

中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径*

张福锁¹ 王激清¹ 张卫峰¹ 崔振岭¹ 马文奇² 陈新平¹ 江荣风¹

(1 农业部植物营养与养分循环重点实验室, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室,

中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

(2 河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071001)

摘要 总结了近年来在全国粮食主产区进行的 1 333 个田间试验结果, 分析了目前条件下中国主要粮食作物水稻、小麦和玉米氮磷钾肥的偏生产力、农学效率、肥料利用率和生理利用率等, 发现水稻、小麦和玉米的氮肥农学效率分别为 101.4 kg kg^{-1} 、 81.0 kg kg^{-1} 和 91.8 kg kg^{-1} , 氮肥利用率分别为 2813%、2812% 和 2611%, 远低于国际水平, 与 20 世纪 80 年代相比呈下降趋势。造成肥料利用率低的主要原因包括高产农田过量施肥, 忽视土壤和环境养分的利用, 作物产量潜力未得到充分发挥以及养分损失未能得到有效阻控等。要大幅度提高肥料利用率就必须从植物营养学、土壤学、农学等多学科联合攻关入手, 充分利用来自土壤和环境的养分资源, 实现根层养分供应与高产作物需求在数量上匹配、时间上同步、空间上一致, 同时提高作物产量和养分利用效率, 协调作物高产与环境保护。

关键词 肥料农学效率; 氮肥利用率; 影响因素; 提高途径

中图分类号 S143 **文献标识码** A

随着人口的增加和耕地的减少, 我国粮食安全与资源消耗和环境保护的矛盾日益尖锐。化肥作为粮食增产的决定因子在我国农业生产中发挥了举足轻重的作用, 但近 20 多年来, 我国化肥用量持续高速增长, 粮食产量却始终增加缓慢。相对于 20 世纪 90 年代初大量田间试验结果的总结^[1], 当前我国肥料利用效率到底有多高? 近 20 年来是如何变化的? 造成这种变化的影响因素是什么? 进一步提高的途径有哪些? 本文通过对近年来我国粮食主产区大量田间试验数据的总结分析, 探讨目前我国三大粮食作物水稻、小麦和玉米的肥料利用效率, 并对肥料利用效率的主要影响因素及其提高途径进行了分析讨论。

1 材料与方法

1.1 数据来源

为了分析目前试验条件下水稻、小麦和玉米的肥料利用效率, 本文收集了从 2003 年至 2005 年中国农业大学植物营养系承担的农业部 / 9480 项目在全国粮食主产区进行的肥效试验数据, 试验样本数共计 586 个; 另外也收集了 2001 年至 2005 年中国农业大学植物营养系和农业部全国农业技术推广服务中心及其他合作单位进行的肥效试验数据, 试验样本数共计 747 个, 5 年的试验样本数总计为 1 333 个, 涉及全国 11 个省(市、区), 所有试验点样本基本情况汇总如表 1 所示。

表 1 水稻、小麦和玉米肥效试验的样本数、施肥量和分布区域

Table 1 Number of samples, fertilizer application rates and distribution of field experiments for rice, wheat and maize

作物 Crop	样本数 Sample number	施肥量 Fertilizer rate (kg hm^{-2})			样本分布 Sample location
		N	P_2O_5	K_2O	
水稻 Rice	396	46~ 276	25~ 235	19~ 155	黑龙江、四川、重庆、江苏、江西、浙江
小麦 Wheat	588	60~ 383	26~ 192	15~ 350	河北、天津、山东、山西、江苏、陕西、四川
玉米 Maize	349	37~ 360	45~ 180	30~ 225	河北、天津、山东、山西、陕西

* 农业部 / 9480 项目 / 土壤养分管理技术引进与建立 0 (2006- G60) 资助

作者简介: 张福锁 (1960~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事养分资源高效利用研究

收稿日期: 2008- 05- 20; 收到修改稿日期: 2008- 06- 06

112 计算参数与计算方法

国内外有许多表征肥料利用效率的参数,如作物的生产系数 (PI)或边际产量^[2,3]、作物的偏生产率^[1]、作物的生产效率^[4]等,由于这些参数是为不同目的设定的,因此很难统一。目前国内比较通用的是肥料利用率,即肥料养分回收率,如氮肥利用率 (Apparent recovery efficiency of applied N, RE_N), 其反映了作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率,即 $RE_N = (U - U_0) / F$, 其中 U 为施肥后作物收获时地上部的吸氮总量, U_0 为未施肥时作物收获期地上部的吸氮总量, F 代表化肥氮的投入量。

除肥料利用率之外,国际上常用以下三个参数来表征农田氮肥的利用效率^[5~7]:

氮肥偏生产力 (Partial factor productivity from applied N, PFN_N), 它是指单位投入的肥料氮所能生产的作物籽粒产量,即 $PFN_N = Y / F$, Y 为施肥后所获得的作物产量; F 代表化肥的投入量。

氮肥农学效率 (Agronomic efficiency of applied N, AE_N), 它是指单位施氮量所增加的作物籽粒产量,即 $AE_N = (Y - Y_0) / F$, Y 为施肥后所获得的作物产量; Y_0 为不施肥条件下作物的产量; F 代表化肥的投入量。

氮肥生理利用率 (Physiological efficiency of applied N, PE_N), 是作物地上部每吸收单位肥料中的氮所获得的籽粒产量的增加量; $PE_N = (Y - Y_0) / (U - U_0)$ 。

以上四个参数是从不同的角度描述作物对肥料养分的利用效率,其内涵及应用对象常常不同。例如,我国习惯用 RE , 一方面是由于过去我国化肥资源紧缺,节约化肥非常重要,另一方面

