

我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率^①

闫 湘, 金继运, 梁鸣早

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:总结了我国 19 个省 13 667 个地块施肥调查结果和 22 个省的 32 个养分监测村田间试验结果, 分析研究了我国三大粮食作物化肥施用状况、增产率和化肥利用效率。结果表明, 水稻、小麦和玉米施肥量分别为 294.8、263.6 和 269.6 kg/hm², 氮肥增产率分别为 28.4%、30.9% 和 26.4%, 磷肥增产率为 9.2%、14.3% 和 12.2%, 钾肥增产率为 11.1%、7.1% 和 11.0%; 氮肥利用率分别为 27.3%、38.2% 和 31.0%, 磷肥利用率为 13.0%、16.9% 和 15.3%, 钾肥利用率为 28.1%、25.6% 和 30.5%; 氮肥农学效率分别为 11.3、11.1 和 10.1 kg/kg, 磷肥农学效率为 9.1、7.9 和 9.8 kg/kg, 钾肥农学效率为 7.2、5.6、8.1 kg/kg。按当时的农业生产条件和产量水平, 氮肥过量施用约占 25%~40%, 施用不足占 10%~25%。我国谷物氮肥利用率低于同期世界平均水平 20%~30% 左右, 氮肥农学效率与世界平均水平相比低 10% 左右。中国粮食生产高投入并没有实现高利用效率, 化肥减量增效是施肥调控政策的首要目标。

关键词: 肥料利用效率; 增产率; 施肥量; 粮食作物

中图分类号: S147.2; S147.5 文献标识码: A

我国是一个农业和人口大国, 中国政府历来高度重视粮食问题。改革开放以来, 中国的粮食生产取得举世瞩目的成绩, 以占世界 9% 的耕地养活了世界上 20% 的人口, 创造了在人多地少的国家粮食自给的奇迹。中国人均耕地是世界平均水平的 40% 左右, 三分之二是中低产田。在巨大的粮食需求压力下, 化肥的大量施用在保障我国粮食安全上发挥了重要作用。值得注意的是, 1980 年至今的三十几年间, 我国粮食产量增长了近 85%, 但化肥施用量却增长了 4.5 倍, 化肥施用量的增速远远超过粮食产量的增速。当化肥施用量达到一定程度后, 其对粮食增产的边际贡献率逐渐下降。过量施用化肥导致肥料利用率不高, 肥料损失严重, 造成巨大的生态环境污染, 威胁到农业可持续发展。如何保证粮食产量合理稳定增长的同时, 提高肥料利用率, 减少化肥过量施用带来的不良影响, 解决社会发展所面临的资源与环境问题, 是摆在我们面前的一项重要课题。

近些年来, 我国一些学者开展了部分省区范围内的粮食作物施肥状况、增产效应和养分效率的研究^[1-3], 还有一些学者对我国较大范围地区不同作物的肥料利用率和肥效进行了研究, 张福锁等^[4]对

2001—2005 年全国粮食主产区肥料利用率进行了分析研究, 结果显示水稻、小麦和玉米氮肥利用率分别为 28.3%、28.2% 和 26.1%, 远低于国际水平, 与 20 世纪 80 年代相比呈下降趋势。李红莉等^[5]2008 年对全国 23 个省粮食作物施肥量和化肥效率进行了调查研究, 发现三大粮食作物的化肥效率大小顺序为水稻>小麦>玉米, 化肥偏生产力分别为 15.7、11.9 和 11.5 kg/kg。本文通过农户施肥调查和田间试验相结合的方法, 系统分析研究了我国主要省(区)水稻、小麦和玉米的化肥施用状况、增产效应和化肥利用效率。

1 材料与方法

1.1 农户施肥调查

在全国 19 个省(区)开展农户施肥情况调查, 其中北方 10 省(区), 南方 9 省(区), 北方分别是山东、河南、河北、吉林、辽宁、黑龙江、山西、宁夏、陕西和天津, 南方分别是江苏、浙江、安徽、湖北、重庆、四川、贵州、湖南和广西。每个省(区)选择 5~10 个县(市), 每个县(市)抽取 3~5 个乡。调查作物为水稻、小麦和玉米, 共调查 13 667 个地块, 其中水稻 4 608 块, 小麦 4 831 块, 玉米 4 228 块。调查时间为

