太湖地区高产水稻土经济极点施肥:一种农田 N、P 养分负荷的田间控制技术

潘根兴[1] , 褚清河[2] , 张英[1] , 李恋卿[1] , 黄筱敏[3] , 王吉方[3] , 景学义[3](1 .南京农业大学农业资源与生态环境研究所 , 南京 210095 ; 2 . 山西省农业资源综合调查研究所 , 太原 031000 ; 3 .江苏省昆山农业科技示范园区 , 昆山 215300)

摘要:我国农业中化肥施用过多而利用率极低 , 过量 N、P 养分由农田向水系的迁移损失是农业非点源污染的重要问题 .本研究选择太湖地区高产水稻土(乌栅土) , 进行了不同施肥量及其养分配比的肥料试验 .结果表明 , 供试土壤的基础肥力相当于 6.75t/ hm^2 产量 , 总施肥量(N + P) 为 300kg/ hm^2 时达到土壤的极点产量(9.79t/ hm^2) ; 但发现施肥量(N + P) 240kg/ hm^2 时产量仍可达 9.69t/ hm^2 , 此时养分的产量效应最大 .为此 ,笔者提出一种经济极点施肥模式(化肥 N + P 240kg/ hm^2 , N∶P∶K 比为 3∶2∶0 或 1∶1∶0) , 可以减少 30 %的 N、P 施用量 .这可以进一步发展为环境安全的减肥-轮肥新技术 , 从而有利于控制 N、P 的农业非点源污染 .

关键词:高产水稻 ; 化肥施用量 ; 养分配比 ; 非点源污染
中图分类号 : X531 文献标识码 : A 文章编号 :0250-3301(2003) 03-05-0096

Minimum Application Rates for High-Yielding Rice Production System in the Taihu Lake Region as a Field Measure for Controlling N and P Agricultural Loading

Pan Genxing[1] , Zhu Qinghe[2] , Zhang Ying[1] , Li Lianqing[1] , Huang Xiaomin[3] , Wang Jifang[3] , Jing Xueyi[3](1 .Inst . Res . Ecos . & Environm . Agri ., Nanjing Agric . University , Nanjing 210095 , China ; 2 . Inst . Integr . Agri . Res . Survey , Shanxi Academy of Agri . Sci ., Taiyuan 030000 , China ; 3 . Agri . Technology Demonstr . Farm , Kunshan City , Jiangsu 215300 , China)

Abstract : Excess application with the poor efficiency of fertilizers is one of the major problems confronting the sustainable agricultural development . Whereas , loss of N and P nutrients from farmlands to surface waters is considered as one of the major sources inducing eutrophication . In order to work out a minimum fertilizer application rate for both keeping conventional yield and reducing nutrient loading of non point source pollution , an experiment of formulated fertilization scheme on rice at different rates and nutrient ratios by incorporating the soil supply potential was conducted in a paddy soil Wunitu in Kunshan City , Suzhou . The soil nutrient can supply a yield at 6.75 t/ hm^2 at least for one cropping season . Among the fertilization treatments , a maximum yield of 9.79 t/ hm^2 was obtained at fertilization (N + P) rate of 300kg/ hm^{2}kg N and P at a ratio of N to P being 3∶2 or 1∶1 . However , with much lower fertilization (N + P) rate at 240kg/ hm^2 with the same ratio a high yield of 9.69t/ hm^2 was reached . The fertilizer efficiency of the later was 3 times as that of the former rate . Thus , a economical and environmentally sound mode of fertilization in such paddy soils as total N and P 240kg/ hm^2 , with N∶P∶K ratio being 3∶2∶0 or 1∶1∶0 was developed . Further study would be directed to a innovation of combination of reducing fertilization rate with rotated fertilization for alternative crops .

Keywords : high yielding rice ; chemical fertilization rate ; nutrient ratio ; non-point source pollution

化肥施用量过高而利用率低下是制约我国农业可持续发展的中心问题之一[1] .而农田 N、P 流失一直是备受关注的环境污染问题 ,并越来越成为水体富营养化的动因[2] .许多研究指出农田施肥量与其 N、P 非点源污染负荷有密切的关系[3~5] .太湖地区粮食产量水平较高 ,

基金项目 :教育部骨干教师基金项目 ;江苏省农村科技开发计划项目 ;苏州市农村科技计划项目
作者简介 :潘根兴(1958 ~) ,男 ,教授 ,主要从事土壤与环境研究 .
收稿日期 :2002-12-11 ;修订日期 :2003-01-03