由于我国土壤肥力普遍低下,土壤和环境来源养分少,化肥的增产效应很显著, RE 能很好地反映作物对化肥养分的吸收状况。而今天上述两方面的情况均发生了很大的变化,单纯应用 RE 就值得商榷。

国际农学界常用 PFN , 原因是它不需要空白区产量和养分吸收量的测定,简单明了、易为农民所掌握。我们也认为这是比较适合我国目前土壤和环境养分供应量大、化肥增产效益下降的现实,是评价肥料效应的适宜指标。

AE 是评价肥料增产效应较为准确的指标,但由于必须测无肥区产量,应用起来较为不便。

PE 说明的是植物体内养分的利用效率,而不是肥料的增产效应,因此,其应用范围相对有限。

本文根据需要借助不同的参数对我国主要粮食作物的氮磷钾肥料的利用效率进行了分析与评价。

2 结果分析与讨论

2.1 中国主要粮食作物肥料利用效率的现状

2001~2005年 1 333 个试验中我国水稻、小麦和玉米氮磷钾肥的肥料偏生产力、农学效率、肥料利用率和生理利用率汇总结果见表 2。从表中可以看出,水稻、小麦和玉米的氮肥偏生产力分别为 5412 kg kg^{-1} 、 4310 kg kg^{-1} 和 5116 kg kg^{-1} ; 氮肥农学效率分别为 1014 kg kg^{-1} 、 810 kg kg^{-1} 和 918 kg kg^{-1} ; 氮肥利用率分别为 281.3%、281.2% 和 261.1%; 氮肥生理利用率分别为 3617 kg kg^{-1} 、 2813 kg kg^{-1} 和 3715 kg kg^{-1} 。

表 2 水稻、小麦和玉米的施肥量、产量及肥料利用效率

Table 2 Fertilizer application rate, grain yield and various nutrient use efficiencies of rice wheat and maize

作物 Crop	肥料 Fertilizer	样本数 Sample number	施肥量 Fertilizer rate (kg hm^{-2})	产量 Yield (t hm^{-2})	偏生产力 PFN (kg kg^{-1})	农学效率 AE (kg kg^{-1})	肥料利用率 RE (%)	生理利用率 PE (kg kg^{-1})
水稻 Rice	N	179	150	61.84	5412	1014	281.3	3617
	P_2O_5	109	90	61.78	981.9	91.0	131.1	681.8
	K_2O	108	86	61.82	981.5	61.3	321.4	191.4
小麦 Wheat	N	273	169	51.72	4310	810	281.2	281.3
	P_2O_5	150	114	51.70	631.7	71.3	101.7	671.8
玉米 Maize	K_2O	165	110	51.61	721.2	51.3	301.3	171.4
	N	215	162	71.05	5116	91.8	261.1	371.5
	P_2O_5	34	114	61.62	721.4	71.5	111.0	681.4
	K_2O	100	116	61.01	641.7	51.7	311.9	181.0

212 中国肥料利用率现状和历史变化

21211 肥料利用率现状分析 肥料利用率 (RE) 一直是我国学术界和政府关注的焦点。从表 3 中的数据可以看出, 目前我国水稻、小麦和玉米不同地

区试验点的氮肥利用率差异很大, 其中氮肥利用率最低值为 013%, 最高值为 8819%; 水稻、小麦和玉米不同地区间的变异范围分别为 2711%~ 3516%、1018%~ 4019% 和 2516%~ 2613%。

表 3 水稻、小麦和玉米氮肥用量、作物产量、地上部吸氮量和氮肥利用率
Table 3 N fertilizer rate, grain yield, crop N uptake and RE_N of rice, wheat and maize

作物 Crop	样本数 Sample number	试验地点 Location	施氮量 N rate (kg hm ⁻²)	吸氮量 N uptake (kg hm ⁻²)	产量 Yield (t hm ⁻²)	氮肥利用率 RE _N		
						平均值 Mean(%)	变幅 Range(%)	变异系数 CV (%)
水稻 Rice	8	黑龙江	150? 40	143? 18	8124? 1103	291.8	181.5~ 411.8	261.3
	57	四川、重庆	151? 65	144? 33	6190? 1162	271.8	31.3~ 821.7	591.9
	96	江苏、江西	149? 56	140? 19	6170? 1104	271.1	31.0~ 711.9	551.9
	18	浙江	155? 50	147? 17	6172? 0148	351.6	191.6~ 501.8	301.8
小麦 Wheat	89	河北、天津	204? 88	156? 32	6110? 1109	161.4	21.4~ 611.5	631.7
	121	山东、山西	130? 53	180? 30	6103? 1120	401.5	01.3~ 881.9	541.6
	6	江苏	298? 28	141? 17	3170? 0143	161.1	51.3~ 261.4	521.8
	30	陕西	208? 78	160? 37	4196? 1116	101.8	21.2~ 281.6	631.2
	27	四川	160? 68	164? 26	4141? 0194	341.4	91.5~ 721.3	511.0
玉米 Maize	82	河北、天津	171? 59	143? 31	5111? 0188	261.3	11.7~ 811.6	671.0
	124	山东、山西	156? 46	183? 32	8143? 1113	261.0	11.7~ 771.6	541.7
	9	陕西	153? 33	173? 19	5151? 0172	251.6	71.2~ 361.2	451.0

将氮肥利用率划分为 7 个等级, 计算每个等级下氮肥利用率的样本百分比, 进一步了解目前水稻、小麦和玉米不同氮肥利用率的样本分布频率 (图 1)。从分布频率图来看, 水稻和玉米在氮肥利用率处于 20%~ 30% 之间最高, 其中水稻样本分布频率为 29%, 玉米为 27%; 小麦在氮肥利用率处于 10%~ 20% 之间最高, 分布频率为 29%, 而其他氮肥利用率区间的样本数明显减少。另外从图 1 中也