基金项目: 中国—加拿大国际合作项目“中国持续农业发展中的养分与肥料管理”资助。

作者简介: 闫湘(1972—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 副研究员, 主要从事肥料登记行政审批与肥料资源高效利用研究。E-mail: yanxiang@caas.cn

2002—2005 年。

1.2 田间试验

田间试验地点为 IPNI(国际植物营养研究所)设在全国 22 个省(市、自治区)的 32 个土壤养分监测村。试验设 4 个处理: NPK,最佳施肥推荐处理; PK; NK; NP。小区试验,每处理 3 次或 4 次重复,

随机区组排列。氮肥品种为尿素,磷肥品种为过磷酸钙或重过磷酸钙,钾肥品种为氯化钾。每个养分监测村均采用非定位试验,种植作物为水稻、小麦和玉米,连续种植 4 年,作物品种均采用当地生产上主推的高产品种,栽培管理措施与当地农业生产相同。水稻、小麦和玉米施肥量见表 1~表 3。

表 1 水稻施肥量(4 年平均)(kg/hm²)
Table 1 Average fertilizer rates of rice in 4 years

地点	土壤类型	作物	施肥量		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
辽宁铁岭	水稻土	水稻	276.0 ± 53.7	114.0 ± 13.4	174.0 ± 13.4
吉林公主岭	黑土	水稻	175.0	69.0	90.0
黑龙江方正	草甸土	水稻	150.0	60.0	75.0
宁夏灵武	灌淤土	水稻	225.0	225.0	150.0
江苏通州	灰潮土	中稻	300.0	90.0	225.0
浙江绍兴	水稻土	中稻、晚稻	193.4 ± 14.8	97.0 ± 15.7	126.0 ± 13.4
上海奉贤	水稻土	晚稻	140.0 ± 77.0	125.0 ± 52.7	150.0 ± 57.0
湖北黄冈	水稻土	早稻、中稻	191.3 ± 22.5	112.5 ± 15.0	157.5 ± 15.0
湖北荆门	潮土	中稻	180.0	90.0	150.0
江西上高	红壤	早稻、晚稻	157.5 ± 15.0	67.5 ± 19.4	187.5 ± 14.0
重庆梁平	紫色土	中稻	135.0	90.0	90.0
贵州平坝	黄壤	晚稻	150.0	90.0	225.0
福建莆田	水稻土	晚稻	157.5 ± 15.0	45.0	82.5 ± 28.7
云南高明	水稻土	中稻	300.0	120.0	180.0
四川崇州	黄壤	中稻	165.0	60.0	90.0
湖南沅江	水稻土	早稻、晚稻	161.5 ± 23.8	51.7 ± 25.5	119.4 ± 41.4
海南琼州	水稻土	晚稻	242.5 ± 29.0	158.0 ± 39.6	206 ± 50.9

表 2 小麦施肥量(4 年平均)(kg/hm²)
Table 2 Average fertilizer rates of wheat in 4 years

地点	土壤类型	作物	施肥量		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
河南驻马店	砂礓黑土	冬小麦	202.5 ± 26.0	112.5 ± 15.0	127.5 ± 15.0
河南洛阳	褐土	冬小麦	180.0	120.0	120.0
河北辛集	潮土	冬小麦	187.5 ± 43.3	150.0	150.0
山西临汾	石灰性褐土	冬小麦	180.0	150.0	150.0
甘肃武威	灌漠土	春小麦	237.5 ± 66.1	127.5 ± 15.0	93.8 ± 37.5
山东海阳	棕壤	冬小麦	225.0	150.0	160.0
江苏通州	灰潮土	冬小麦	175.0	90.0	150.0
安徽亳州	砂礓黑土	冬小麦	175.0 ± 8.7	90.0	90.0
重庆梁平	紫色土	冬小麦	150.0	90.0	90.0
云南曲靖	红壤	冬小麦	142.5 ± 15.0	146.3 ± 7.5	187.5 ± 75.0
四川简阳	黄壤	冬小麦	150.0	75.0	75.0
四川崇州	黄壤	冬小麦	135.0	60.0	75.0