但化学氮肥、磷肥施用量过大，农业非点源污染引起的高负荷 N、P 入湖是太湖富营养化的主要因素[6,7].据笔者调查，20 世纪 90 年代末期常熟市年化肥施用量达到 691.5 kg/hm^2，化肥施用引起的污染已占非点源污染的 1/3 以上(中国科学院南京分院研究报告，1996)．最近估计太湖地区农业非点源污染对水体氮污染的贡献为 60 %*.控制农田的 N、P 负荷将成为治理农业非点源污染的关键.本文针对目前高产水稻生产中 N、P 化肥养分施用过高的问题，设计和实施土壤养分配比调控技术的试验，旨在提出一种大幅度降低农田化肥 N、P 的负荷而减轻和控制农业非点源污染的施肥模式.

1　试验材料与方法

1.1　供试土壤

试验连续于 2000 年和 2001 年在江苏省昆山市进行，当地单季稻的常规产量平均达 8.25 t/hm^2.试验地选在昆山市农业科技示范园区，该园区位于该市玉山镇西郊，供试土壤为乌栅土，质地为黏壤土，pH(H_2O) 6.6，有机碳含量 24.3g/kg，全氮 2.1g/kg，速效磷 11.2mg/kg，速效钾 101.6mg/kg，碱解氮 152.4 mg/kg.供试水稻为中熟晚粳 9746，农艺操作同常规稻田.

1.2　试验设计

试验按随机区组设计，3 次重复.小区面积 0.0012hm^2，施肥方案见表 1.全部肥料为一次性基肥施于秧苗移栽前的田中，氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为氯化钾.小区 17 为常规高产施肥，基肥(15-15-15 高浓度复合肥) 1kg，追加穗肥和灌浆肥各 300g 尿素(表 1)．

表 1　施肥小区试验方案/kg

Table 1　Field experiment scheme of fertilization per plot/kg

小区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
N	0.00	0.00	0.15	0.08	0.12	0.15	0.18	0.23	0.27	0.12	0.15	0.19	0.15	0.19	0.23	0.00	0.29
P	0.00	0.15	0.00	0.07	0.11	0.15	0.19	0.23	0.26	0.17	0.23	0.28	0.10	0.13	0.15	0.00	0.15
K	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	0.15

2　结果与讨论

2.1　常规稻高产的极点施肥量

试验获得的各处理产量及其产量因素的结果列于表 2.不同处理间农艺性状指标(为田间混合样品平均值，未能做 T 检验)的差异不很明显，但产量的差异十分明显.对于不同处理的产量差异的 T 检验结果列于表 3.本试验中无肥区产量为 7.45t/hm^2，即该土壤的基础肥力相当于亩产千斤水平.处理 7 得到了 9.79t/hm^2 的最高产量，相对于无肥区的施肥增产效果为 31.4 %.然而，其化肥效应仅为每 kg 化肥增产 5.57kg 稻谷.小区 17 的总施肥量达到 460kg/hm^2，并没有得到最高的稻谷产量，且与绝大多数试验没有显著的产量差异.图 1 是稻谷产量与总养分施用量的关系.可见，尽管就全部试验来说，产量趋向于随总化肥施用量提高而呈指数增加，总施肥量 300kg/hm^2 以下或 N、P 总施用量 <180kg/hm^2 以下，施肥没有任何肥效.所有试验的平均肥效仅达到每 kg 化肥增产 4.4kg 稻谷，这大大低于我国农业中平均每 kg 养分增产 7.5kg 粮食的肥效水平[6]．本试验中稻谷产量与 N、P 总施肥量呈抛物线关系($p<0.001$)，其极点产量(9.79t/hm^2)对应的极点 N、P 总用量为 300kg/hm^2.此时的增产效应为 7.8，与全国平均肥效相当.但是，处理 6 得到了 9.69t/hm^2 的高产量，而相应的施肥水平是 240kg/hm^2.此时，增产效应为每 kg NP 增产稻谷 9.33kg，大大超过前述的 7.5kg 的全国平均水平.因此，把它称作经济极点 N、P 总施肥水平.