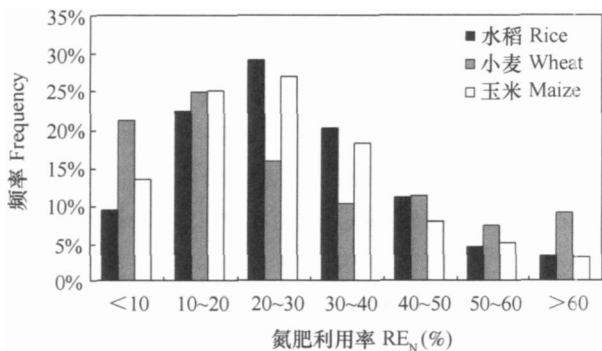


图 1 水稻、小麦和玉米不同氮肥利用率试验点分布频率变化
Fig 1 Distribution frequency of experiment sites different in REN of rice, wheat and maize

可以看出, 无论是水稻、小麦, 还是玉米, 氮肥利用率小于 30% 的样本均占到了总样本的 60% 以上, 这进一步说明目前条件下我国主要粮食作物的氮肥利用率是较低的。

从表 4 的数值可以看出, 与氮肥利用率类似, 在各个试验点上水稻、小麦和玉米的磷肥利用率变异范围非常大, 最高值可达 5913%, 最低值仅为 117%; 同时从表 4 中的数据可以看出, 目前中国水稻、小麦和玉米的磷肥利用率地区间变异范围分别为 1116% ~ 1317%、713% ~ 2011% 和 917% ~ 1216%。

表 5 列出了我国水稻、小麦和玉米目前钾肥利用率 (RE_K) 的数值, 与氮肥和磷肥的变化情况相似, 在各个试验点上水稻、小麦和玉米的钾肥利用率变异范围也非常大, 最高的可达 8812%, 最低的仅为 017%; 同时从表中的数据可以看出, 目前试验条件下中国水稻、小麦和玉米的钾肥利用率地区间的变异范围分别为 2910% ~ 3318%、2112% ~ 3519% 和 2817% ~ 3214%。

表 4 水稻、小麦和玉米磷肥施用量、作物产量、地上部吸磷量和磷肥利用率

Table 4 P fertilizer rate, grain yield, crop P uptake and RE_P of rice, wheat and maize

作物 Crop	样本数 Sample number	试验地点 Location	施磷量 P rate (kg hm ⁻²)	吸磷量 P uptake (kg hm ⁻²)	产量 Yield (t hm ⁻²)	磷肥利用率 RE _P		
						平均值 Mean(%)	变幅 Range(%)	变异系数 CV(%)
水稻 Rice	33	四川、重庆	105? 56	48? 5? 91.2	7124? 11.44	111.6	21.5~36.2	581.1
	76	江苏、江西	84? 40	37.7? 41.7	6158? 01.72	131.7	31.6~59.3	711.4
小麦 Wheat	89	河北、天津	120? 56	61.8? 81.4	6123? 11.01	101.1	11.7~31.1	671.1
	12	四川	55? 25	42.3? 101.2	4156? 11.21	201.1	41.4~58.0	781.6
	8	江苏	114? 33	38.8? 91.0	4115? 11.07	71.3	21.0~14.8	671.5
	41	陕西	119? 44	43.7? 91.1	5121? 11.09	101.0	21.1~24.8	591.6
玉米 Maize	15	河北、天津	110? 50	62.8? 111.7	6171? 11.34	121.6	31.2~45.3	791.8
	19	陕西	117? 51	66.1? 51.2	6155? 01.66	91.7	41.2~32.3	661.6

表 5 水稻、小麦和玉米钾肥施用量、作物产量、地上部吸钾量和钾肥利用率

Table 5 K fertilizer rate, grain yield, crop K uptake and RE_K of rice, wheat and maize

作物 Crop	样本数 Sample number	试验地点 Location	施钾量 K rate (kg hm ⁻²)	吸钾量 K uptake (kg hm ⁻²)	产量 Yield (kg hm ⁻²)	钾肥利用率 RE _K		
						平均值 Mean(%)	变幅 Range(%)	变异系数 CV(%)
水稻 Rice	32	四川、重庆	90? 38	122? 24	7122? 11.38	291.0	81.9~711.0	571.6
	76	江苏、江西	85? 36	149? 16	6165? 01.79	331.8	81.5~711.2	491.5
小麦 Wheat	89	河北、天津	102? 55	182? 26	6137? 01.87	351.9	01.9~88.2	671.1
	22	江苏	183? 79	187? 40	4193? 11.05	281.4	61.4~811.8	551.3
	28	陕西	98? 44	132? 25	5111? 01.93	221.4	01.7~86.9	1031.0
	26	四川	92? 52	114? 41	4108? 11.49	211.2	11.3~80.4	991.0
玉米 Maize	87	河北、天津	119? 40	165? 32	5191? 01.98	321.4	71.2~811.8	541.0
	13	陕西	97? 44	189? 18	6173? 01.52	281.7	111.9~62.9	491.8