表 3 玉米施肥量(4 年平均)(kg/hm²)
Table 3 Average fertilizer rates of maize in 4 years

地点	土壤类型	作物	施肥量		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
辽宁新民	草甸土	春玉米	258.0 ± 26.8	114.0 ± 13.4	186.0 ± 32.9
辽宁沈阳	黑土	春玉米	200.0	63.8	86.3
吉林公主岭	黑土	春玉米	205.4 ± 20.1	60.0	87.1 ± 12.3
黑龙江双城	黑土	春玉米	150.0	225.0	81.3 ± 12.5
河南驻马店	砂礓黑土	夏玉米	225.0	90.0	150.0
河南洛阳	褐土	夏玉米	225.0	67.5 ± 19.4	150.0
河北辛集	潮土	夏玉米	195 ± 41.4	90.0	150.0
河北唐山	潮土	夏玉米	180.0	90.0	135.0
山西临汾	石灰性褐土	夏玉米	227.5 ± 19.3	45.0	183.1 ± 37.2
山西忻州	潮土	夏玉米	225.0	120.0	200.0
山东海阳	棕壤	夏玉米	198.8 ± 27.7	60.0	145.0 ± 33.2
甘肃武威	棕壤	春玉米	330.0 ± 81.2	90.0	168.8 ± 94.4
安徽六安	黄褐土	夏玉米	187.5 ± 26	51.7 ± 25.5	90.0
重庆梁平	紫色土	春玉米	-	97.0 ± 15.7	150.0
贵州平坝	黄壤	春玉米	150.0	125.0 ± 52.7	150.0
四川简阳	黄壤	春玉米	270±34.6	112.5 ± 15.0	75.0

1.3 分析测定方法

水稻、小麦和玉米籽粒和秸秆中氮、磷、钾分析测定方法如下，全氮：H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，蒸馏法测定；全磷：H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，钒钼黄比色法测定；全钾：H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，原子吸收法测定。

1.4 数据处理

由于农业生产水平和农户施肥技术水平的差异大，调查数据中存在一定的奇异数据。为保证统计分析结果的准确性和可靠性，在数据处理分析之前应用统计学方法，研究数据分布特征，提前发现并合理地消除或减弱奇异值的影响。

化肥折纯量计算：除复混肥以外的化肥根据其净养分含量由实物量折算纯养分。复混肥折纯分两种情况，一是对于调查标识出 N、P₂O₅、K₂O 含量的，按照农户调查结果计算；二是一些复混肥调查只有氮、磷、钾养分的总含量，没有分量，这部分采用该省肥料调查中所有标明复混肥 N-P₂O-K₂O 浓度的加权平均值作为换算依据。

有机肥折纯量计算：调查发现农民施用的有机肥种类繁多，包括各种粪肥、厩肥、饼肥、土杂肥、绿肥等。作者收集了目前公开发表的各种有机肥料的养分含量^[6-10]，作为有机肥料的折纯采用的养分含量标准。

农学效率(agronomic efficiency, AE)指每千克肥

料养分生产的籽粒(kg/kg)，是单位施肥量对作物籽粒产量增加的反映^[11]。有人也称之为生产指数(productivity index, PI)^[12]，反映了肥料的生产效率。计算公式为： $AE=(Y-Y_c)/N_f$ ，其中 Y 为施某一养分条件下的籽粒产量(kg)， Y_c 为不施某一养分条件下的籽粒产量(kg)， N_f 为所施肥料中的某一养分量(kg)^[13-16]。

生理效率(physiological efficiency, PE)是指作物因施用肥料而增加的产量与从肥料中吸收的养分量的比值，即作物每吸收 1 kg 养分而增加的产量(kg)。反映了作物对所吸收的肥料在作物体内的利用效率。计算公式为： $PE=(Y-Y_c)/(N_{up}-N_c)$ ，其中 Y 为施肥区籽粒产量(kg)， Y_c 为对照产量(kg)， N_{up} 为植物地上部吸收的某一养分量(kg)， N_c 为对照的地上部吸收的养分量(kg)^[13-16]。

