

注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer input; F—施肥 Applying fertilizer.

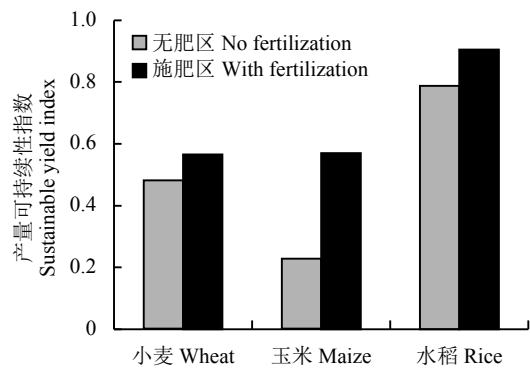


图 2 不同施肥管理措施下作物的产量可持续性指数

Fig. 2 Sustainable yield index of wheat, maize and rice under no fertilization and conventional fertilization

2.4 地力贡献指数的演变特征

土壤地力贡献指数是指不施肥区的作物产量与常规施肥区的作物产量之比, 反映了土壤的肥沃程度。对灌淤土的定位监测数据结果分析可知 (图 5), 小麦、玉米和水稻的地力贡献指数分别为 0.08~1.34、0.02~0.83 和 0.34~0.57。小麦和玉米的地力贡献指数大多集中于 0.10~0.36, 年度间差异不显著。水田监测始于 2004 年, 其地力贡献系数随着年限的增加而增加, 年增加量为 0.0125。