21212 肥料利用率的历史变化 1992年朱兆良等^[1]总结了 782个田间试验数据,结果表明当时的氮肥利用率在不同作物和不同地区的变异很大,变幅达 9%~72%,而主要粮食作物的氮肥利用率变化在 28%~41%之间,平均为 35%。1998年朱兆良进一步指出当时的主要粮食作物氮肥利用率为 30%~35%,磷肥利用率为 15%~20%,钾肥利用率为 35%~50%^[8]。我们对 2000~2005年不同作物和不同区域试验结果分析发现,目前主要粮食作物的氮肥利用率在不同地区间的变异也很大,变幅在 101.8%~401.3%,平均为 271.3%;主要粮食作物的磷肥利用率不同地区的变幅在 71.3%~201.1%,平均为 111.6%;主要粮食作物钾肥利用率不同地区的变幅在 211.2%~351.9%,平均为 311.3%。可见无论是氮肥、磷肥,还是钾肥,从历史变化来看,我国主要粮食作物的肥料利用率均呈逐渐下降趋势。

213 国内外肥料利用效率对比分析

与我国情况相似,国际范围内的肥料利用效率变化很大。全球氮肥偏生产力在 1961~1965年间

可达 N 245 kg kg⁻¹,而 1981~1985年间降至 52 kg kg⁻¹。发展中国家由于绿色革命推动了化肥施用和耐肥作物品种的推广使氮肥效率从 20世纪 60年代开始大幅度下降,这种下降在开始阶段是合理的,但在氮肥消费大国如中国、印度等国的大幅度下降使作物增产与资源环境的矛盾日益尖锐。发达国家,包括东欧和中亚,作物产量在施肥量增加条件下持续增长,氮肥偏生产力从 20世纪 80年代一直保持在 49 kg kg⁻¹以上,西欧和北亚肥料利用效率甚至与作物产量同步增加。

Dobemann^[9]曾就粮食作物的养分利用效率做过详尽的综述,认为粮食作物氮肥效率目标值在所述范围内比较适宜,即氮肥偏生产力为 40~70 kg kg⁻¹,氮肥农学效率为 10~30 kg kg⁻¹,氮肥利用率为 30%~50%,氮肥生理利用率为 30~60 kg kg⁻¹。从氮肥农学效率和氮肥利用率这两个指标来看,我国试验条件下的水稻、小麦和玉米氮肥利用率与世界三大作物主产区农户常规施肥和管理条件下的氮肥利用率平均水平相当^[10],却远远

低于其他一些国家和地区在试验条件下所得到的 20~25 kg kg⁻¹ 的氮肥农学效率和 40%~60% 的氮肥利用率^[11]。总结国内外研究可以看出,改进施肥和管理措施是提高肥料利用效率最直接最有效的措施,比如水稻在良好的管理条件下的氮肥利用率可高达 50%~80%^[12 13]。

本研究的肥料利用率 (RE)是在试验条件下得到的,理论上要高于农民的实际利用率。由于农户各方面条件差别甚大,施肥技术和管理水平参差不齐,农户条件的肥料利用率较试验条件下低 10 个百分点⁽¹⁾。国际水稻研究所的研究结果也表明,25 个农户早稻的氮肥利用率为 29%,而试验站的为 41%^[14];马文奇⁽²⁾在山东省通过农户调查数据估算农户的氮肥利用率也仅为 10%;赵荣芳⁽³⁾对华北平原小麦-玉米轮作体系氮肥管理研究的结果表明,冬

小麦在农户传统施肥条件下的氮肥利用率仅有 20%,而夏玉米的农户传统施肥条件下的氮肥利用率仅为 10%。因此就目前的施肥和管理水平来看,农户条件下的肥料利用率和田间试验条件相比还要低,在进行农户肥料利用率的分析与评价时必须加以注意。

214 中国肥料利用效率低的原因分析

21411 施肥过量 施肥过量是我国肥料利用效率低的最主要原因。通过分析施氮量和氮肥利用率 (RE_N) 的关系可以得出,在氮肥用量小于 60 kg hm⁻² 时,水稻、小麦和玉米的氮肥利用率分别为 4910%、5514% 和 4012%,当氮肥用量大于 240 kg hm⁻² 时,水稻、小麦和玉米的氮肥利用率分别降至 1510%、1113% 和 1414%,所以随着氮肥用量的增加,水稻、小麦和玉米的氮肥利用率均在逐渐下降(表 6)。

表 6 水稻、小麦和玉米氮肥用量、产量和氮肥利用率
Table 6 Fertilizer N rate, grain yield and RE_N of rice, wheat and maize

氮肥用量 N rate (kg hm ⁻²)	水稻 Rice		小麦 Wheat		玉米 Maize	
	氮肥利用率 RE _N (%)	产量 Yield (t hm ⁻²)	氮肥利用率 RE _N (%)	产量 Yield (t hm ⁻²)	氮肥利用率 RE _N (%)	产量 Yield (t hm ⁻²)
< 60	491.0	61.24	551.4	51.74	401.2	61.21
60~120	371.3	61.49	401.3	51.45	311.2	61.56
120~180	271.4	61.84	331.2	51.68	291.8	71.07
180~240	231.0	71.11	221.4	61.18	241.1	81.18
> 240	151.0	61.90	111.3	51.67	141.4	51.52

受 / 高投入高产出 0 等的政策引导,同时也受 / 施肥越多,产量就越高 0、/ 要高产就必须多施肥 0 等传统观念的影响,政府和农民为了获得作物高产,大量施用化肥,不合理甚至盲目过量施肥现象相当普遍,尤其在经济发达地区尤为突出。我们在 20 世纪末对山东省的系统研究结果⁽²⁾表明,山东省当时的小麦平均化肥(纯养分,以下同)用量为 447 kg hm⁻²,其中氮肥用量就达到 280 kg hm⁻²,玉米的化肥用量为 248 kg hm⁻²。21 世纪初我们又对山东惠民县做了 5 年的跟踪研究,370 个农户的资料表明,小麦-玉米轮作体系氮磷钾投入量分别为 673 kg hm⁻²、244 kg hm⁻² 和 98 kg hm⁻²⁽⁴⁾,较 20 世纪 90 年代明显增加。如果以 60% 的化肥消费用于