肥料利用率也叫肥料当季回收率(fertilizer recovery efficiency, FRE)，指作物吸收来自所施肥料中的养分占所施肥料养分总量的百分数。它的大小可以反映作物对氮肥的利用程度。差减法计算公式为： $FRE=(N_{up}-N_c)/N_f$ ，其中 N_{up} 为施某一养分时作物地上部吸收的这种养分量(kg)， N_c 为不施某一养分条件下作物地上部吸收的这种养分量(kg)， N_f 为所施肥料中的某一养分量(kg)^[15-18]。

农学效率、生理效率和肥料利用率每季试验数据分别计算后求平均值。

2 结果与分析

根据 19 个省水稻、小麦和玉米肥料施用量统计结果，水稻施氮量最高，为 294.8 kg/hm²，小麦和玉米接近，分别为 263.6 和 269.6 kg/hm²。水稻施氮量在 224.5 ~ 465.4 kg/hm² 之间变化，小麦施氮量在 161.3 ~ 392.2 kg/hm² 之间，玉米施氮量的变幅是 174.4 ~ 335.9 kg/hm²。

2.1 主要粮食作物施氮量频率分布

2.1.1 施氮量频率分布 作物施氮量调查显示，水稻施氮量最高，其次是玉米，最低是小麦，分别为 193.5、186.8、165.3 kg/hm²。水稻、小麦和玉米都有一个相对集中的施氮区间，其中，水稻在 150 ~ 350 kg/hm² 之间的频率占 67%，小麦施氮量主要分布在 75 ~ 325 kg/hm² 之间，占 84%，玉米分布在 100 ~ 350 kg/hm² 之间的占 71%(图 1)。

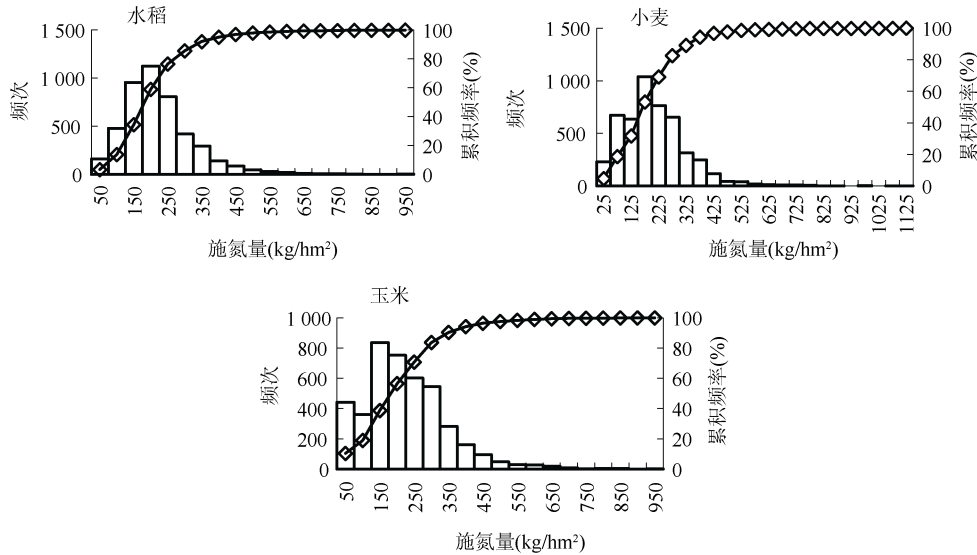


图 1 水稻、小麦、玉米施氮量的频率分布

Fig. 1 Frequency distributions of N fertilizer rates of rice, wheat and maize

2.1.2 施磷量频率分布 施磷量分布与施氮量有很大差异，频率分布图基本都呈倒三角型，说明绝大多数农户施磷量都集中在较低的水平上。随着施磷量的增加，频率逐渐减少。水稻、小麦和玉米施磷量集

中区域分别在 25 ~ 125、25 ~ 225 和 25 ~ 175 kg/hm² 之间，累积频率分别为占 94%、96%、95%(图 2)。施磷量最高的是小麦，平均 76.9 kg/hm²；最低的是玉米，65.5 kg/hm²。