2.2　常规稻高产施肥中养分合理配比

图 2 表明，在总 N、P 用量相同的情况下，产量与不同养分施用配比有密切的关系.例如，同样是总 N、P 用量 300kg/hm^2，不同 N∶P 比下的产量关系是：3∶3 > 3∶2 > 2∶3.从图 2 可以看出，同样是施 N 量 120kg/hm^2，不同 N∶P 比

* 章申.水体氮污染与农业．氮素循环与农业和环境学术讨论会(摘要集)．厦门：2001，35.

表 2 各试验处理的稻谷产量及产量因素

Table 2 Grain yield and the constitutional factor of the different treatment plots

小区	产量/t·hm^{-2}	穗粒数	结实率/%	千粒重/g	分蘖数/个·株$^{-1}$	穗长/cm	株高/cm
1	7.62±0.28	97.8	98.0	31.0	11.7	14.4	91.0
2	7.52±0.74	123.0	97.7	31.3	13.8	15.4	95.0
3	7.60±0.36	115.0	95.8	30.4	11.4	15.2	100.0
4	7.68±0.18	130.0	97.7	29.1	13.4	16.2	95.0
5	7.92±0.15	109.0	98.4	30.3	11.9	15.2	98.0
6	9.69±0.33	117.0	98.6	29.5	13.6	15.4	100.0
7	9.79±0.60	112.0	97.7	28.7	12.0	14.8	98.0
8	9.57±0.44	91.5	92.9	28.1	11.2	14.4	101.0
9	8.56±0.73	92.3	92.1	28.0	11.9	14.9	104.0
10	9.46±0.28	107.0	94.6	28.6	12.3	15.3	98.0
11	9.01±0.23	108.0	97.1	29.0	11.9	15.5	92.0
12	9.49±0.36	115.0	89.7	28.5	13.0	15.2	98.0
13	9.19±0.53	96.1	97.9	29.5	14.5	15.2	96.0
14	9.56±0.10	101.0	95.7	28.3	12.1	15.9	97.0
15	9.34±0.45	125.0	98.1	28.1	13.3	16.0	102.0
16	7.45±0.59	118.0	98.6	30.0	12.7	16.2	89.0
17	8.73±0.24	116.0	89.2	28.0	11.9	15.2	100.0

表 3 不同施肥处理间的差异显著性(成对样品 *T* 检验)

Table 3 Significance test of yields under different fertilization treatments (*T* test of paired samples)

处理	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1.000																
2	0.847	1.000															
3	0.970	0.848	1.000														
4	0.848	0.755	0.601	1.000													
5	0.254	0.361	0.193	0.169	1.000												
6	0.024	0.066	0.014	0.006	0.020	1.000											
7	0.020	0.005	0.029	0.032	0.021	0.864	1.000										
8	0.033	0.018	0.003	0.011	0.012	0.765	0.545	1.000									
9	0.239	0.158	0.047	0.111	0.234	0.107	0.149	0.051	1.000								
10	0.012	0.080	0.032	0.015	0.025	0.319	0.571	0.821	0.233	1.000							
11	0.007	0.047	0.034	0.024	0.009	0.170	0.071	0.159	0.445	0.225	1.000						
12	0.035	0.040	0.000	0.004	0.013	0.469	0.534	0.604	0.048	0.952	0.230	1.000					
13	0.035	0.147	0.080	0.052	0.084	0.207	0.425	0.559	0.445	0.192	0.690	0.586	1.000				
14	0.011	0.035	0.006	0.001	0.001	0.591	0.562	0.973	0.112	0.688	0.060	0.682	0.399	1.000			
15	0.023	0.115	0.057	0.034	0.055	0.284	0.515	0.700	0.336	0.350	0.436	0.769	0.070	0.555	1.000		
16	0.769	0.912	0.516	0.439	0.297	0.012	0.056	0.018	0.028	0.038	0.072	0.007	0.078	0.020	0.059	1.00	
17	0.119	0.119	0.080	0.050	0.048	0.085	0.086	0.147	0.783	0.054	0.167	0.162	0.244	0.244	0.127	0.116	1.000

下的产量关系是:1∶1 > 3∶2 > 2∶3 ≫1∶0;同样是施磷量 120kg/hm^2,不同 N∶P 比下的产量关系是:1∶1 > 3∶2 > 4∶2 > 1∶0. 因此,对于本试验来说,合适的 N∶P 比应介于 1 ~ 2(1 ≤N∶P ≤2). 而我国 1995 年化肥施用中 N∶P 为 1∶0.4[6], 而太湖地区的常熟市、锡山市 90 年代末的施用比例仅为 1∶0.2 左右. 说明配比不合理仍是制约化肥施用量居高不下的原因,施肥实践中仍应加强磷肥的配合施用. 另外,虽然全部处理施用了 120kg/hm^2 的 K 素,但与对照相比没有显著的增产效应. 因此,在含速效钾 100mg/kg 的该种乌栅土上施钾并不必要.