粮食作物^[15],按照 5 中国农业年鉴 6 的资料,从 20 世纪 90 年代至今,经过了 15 年的时间,粮食产量仅从 410 t hm⁻² 增至 416 t hm⁻²,而化肥施用量则从 2 590 万 t 增至 4 766 万 t 化肥用量的大幅度增加伴随的是粮食作物产量的徘徊^[16]。2000~2002 年中国农业大学与农业部全国农业技术推广服务中心对全国 2 万多个农户进行的调查发现,水稻、小麦和玉米的氮肥平均施用量分别为 215 kg hm⁻²、187 kg hm⁻² 和 209 kg hm⁻²⁽¹⁾,已大大高于朱兆良等(1998)总结大量田间试验数据提出的主要粮食作物最佳氮肥用量 150~180 kg hm⁻² 的水平^[10]。随着我国耕地的日益减少、人口的不断增加,未来我国粮食的需求还会继续增长,因而只有持续增产

(1)王激清. 我国主要粮食作物施肥增产效应和养分利用效率的分析与评价. 中国农业大学博士学位论文, 2007

(2)马文奇. 山东省作物施肥现状、问题与对策. 中国农业大学博士学位论文, 1999

(3)赵荣芳. 冬小麦-夏玉米轮作中水氮资源的优化管理及其可持续性评价. 中国农业大学博士学位论文, 2006

(4)崔振岭. 1 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理))) 从田块到区域尺度 1 中国农业大学博士学位论文, 2005

才能满足国家粮食安全的需求。因此,化肥用量的增减必须以同时大幅度增加作物产量和提高养分效率为目标。

21412 忽视土壤养分资源的利用 一般而言,土壤肥力水平是决定肥料利用效率高低的因素,即在土壤肥力水平较低时,得到高的肥料利用率和农学效率的几率较大,反之在高肥力土壤上得到高的肥料利用率和农学效率的几率较小^[17]。近20年来,随着化肥的施用、土壤质量的改善和作物生产水平的提高,特别是部分地区过量施肥与作物根茬还田量的增加,我国土壤肥力总体上在普遍提高,耕地土壤全量养分稳中上升,氮、磷等速效养分明显增加,部分农田已表现为过量累积。与第二次土壤普查结果相比,当前我国华北、华东、华中和西北地区耕地土壤有机质和全氮含量稳中上升,西南地区有升有降,东北地区有所下降^[18-20]。受经济发达地区常年过量施氮的影响,我国很多地区土壤剖面中出现高量的无机氮(主要是硝态氮)累积,这种现象在北方旱地土壤中表现特别突出。我们对华北平原小麦-玉米轮作体系多年多点($n > 500$)的调查表明,作物生育期内0~90 cm土壤剖面硝态氮含量平均高于 200 kg hm^{-2} ^[21],远高于欧盟国家规定的大田作物收获后0~90 cm土层硝态氮残留量不高于 50 kg hm^{-2} 的规定^[22]。与此相比,山东惠民县大棚蔬菜0~90 cm和90~180 cm土层硝态氮累积量分别高达 $N 1 165$ 和 $1 028 \text{ kg hm}^{-2}$,果园0~90 cm和90~180 cm土层硝态氮累积量也高达 $N 613$ 和 976 kg hm^{-2} ,粮食作物收获后0~90 cm土层硝态氮累积量还算低的,但也超过 $N 200 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[23]。北京市保护地蔬菜田0~400 cm土壤剖面硝态氮累积量平均达 $1 230 \text{ kg hm}^{-2}$,果园平均为 $1 148 \text{ kg hm}^{-2}$,粮田平均为 459 kg hm^{-2} ^[24]。对土壤硝态氮含量、农民习惯施肥量、作物产量、氮肥利用效率和氮素损失量进行综合分析发现,土壤高量硝态氮残留是造成当前作物基础产量高、施氮增产效应不明显的主要原因;而农民施肥却未考虑土壤剖面高量硝态氮积累这一因素,这是造成农民习惯施肥条件下氮素损失量大和氮肥利用效率降低的重要原因。

20多年来,我国各区耕地土壤速效磷含量呈显著增加趋势,部分耕层土壤速效磷含量表现为过量

累积。我们最近对全国几个有代表性的长期定位试验结果分析表明,土壤磷盈余是我国土壤有效磷变化的主要特征,根据土壤收支平衡和有效磷消长关系预测,从1980年至2003年我国农田土壤有效磷增长约为 19 mg kg^{-1} ⁽⁵⁾。土壤有效磷含量的增加不仅会影响磷肥的利用率,而且给我们提出了协调资源利用与环境保护关系的新问题。

21413 环境养分来源多,数量大 随着我国经济快速增长、畜牧业的发展以及化学肥料施用量的增加,通过大气干湿沉降、灌溉水等途径进入农田生态系统的环境养分数量越来越大,在实际生产中却很少有人注意这部分养分资源对土壤养分和作物营养的贡献。我们从1998年起率先开始在中德国际合作项目和随后启动的国家自然科学基金重大项目中设立了专门的课题对此进行深入研究,发现大气氮素干湿沉降已成为作物营养的重要来源^[25 26],如华北平原的多年多点研究表明,大气氮素年沉降总量可达 $80 \sim 90 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[27],其中年均湿沉降输入的无机态氮为 27 kg hm^{-2} 、有机态氮为 8 kg hm^{-2} ^[28],而干沉降的贡献甚至高于湿沉降⁽⁶⁾。全国稻田生态系统7个试验点的测定结果表明,大气湿沉降输入氮量为 $12 \sim 42 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[24]。同样灌溉水中蕴藏着大量的氮、磷、钾和微量元素,成为粮食作物农田生态系统的重要补充部分,全国稻田生态系统7个试验点的测定结果表明灌溉水输入的氮量为 $7 \sim 32 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[28],而华北地区小麦-玉米轮作体系中,灌溉输入的氮量平均为 13 kg hm^{-2} ^[29]。目前在水稻、小麦和玉米农田生态系统环境养分输入中,虽然生物固氮量是最不清楚的一项,但生物固氮对粮食作物农田生态系统养分输入仍是不可忽视的,如鲁如坤^[30]指出稻田的生物固氮量为 30 kg hm^{-2} ,朱兆良等^[11]估计我国小麦、玉米等旱作作物的非共生固氮量为 15 kg hm^{-2} 。这些环境来源的养分是影响我国肥料利用效率的重要方面,必须引起足够的重视。