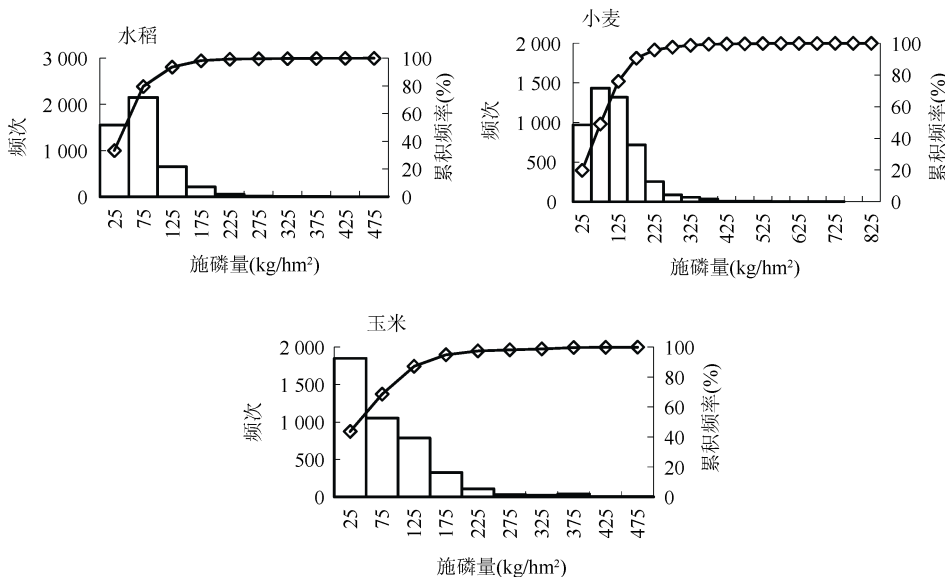


图 2 水稻、小麦、玉米施磷量的频率分布

Fig. 2 Frequency distributions of P fertilizer rates of rice, wheat and maize

2.1.3 施钾量频率分布 19 个省水稻平均施钾量为 31 kg/hm²，高于小麦和玉米约 10 kg/hm²。作物施钾量的频率分布特点与施磷量相似，也呈倒三角型(图 3)，但不同的是，主要集中在不施钾或低施钾量水平上，并且随着作物施钾量的增加，频率迅速下降。水稻施钾量在 0~75 kg/hm²范围的占 73%，小麦在 0~40 kg/hm²的占 76%，玉米 0~75 kg/hm²的占 92%。说明当时生产条件下绝大多数农户钾肥施用水平较低，平衡施肥观念还没有深入农户。应当加大补钾工程力度，大力推广平衡施肥技术。

2.2 主要粮食作物化肥增产效应

产量的提高需要一定的养分吸收为基础。在试验施肥水平下，施用氮磷钾肥，水稻、小麦和玉米地上部吸氮量>吸钾量>吸磷量，变化范围分别为 133.5~219.1、103.7~185.7 和 28.8~54.4 kg/hm²。施用氮磷钾肥可以显著提高作物产量，氮磷钾肥平均增产量分别为 2 070.7、865.5 和 765.1 kg/hm²，增产量的变化

范围分别为 1 352.7~2 324.1、725.1~1 090.3 和 381.2~981.0 kg/hm²(表 4~ 表 6)。

从水稻、小麦和玉米氮肥增产率分布(图 4)来看，氮肥增产率主要分布在 20%~60% 之间，水稻、小麦和玉米之间差异不大。磷肥和钾肥的增产率明显低于氮肥，其中，磷肥除南方小麦以外，主要分布在 10%~15% 之间；钾肥除南方玉米外，主要分布 10%~20% 之间。

2.3 水稻、小麦、玉米氮磷钾肥利用效率

总体来看，氮磷钾肥利用率变化范围都非常大，氮肥利用率最低 3.4%，最高 86.1%；磷肥利用率最低 0.1%，最高 71.2%；钾肥利用率最低 0.8%；最高 89.0%(表 7~ 表 9)。氮肥利用率在小麦上最高，平均 38.2%，在水稻和玉米上接近，均在 30% 左右；磷肥利用率在水稻、小麦和玉米上差异不大，分别是 13.0%、16.9%、15.3%；钾肥利用率均在 30% 左右，分别是 28.1%、25.6%、30.5%。