2.5 土壤全氮、有效磷和速效钾演变趋势

不论在旱地还是水田, 随着年份的增加, 7 个监

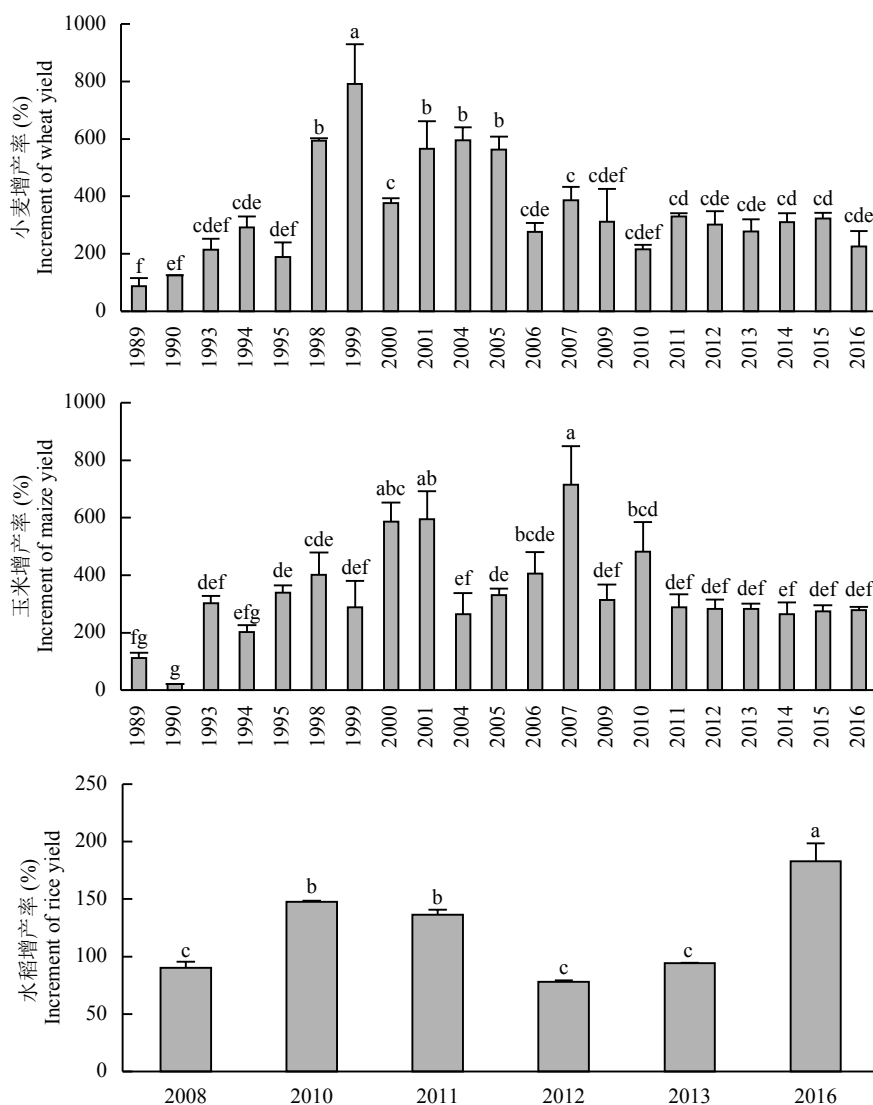


图3 灌淤土长期监测点常规施肥下作物增产率的演变

Fig. 3 Dynamics of crop yield increment under conventional fertilization at long-term observation sites of irrigation silting soil

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示年份间差异显著 ($P < 0.05$)]

Different letters above the bars indicate significantly difference among different years ($P < 0.05$).

测点的土壤全氮含量呈增加趋势,旱地增加较为平稳,从 0.4 g/kg 上升到了 1.1 g/kg;水田土壤全氮从 0.8 g/kg 上升到 1.4 g/kg,波动性较大(图 6)。截止到 2016 年,旱地土壤全氮含量高出初始年 0.7 g/kg,水田全氮含量高出初始年 0.4 g/kg。

由图 6 可知,1995、2001 和 2005 年份的旱地有效磷含量约为其他年份的 2~3 倍,原因是当年施入的磷肥量较大,其他年份较为稳定并有上升趋势,含量保持在 17.5~40.1 mg/kg。2016 年,旱地土壤有效磷含量与初始年相比增加了 57%,水田与旱地变化趋势相似,平均来说较初始年增加了 76%。可见,随着磷肥的长期施用,磷素在土壤中得到累积。

在西北灌淤土区域,钾元素含量比较丰富,所以,宁夏的监测点仅在个别年份施用了少量钾肥(16~20 kg/hm²),而新疆监测点仅在起始年份施用了一次钾肥(37.5~52.5 kg/hm²),其他年份只施用有机肥和氮、磷肥。从图 6 中可以看出,由于施钾量原因,旱地速效钾含量在 1998 年和 2004 年明显较高,其他年份则一直保持在 130~170 mg/kg 之间,趋于稳定。水田与旱地速效钾含量趋于一致,随着年限的变化,速效钾含量保持稳定。

2.6 增产率与土壤养分的关系

分析土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量及其相应年份小麦、玉米和水稻增产率发现,全氮

含量与增产率有密切的关系。小麦、玉米增产率随着土壤全氮含量的增加而显著增加; 水稻由于监测点较少, 只能反映出增加的趋势。有机质、有效磷和有效钾含量与增产率相关不显著 (图 7)。

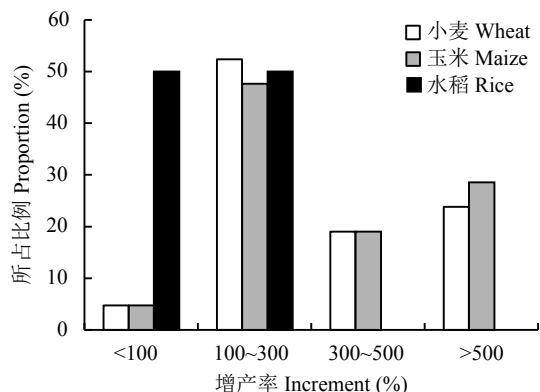


图 4 长期监测点常规施肥下作物增产率的频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of the increase proportion of crop yield under conventional fertilization at long-term observation sites