21414 作物产量潜力未充分挖掘 提高作物产量是提高肥料利用效率的重要途径。长期以来我国农业生产一直以精耕细作著称于世,粮食单产水平还是较高的,以2005年为例,我国水稻、小麦和玉米的平均产量分别为 613 t hm^{-2} 、 413 t hm^{-2} 和 511 t hm^{-2} ,分别

(5)曹宁. 基于农田土壤磷肥力预测的我国磷养分资源管理研究. 西北农林科技大学博士学位论文, 2006

(6)沈建林, 刘学军, 等. 个人交流

为世界平均水平的 1162 倍、1146 倍和 1109 倍^[26], 目前在试验条件下不同地区的产量水平分别是水稻 $6\sim 8\text{ t hm}^{-2}$, 小麦 $4\sim 6\text{ t hm}^{-2}$, 玉米 $5\sim 8\text{ t hm}^{-2}$ (表 3~表 5)。对比我国与发达国家粮食单产水平可以发现, 我国主要粮食作物单产水平还有待提高, 如 2005 年法国小麦的平均单产可达 710 t hm^{-2} , 美国玉米的平均单产可达 913 t hm^{-2} ^[31]。而在高产栽培试验中, 水稻、小麦和玉米的单产可达 13 t hm^{-2} 、 10 t hm^{-2} 、 15 t hm^{-2} , 甚至更高, 可见实际产量仅发挥了高产潜力的 50% 左右, 所以中国目前粮食作物产量潜力仍未充分挖掘。大量的研究证明, 养分高效作物品种在同样的投入下可以较常规品种增产 10%~20%, 按 10% 保守估算, 如果全国三大粮食作物均采用这类品种, 在不增加肥料养分投入和不改变播种面积的情况下, 可以实现粮食增产 4 000 万 t。因此, 为实现我国粮食作物肥料利用效率的提高, 仍需要加强这方面的研究。

21415 养分损失未能有效阻控 提高肥料利用效率不仅可通过提高作物产量和养分吸收量来实现, 而且也要有效地阻控农田养分损失。分析表 6 的结果可以说明, 在肥料施用量为 $180\sim 240\text{ kg hm}^{-2}$ 的条件下, 水稻、小麦和玉米可以达到最高产量, 而肥料利用率只有 22%~24%, 表明高投入虽能在一定程度上提高粮食作物的产量, 但也大大地增加了养分损失的可能性。我国耕地质量差、生产管理粗放、施肥技术不配套等导致农田养分损失量很大。如华北平原小麦 ($n=121$)、玉米季 ($n=148$) 农民习惯氮肥管理的氮肥损失分别高达 159 和 151 kg hm^{-2} , 占总氮肥用量的 50% 和 59%^[32, 33]。

215 提高肥料利用效率的主要途径

21511 同时解决过量施肥与施肥不足的问题

在我国, 部分地区和农田过量施肥导致了主要粮食作物肥料利用效率的下降, 还带来严重的环境污染问题, 而部分地区和农田施肥不足造成产量潜力无法发挥也导致肥料利用效率下降。我国不同地区如东部和西部、南方和北方的施肥量差异均很大, 甚至相邻的乡镇和农户也是过量施肥和施肥不足同时存在。在目前的栽培技术和产量水平下, $150\sim 200\text{ kg hm}^{-2}$ 是专家们推荐的总量, 即使在高产条件下推荐量也不会超过 250 kg hm^{-2} 。因此, 如果将氮肥施用量分成 3 级, $150\sim 250\text{ kg hm}^{-2}$ 为适中, 小于 150 kg hm^{-2} 为不足, 大于 250 kg hm^{-2} 为过量。对

全国 2 万多个农户调查数据的分析发现有 1/3 的农户氮肥施用过量, 1/3 的农户氮肥施用不足^[15], 而只有 1/3 的农户施氮量落在合理用量的范围内。因此在中国必须同时解决过量施肥和施肥不足的问题, 仅仅节肥增效是不够的, 更重要的是要高产高效。

21512 充分利用土壤和环境养分 土壤养分作为作物生长重要的营养来源, 是养分管理的重点之一; 环境中的一些养分能通过大气干湿沉降、灌溉水、生物固氮等途径进入作物生产系统, 它们也是作物生长需要的养分资源的重要组成部分。相对产量 (无肥区作物养分吸收量/施肥区作物养分吸收量 @100%) 这个指标很好地反映了作物对来自土壤和环境养分的依存程度, 根据我们对收集的试验数据进行分析表明, 水稻、小麦和玉米成熟期, 氮的相对产量均达到了 70% 以上, 磷和钾的相对产量也达到了 70%~80%。因此农户必须在充分利用土壤养分和环境养分基础上, 合理施用化肥, 减少化肥的损失和向环境的排放, 这才是提高肥料利用效率的长远目标, 在当前的生产条件下, 肥料用量的选择也必须在综合考虑土壤肥力和环境养分来源的基础上, 重新制定推荐指标。