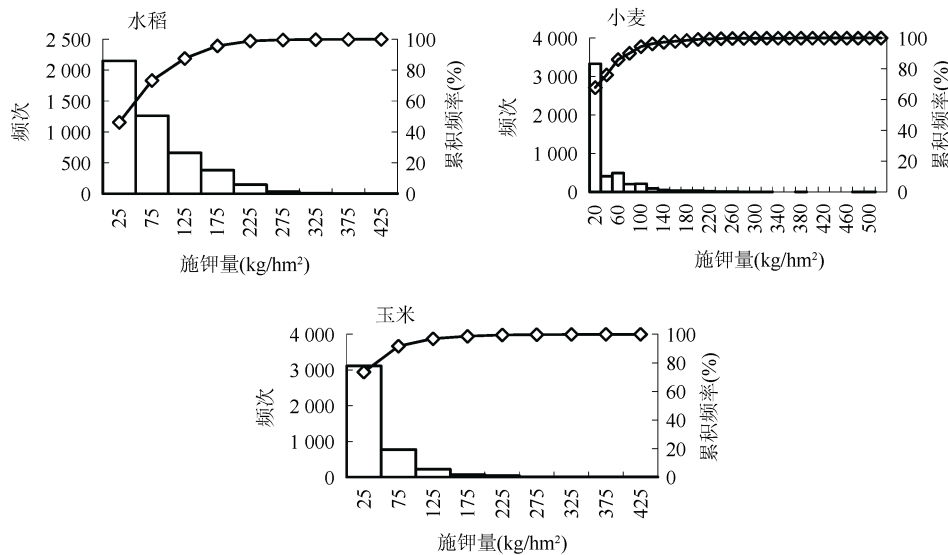


图 3 水稻、小麦、玉米施钾量的频率分布

Fig. 3 Frequency distributions of K fertilizer rates of rice, wheat and maize

表 4 水稻、小麦、玉米氮肥用量、产量及增产效应

Table 4 N fertilizer rates, yields and yield-increasing effects of rice, wheat and maize

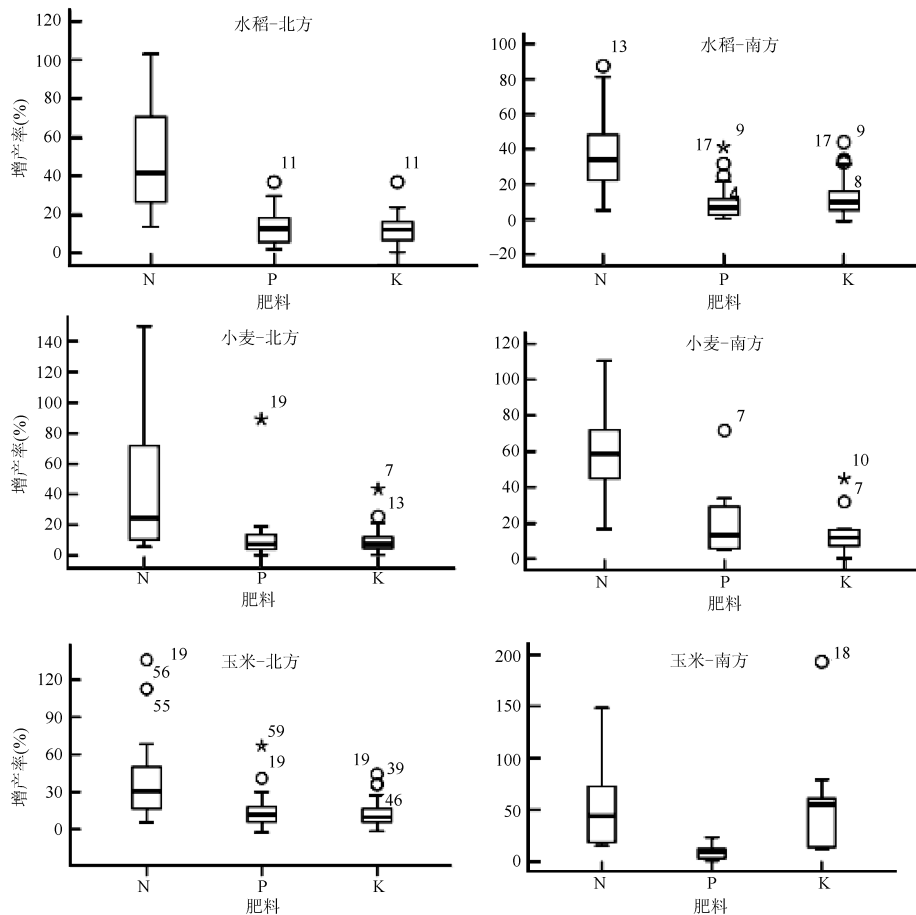
作物	范围	样本数	施氮量(kg/hm ²)	吸氮量(kg/hm ²)	产量(kg/hm ²)	增产量(kg/hm ²)	增产率(%)
水稻	北方	16	209	191.2	8 943	2 848.0	30.9
	南方	63	192	148.9	7 750	1 799.0	23.3
	平均			180.3	9 150	2 303.0	28.4
小麦	北方	26	258	200.2	6 057	2 324.1	33.9
	南方	19	158	133.5	4 687	1 352.7	26.9
	平均			172.0	5 479	1 914.0	30.9
玉米	北方	65	227	219.1	9 110	2 096.2	23.4
	南方	19	228	150.3	6 190	2 003.9	36.6
	平均			203.5	8 450	2 075.3	26.4