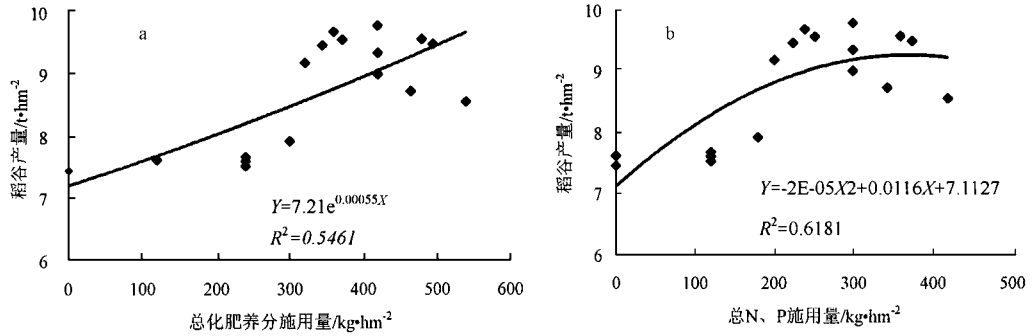

图 1　稻谷产量与总化肥施用量的关系(a. N、P、K总施用量; b. N、P总施用量)

Fig.1　Grain yield in response to total nutrient fertilization rate(a. to total N, P and K; b. to total N and P)

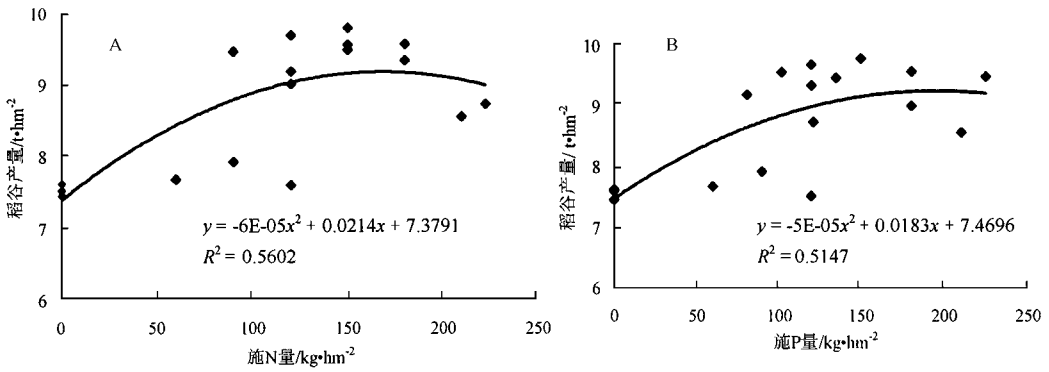

图 2　稻谷产量与不同养分因子用量的关系(A. 与 N用量的关系; B.与 P用量的关系)

Fig.2　Relationship between rice grain yield and nutrient application rate(A. N application; B. P application)

3　讨论与结论

3.1　经济和环境安全的水稻施肥模式

将本试验中结果归纳于表 4.常规高产施用化肥不尽合理,产量、肥效最低.本试验中,常规水稻的产量极点的施肥量(N + P)为 300kg/hm^2,在 10t/hm^2 稻谷目标产量下的总施用量(N + P)仅为 240kg/hm^2,此时的 N∶P∶K 配合施用比为 3∶2∶0 或 1∶1∶0.在产量极点施肥量下可比常规减少总施肥量达 1/3(34.8 %),降低总 N、P 施肥量 13 %,肥效为 7.80;而 650kg 产量的施肥量下可减少总施肥量 50 %,降低总 N、P 施肥量 30 %,肥效高达 9.3kg(稻谷/N + P).笔者将产量次高而肥料效益最高的施肥量称为经济极点施肥量.就本试验的乌栅土来说,经济极点总化肥施用量为 240kg/hm^2,其中 N∶P 比 3∶2 或 1∶1,这一施肥量与面上施肥量相比减少化肥投入 100kg/hm^2.笔者 2001 年的重复试验结果同样表明,施化肥 N 120kg/hm^2 和 P 120kg/hm^2,不施钾,产量仍为最高(8.8t/hm^2).单位化肥效率保持一致(9.3 稻谷/肥料养分).2001 年和 2002 年昆山市已在大田实行减肥计划,化肥使用已降为 N 210kg/hm^2 和