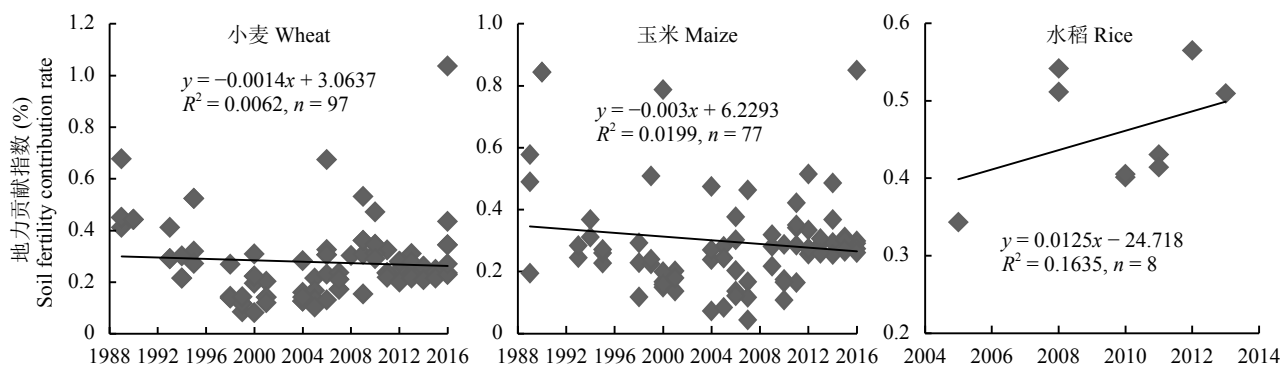


图 5 灌淤土的地力贡献系数随时间演变

Fig. 5 Contribution coefficient of soil fertility to crop yield under long-term conventional fertilization at the observation sites of irrigation silting soil

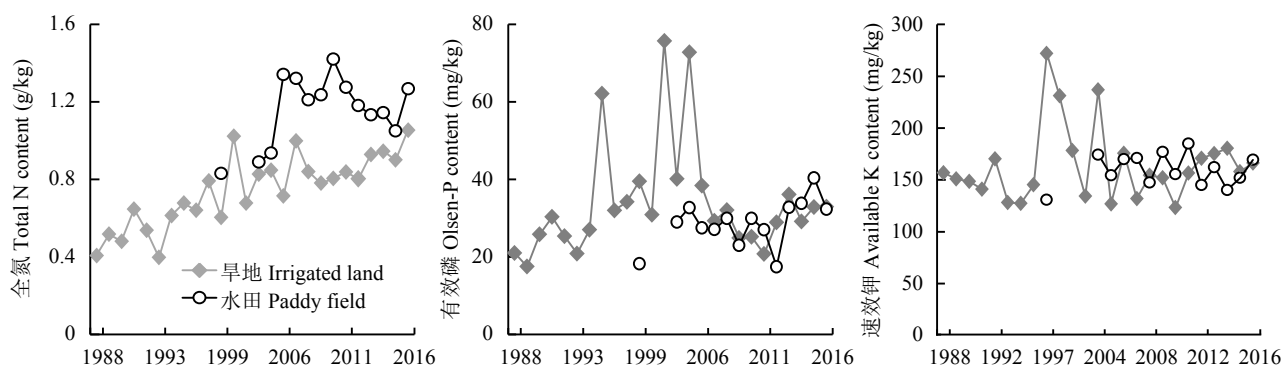


图 6 长期监测点常规施肥下灌淤土全氮、有效磷和速效钾含量变化趋势

Fig. 6 Dynamics of soil total nitrogen, available phosphorus and potassium content in irrigation silting soil under conventional fertilization

由图 7 还可以看出, 在土壤全氮含量 0.4~1 g/kg 范围内, 全氮每增加 0.1 g/kg, 小麦、玉米增产率分别提高 41.3%、48.5%; 在全氮含量 1.1~1.5 g/kg 范围内, 全氮每增加 0.1 g/kg, 水稻增产率可提高 34.2%。说明在肥力较高的土壤上, 肥料的增产率更高。

2.7 氮肥农学效率的变化特征

氮肥农学效率 (AEN) 是指特定施肥条件下, 单位施氮量所增加的作物经济产量, 是施肥增产能力的反映。这一指标考虑了不施肥下作物的空白产量, 消除了地力初始背景值的不同。长期监测结果显示 (图 8), 小麦、玉米和水稻的平均氮肥农学效率分别为 9.8、16.8 和 27.4 kg/kg。小麦的农学效率为 3.6~18 kg/kg, 随着年限的增加农学效率增加, 然后趋于稳定, 2016 年比初始值增加 6.9 kg/kg; 玉米农学效率随施肥年限增加而增加, 2016 年比初始值增加了 8.3 kg/kg; 水稻的农学效率为 14~33 kg/kg, 随年限增加呈小幅度波动趋势, 2016 年较初始监测值增加了 1 kg/kg。