21513 有效阻控化肥养分的损失 对于有效阻控化肥养分的损失、降低其环境影响的氮肥施用原理和技术, 国内外已进行了大量的研究, 主要包括 (1) 充分利用作物对土壤中矿质氮的竞争吸收能力, 以提高利用率并削弱导致氮肥损失的各个转化和迁移过程的强度; (2) 避免土壤中过量矿质氮的积累, 以减少进行各个转化和迁移过程的矿质氮的浓度; (3) 根据不同土壤和气象条件下氮肥的主要损失机制和途径, 确定相应的施用技术、方法、时期及氮肥种类; (4) 消除影响作物生长的限制因素, 如干旱或渍害以及除氮素外的其他养分的缺乏等。根据这些原则对一些施用技术和方法已经进行了大量研究, 其中效果比较明显且稳定的有: (1) 确定适宜的氮肥用量, (2) 氮肥深施, (3) 减少生长前期的施用量并将其重点施于旺盛生长期, (4) 平衡营养, (5) 水肥综合管理技术等。其中确定适宜的氮肥施用量和合理施肥时期是当前减少氮素损失的重点和核心。大量研究表明, 冬小麦春季追施氮肥损失量明显低于秋施氮肥^[34~36]。崔振岭等的研究也表明优化氮肥总量和基追比例可在保证小麦、玉米产量的同时, 较农民习惯氮肥管理减少氮素损失 116 和 65 kg hm^{-2} ^[32, 33]。

21514 同时实现作物高产与养分资源高效利用

在我国人多地少、资源紧缺的情况下,保证粮食作物的高产是满足不断增长的人口需求的必然选择。进入新世纪以来,虽然我国农业生产的物质投入不断增加,但主要作物单产未见大幅度提高,资源利用效率持续下降,优良品种的高产潜力未能得到充分发挥。对比我国品种区域试验产量和大田作物平均产量发现,近10年来新品种在区域试验中可实现的产量明显提高,而大田的平均产量增长缓慢。为了解决这一问题,1995年以来,我国加强了作物高产、超高产的栽培技术研究,取得了显著进展,三大作物的高产记录不断刷新,存在的主要问题一是小面积上获得的高产纪录难以重演,更难在生产中大面积实现,二是水肥投入普遍过大,资源利用效率不高。1995-2005期间,国家自然科学基金重大项目/主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究0和农业部/9480项目/养分资源综合管理技术的引进和建立0在农田养分管理的理论与实践方面取得了可喜的进展,提出了总量控制与分期调控相结合的管理策略,在集约化生产中可显著减少化肥投入,提高养分利用效率,不足之处是增产幅度不够大,迫切需要加强与高产栽培的结合。

要同时实现作物高产与资源高效,就必须走挖掘作物产量潜力和提高土壤生产力,而非过度依赖水肥等大量投入的道路。充分发挥现有品种产量潜力、不断提高作物产量的关键是通过作物群体结构调控实现作物开花物质生产和分配的动态协调,同时,通过水肥调控实现水分养分供应与高产作物群体需求的时空一致;而以提高土壤基础生产力为核心的土壤调控则是稳定实现大面积作物高产高效的关键。

参考文献

- [1] 朱兆良. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理. 见: 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 228~245. Zhu Z L. Fertilizer fate and N management in agroecosystem. In: Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in Soil of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228~245.
- [2] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划. 北京: 中国农业科技出版社, 1986. Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Chinese Chemical Fertilizer Planning (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science & Technology Press, 1986.
- [3] 林忠辉, 陈同斌, 周立祥. 中国不同区域化肥资源利用特征与合理配置. 资源科学, 1998, 20(5): 26~31. Lin Z H, Chen T

- B Zhou L X. Characteristics of the application of chemical fertilizers and their rational allocation in China (In Chinese). Resources Science, 1998, 20(5): 26~31.
- [4] 孙传范, 曹卫星, 戴廷波. 土壤-作物系统中氮肥利用率的研究进展. 土壤, 2001, 33(2): 64~69. Sun C F, Cao W X, Dai T B. Research progresses in nitrogen use efficiency of soil-plant systems. Soils, 2001, 33(2): 64~69.
- [5] Novoa R, Lom  s R S. Nitrogen and plant production. Plant and Soil, 1981, 58: 177~204.
- [6] Cassman K G, Peng S, Oik D C, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. Field Crops Research, 1998, 56: 7~38.
- [7] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26: 1315~1333.
- [8] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策. 见: 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998: 38~51. Zhu Z L. The status, problems and countermeasures of nitrogen fertilizer application in China. In: Li Q Y, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer Issues of Sustainable Agriculture Development in China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998: 38~51.
- [9] Dobemmann A. Nitrogen use efficiency: state of the art. Paper of the IFA International Workshop on Enhanced Efficiency Fertilizers. Frankfurt, Germany, 2005.
- [10] Cassman K G, Dobemmann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. Ambio, 2002, 31: 132~140.
- [11] Ladha JK, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. Advances in Agronomy, 2005, 87: 86~156.
- [12] Peng S, Cassman K G. Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated N fertilizer efficiencies in irrigated rice. Agronomy Journal, 1998, 90: 178~185.
- [13] Dobemmann A, Dawe D, Roetter R P, et al. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment. Agronomy Journal, 2000, 92: 633~643.
- [14] IFA/UNEP. The Fertilizer Industry, World Food Supplies and the Environment. Paris: IFA, 1998.
- [15] 李家康, 林葆, 梁国庆, 等. 对我国化肥施用前景剖析. 磷肥和复肥, 2001, 16(2): 1~5. Li J K, Lin B, Liang G Q, et al. Analyses for the future of chemical fertilizer application in China (In Chinese). Phosphorous and Compound Fertilizer, 2001, 16(2): 1~5.
- [16] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 1980~2006. Editorial Committee of Chinese Agriculture Yearbook. Chinese Agriculture Yearbook (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1980~2006.
- [17] Eagle A J, Bird J A, Howarth W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. Agronomy Journal, 2000, 92: 1096~1103.
- [18] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. 科学通报, 2007, 51: 750~763. Huang Y, Sun W J