表 4　不同施肥模式产量和效益对比

Table 4　Rice yield and fertilizer efficiency between different fertilization rates

施肥模式	总 NP 施用量/kg•hm^{-2}	养分配比/(N∶P)	产量/t•hm^{-2}	肥效(稻谷/养分)	减施量/ %
极点施肥	300.0	1∶1	9.79	7.80	12.7
经济极点施肥	240.0	1∶1	9.69	9.33	30.1
常规高产施肥	343.5	2∶1	8.73	3.71	0

P 67.5kg/hm^2,而产量达到 9t/hm^2 的水平.同时,许多研究指出,农田 N、P 流失的主要起因在于降雨对土壤的洗刷[9].所以,施肥量大、且施肥次数多都会增加流失风险.本方法为一次性施入,常规施用法为 2~3 次施入,故可以大大减少径流损失的风险.

3.2 关于休肥和轮肥

供试土壤的总养分水平较高,尤其是 N 养分丰富,P 相对较低,在不施肥下单季产量仍可达 7.5t/hm^2.因此,在农业非点源污染负荷较严重的情况下,为了兼顾农业的经济效益和环境效益,可以考虑对某季作物不施肥或尽量少施肥,即对农业土壤进行休肥和轮流施肥.按太湖地区农田面积总计约 33 万 hm^2(约 500 万亩)来说,25%面积的农田土壤轮流休肥,则按现有施氮水平 300kg/hm^2 计,当年可少施 N2.4 万 t;若其余实行经济极点施肥,减少施 N 达 3.6 万 t,则 2 项总计减 N 肥量可达 6 万 t.根据朱兆良资料*,太湖地区水稻土氮的水迁移损失平均占施入氮的 11.4%,则相当于减少约 0.6×10^{4}kg N 进入水系.而 20 世纪末入湖总氮为 2.8 万 t/a** .因此,推广这样的技术可减少入湖总氮的 1/5~1/4.这对太湖的富营养化控制将是十分有利的.

总之,合理而高效的施肥技术可以作为农业 N、P 非点源污染的田间控制技术.为防止和控制太湖地区湖泊富营养化,高产水稻生产中减少施肥量仍有很大的潜力.当然,对于不同土壤上的最佳施肥量及其养分配比以及修肥和轮肥的长期效应仍需进行观测试验.

参考文献:

1 中国科学院生物学部.我国化肥面临的突出问题及建议.载:李庆逵,朱兆良,于天仁主编,中国农业持续发展中的肥料问题.南昌:江西科学技术出版社,1998.3~5.

2 Onema O, Roest C W J. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface waters: the effects of polices and measurements in the Netherlands. Water Science and Technology, 1998, **37**: 19~30.

3 Smith K A, Jackson D R, Pepper T J. Nutrient losses by surface run-off following the application of organic manures to arable land. 1, Nitrogen. Environmental Pollution, 2001, **112**: 41~51.

4 晏维金,尹澄清,孙濮等.磷氮元素在水田湿地中的迁移转化和径流流失过程研究.应用生态学报,1999,**6**(10):312~316.

5 Wang K, Zhang Z, Zhu Y et al. Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertilizer and manure phosphorus. Chemosphere, 2001, **42**: 209~214.

6 马立珊,汪祖强,张水铭等.苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究.应用生态学报,1992,**3**(4):346~354.

7 吴安之,陆雪芳,周建国.武进市化肥对农业面源污染的现状与对策.迈向 21 世纪的江苏土肥科技.南京:河海大学出版社,1999.132~13.

8 奚振邦.化肥在我国农业持续发展中的作用.载:李庆逵,朱兆良,于天仁主编.中国农业持续发展中的肥料问题.南昌:江西科学技术出版社,1998.6~11.

9 张志剑,王光火,王珂等.模拟水田的土壤磷素溶解特征及其流失机制.土壤学报,2001,**38**(1):139~143.

* 朱兆良.氮肥施用对中国农业的贡献和对环境的影响.氮素循环与农业和环境学术讨论会摘要集.厦门:2001,1.

** 中国科学院南京分院.太湖地区面源污染调查报告(内部资料).1996,2~50.