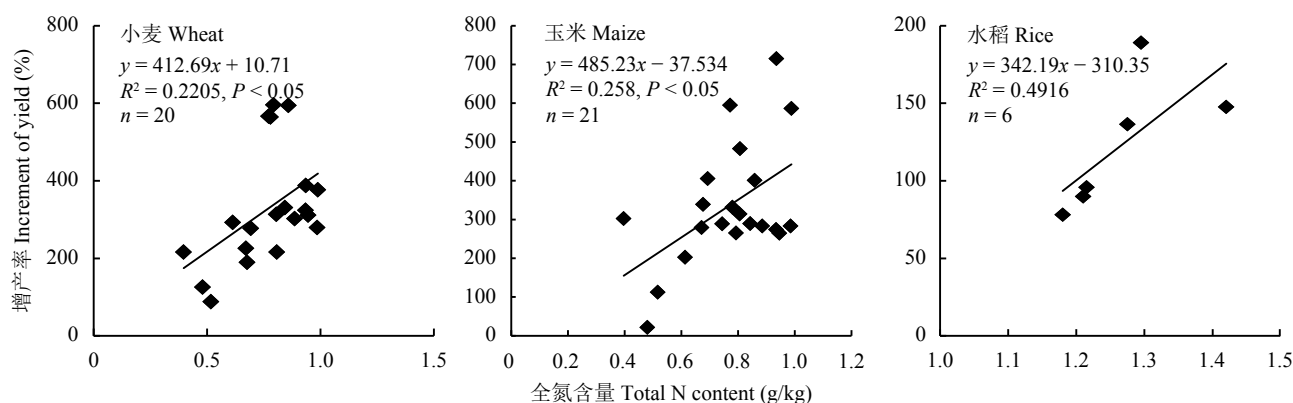


图7 灌淤土土壤全氮和与增产率的关系

Fig. 7 The linear relationship between Increment of crop yield and the total N content in irrigation silting soil at long-term observation sites

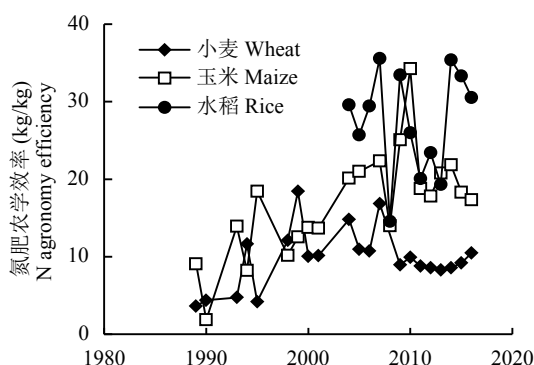


图8 灌淤土长期监测点常规施肥下氮肥农学效率演变趋势

Fig. 8 Dynamics of the agronomy efficiency of nitrogen fertilizer under conventional fertilization at long-term observation sites of irrigation silting soil

3 讨论

与不施肥相比, 常规施肥下小麦、玉米和水稻的籽粒产量均有显著增加, 说明尽管灌淤土本身养分资源丰富, 但是施肥仍然能够明显的增加作物产量, 是该区域重要的增产措施^[10-11]。灌淤土上小麦和玉米产量自 1989 年到 2004 年显著增加 (图 1), 而无肥区籽粒产量没有显著变化, 我们推测主要是由于两个原因: 一是八十年代初我国施肥量还较低, 土壤养分库匮乏^[12-13], 而大量施肥后大大增加了土壤肥力, 进而使作物产量显著提高; 另一方面, 作物品种选育工作进展迅速, 对于作物增产起到了至关重要的作用^[14]。值得注意的是, 无肥区作物产量并没有显著增加, 这说明土壤肥力对于高产品种生产潜力的发挥起到了至关重要的作用, 在初始土壤养分条件下, 灌淤土区域的粮食生产受到了极大限制。

由于无肥区作物产量变化不大, 而施肥区产量

呈增加趋势, 因此小麦和玉米的作物地力贡献指数随时间略呈下降趋势 (图 5)。土壤地力一方面影响了不同环境条件下蓄纳供应养分的能力, 另一方面影响微生物和作物根系对化肥养分的转化、吸收和传输, 指示了土壤的生产能力^[15-16]。提升地力是提高化肥利用效率、实现作物高产的核心途径。本文中灌淤土上长期施用化肥后 (少量施用有机肥) 后, 虽然作物产量在增加, 但地力贡献指数在下降, 说明需要采取培肥措施来提高地力。王吉智等^[17]认为, 施用有机肥料是灌淤土培肥的主要措施, 土壤肥力愈高, 灌淤土生产力也愈高。吕粉桃等^[4]指出, 灌淤土小麦长期以来未达到最高产量, 主要与其有机肥的施用量不足有关系。其分析结果表明, 灌淤土区小麦种植制度下有机肥的施用量占总施肥量的比例随时间呈极显著的下降趋势, 且其投入量于 1995 年左右开始出现大幅度降低。而小麦作物农学利用率与小麦增产率在有机无机配施条件下均表现为上升趋势, 说明增加有机肥施用量, 可大幅度提高灌淤土小麦作物产量及其肥料利用率, 可使作物达到最高产量水平。可见, 在灌淤土区域应推广有机肥施用, 以培肥地力和高产稳产。