- Change trend of organic carbon in farmland surface soil of Mainland China during the past 20 years (In Chinese). *Science Bulletin*, 2007, 51: 750~ 763
- [19] 赵军, 商磊, 葛翠萍, 等. 基于GIS的黑土区土壤有机质空间变化分析. *农业系统科学与综合研究*, 2006, 22(4): 304~ 307. Zhao J, Shang L, Ge C P., et al. Spatial variability of soil organic content on black soil in Heilongjiang Province based on GIS (In Chinese). *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2006, 22(4): 304~ 307
- [20] 徐艳, 张凤荣, 汪景宽, 等. 20年来我国潮土区与黑土区土壤有机质变化的对比研究. *土壤通报*, 2004, 35(2): 102~ 105. Xu Y, Zhang F R, Wang J K., et al. Temporal changes of soil organic matter in ustic cambisols and udic isohumols of China in recent twenty years (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science* 2004, 35(2): 102~ 105
- [21] Cui Z L, Zhang F S, Miao Y X, et al. Soil nitrate-N levels required for high yield maize production in the North China Plain Nutrient Cycling Agroecosystem, 2008. DOI 10.1007/s10705-008-9180-4
- [22] van der Pöeg R R, Rinke H, Machulla G, et al. Postwar nitrogen use efficiency in West Germany agriculture and groundwater quality. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 1203~ 1212
- [23] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environment Pollution*, 2006, 143: 117~ 125
- [24] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征. *中国农业科学*, 2004, 37: 692~ 698. Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, et al. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 692~ 698
- [25] He C E, Liu X J, Fangmeier A, et al. Quantifying the total airborne nitrogen input into agroecosystems in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121: 395~ 400
- [26] Liu X J, Ju X T, Zhang Y, et al. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113: 370~ 377
- [27] Zhang Y, Liu X J, Fangmeier A, et al. Nitrogen inputs and isotopes in precipitation in the North China Plain. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 1436~ 1448
- [28] 申建波, 张福锁. 水稻养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. Shen J B, Zhang F S. *Theory and Practices for Integrated Nutrient Management in Rice* (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2006
- [29] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. Chen X P, Zhang F S. *Theory and Practices for Integrated Nutrient Management in Wheat-Maize Rotation Systems* (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2006
- [30] 鲁如坤. 土壤-植物营养原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998. Lu R K. *Principles of Soil-Plant Nutrition and Fertilization* (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 1998
- [31] FAO. FAO statistical databases agriculture data. <http://faostat.fao.org/faostat> 2005
- [32] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, et al. On-farm evaluation of the improved soil N_{min}-based nitrogen management for summer wheat in North China Plain. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 517~ 525
- [33] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48~ 55
- [34] LopezBellido L, LopezBellido R, J Redondo R. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research*, 2005, 94: 86~ 97
- [35] Randall G W, Mulla D J. Nitrate-N in surface water as influenced by climatic conditions and agricultural practices. *J Environment Quality*, 2002, 30: 337~ 344
- [36] Sanchez C A, Blackmer A M. Recovery of anhydrous ammonia derived nitrogen during three years of corn production in Iowa. *Agronomy Journal*, 1988, 80: 102~ 108

NUTRIENT USE EFFICIENCIES OF MAJOR CEREAL CROPS IN CHINA AND MEASURES FOR IMPROVEMENT

Zhang Fusuo¹, Wang Jiqing¹, Zhang Weifeng¹, Cui Zhenling¹, Ma Wenqi², Chen Xinping¹, Jiang Rongfeng¹

(¹ Key Laboratory of Plant Nutrition, MOA, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, MOE, College of Resources and Environmental Sciences, CAU, Beijing 100193, China)

(² College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract Nutrient use efficiency is an important index not only for fertilizer recommendation on the field scale but also for forecasting fertilizer demand on the regional and national scales; however, exact nutrient use efficiencies of the major cereal crops in China are not well known yet. In this paper, data from 1333 field experiments were collected and used for analysis and evaluation of partial factor productivity (PFP), agronomic efficiency (AE), apparent recovery efficiency

(RE) and physiological efficiency (PE) of these crops. Results show that AE_N of rice, wheat and maize was 10.4 kg kg^{-1} , 7.99 kg kg^{-1} and 9.80 kg kg^{-1} , respectively and RE_N of rice, wheat and maize was 28.3%, 28.2% and 26.1%, respectively, obviously much lower than the world's average, which is attributed to overuse of chemical fertilizer, ignorance of contribution of nutrients from the environment and the soil, failure to bring crop yield potential into full play and inability to inhibit nutrient losses effectively. Based on such analyses, some measures to drastically improve nutrient use efficiencies are suggested in this paper, such as adopting a multidisciplinary approach involving plant nutrition, soil science and agronomy, making full use of nutrients from the soil and the environment, matching rhizospheric nutrient supply with nutrient demand of high yielding crops spatially and temporally in coincidence. Thus higher crop yield and higher nutrient use efficiency can be realized simultaneously, while high crop yield and environmental protection can be maintained in harmony.

Key words: Agronomic nutrient efficiency, Nitrogen use efficiency, Influencing factor, Measures of improvement