从土壤养分与作物增产率的相关关系可知, 在一定范围内, 小麦、玉米增产率与灌淤土全氮含量呈直线正相关关系 (图 8)。说明了在一定范围内, 土壤全氮含量越高, 肥料的增产效应越显著。因此, 在灌淤土上, 通过提高土壤肥力, 保证作物高产稳产, 以达到减肥增效。另外, 其相关关系也说明土壤全氮是影响作物增产的关键因子之一。安婷婷等^[18]和李娟等^[19]分别在黄淮海砂姜黑土和兰州灌淤土进行的试验, 也都说明了氮是作物增产的主要限制因子。氮肥农学效率和土壤全氮含量均随施肥年份呈增加趋势, 同样证明了氮肥是保证作物高产的基础

之一, 因此在灌淤土上应保证氮肥的施用。土壤磷、钾含量在本文的监测点中含量均较高, 且与作物产量等无显著相关关系, 因此应在灌淤土上避免施用大量磷、钾肥, 以降低生产成本及其环境损失。

4 结论

灌淤土上常规施肥可有效提高了玉米和小麦的产量, 降低玉米和水稻产量的变异性, 提高作物产量的可持续性。

土壤全氮含量与作物增产效果呈正相关, 随着时间的变化, 全氮含量上升, 作物产量上升。但作物地力贡献指数随施肥年限的增加呈下降趋势, 说明化肥的施用对灌淤土地力的提升效应在降低, 需进一步制定灌淤土的培肥措施, 并进行相关技术推广。

长期施肥灌淤土旱地土壤全氮含量高出初始年 0.7 g/kg, 水田全氮含量高出初始年 0.4 g/kg。由于不施钾肥, 土壤有效钾含量变化不显著; 由于土壤固定严重, 有效磷含量也没有显著增加。

参 考 文 献:

- [1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [2] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对灌淤土氮素流失及水稻产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2395–2403.
- [3] 曲潇琳, 龙怀玉, 谢平, 等. 宁夏引黄灌区灌淤土的成土特点及系统分类研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1102–1114.
- [4] 吕粉桃, 郑磊, 徐明岗, 等. 长期施肥对灌淤土小麦产量变化的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, 2010(2): 29–34.
- [5] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(02): 156–161.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[Z]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–34.
- [7] Wanjari R H, Singh M V, Ghosh P K. Sustainable yield index: an approach to evaluate the sustainability of long-term intensive cropping systems in India[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2004, 24(4): 39–56.
- [8] Duan Y, Xu M, Gao S, *et al.* Nitrogen use efficiency in a wheat-maize cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157(2): 47–56.
- [9] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [10] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 等. 长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 248–261.
- [11] 赵营, 同延安, 张树兰, 等. 氮磷钾施用量对灌淤土水稻产量及肥料利用率的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(2): 118–121.
- [12] 吕粉桃, 田有国, 徐明岗, 等. 长期施肥对灌淤土养分状况变化的影响[J]. *华北农学报*, 2009, 24(4): 142–146.
- [13] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 131–137.
- [14] 方正. 冬小麦新品种选育研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- [15] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 210–219.
- [16] 左竹, 张建峰, 李桂花. 养分投入和作物根系对土壤微生物氮转化的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(27): 18–22.
- [17] 王吉智, 马玉兰, 金国柱. 中国灌淤土[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 56–67.
- [18] 李娟, 赵良菊, 郭天文. 土壤养分状况系统研究法在兰州灌淤土平衡施肥中的应用研究[J]. *甘肃农业科技*, 2002, (6): 39–41.
- [19] 安婷婷. 施肥对小麦-玉米复种连作根际土壤特性、植株养分和产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学硕士论文, 2017.