表 5 水稻、小麦、玉米磷肥用量、产量及增产效应
Table 5 P fertilizer rates, yields and yield-increasing effects of rice, wheat and maize

作物	范围	样本数	施磷量 (kg/hm ²)	吸磷量 (kg/hm ²)	产量 (kg/hm ²)	增产量(kg/hm ²)	增产率(%)
水稻	北方	14	128	49.9	8 943	836.5	10.1
	南方	35	86	34.5	7 750	728.2	8.8
	平均			38.9	8 091	759.1	9.2
小麦	北方	18	139	39.7	6 057	870.8	13.2
	南方	17	89	28.8	4 687	725.1	15.5
	平均			34.4	5 392	800.0	14.3
玉米	北方	42	119	54.4	9 110	942.1	10.8
	南方	12	105	34.9	6 190	1090.3	16.9
	平均			50.1	8 461	975.0	12.2

表 6 水稻、小麦、玉米钾肥用量、产量及增产效应
Table 6 K fertilizer rates, yields and yield-increasing effects of rice, wheat and maize

作物	范围	样本数	施磷量 (kg/hm ²)	吸磷量 (kg/hm ²)	产量 (kg/hm ²)	增产量(kg/hm ²)	增产率(%)
水稻	北方	14	130	185.7	8 943	829.0	9.2
	南方	35	140	173.9	7 750	937.4	11.8
	平均			177.3	8 091	906.4	11.1
小麦	北方	18	136	153.9	6 057	483.3	7.5
	南方	17	106	103.7	4 687	381.2	6.6
	平均			129.5	5 392	433.7	7.1
玉米	北方	42	158	172.0	9 110	978.8	10.8
	南方	12	105	123.9	6 190	981.0	11.8
	平均			161.3	8 461	979.3	11.0



(o、*表示界外点，误差线表示 10%~90% 点位，图柱表示 25%~75% 点位，图中横线表示中值，下同)

图 4 水稻、小麦、玉米增产率分布图

Fig. 4 Distributions of yield-increasing rates of rice, wheat and maize

表 7 水稻、小麦、玉米氮肥利用效率
Table 7 Nitrogen fertilizer use efficiencies of rice, wheat and maize

作物	范围	样本数	施氮量 (kg/hm ²)	肥料利用率		生理效率		农学效率	
				平均值(%)	变幅(%)	平均值(kg/kg)	变幅(kg/kg)	平均值(kg/kg)	变幅(kg/kg)
水稻	北方	16	209	34.6	8.5 ~ 62.7	38.3	15.5 ~ 86.2	13.6	4.2 ~ 22.6
	南方	63	192	25.5	3.5 ~ 76.2	46.0	20.7 ~ 161.1	10.7	2.9 ~ 20.8
	平均			27.3		44.4		11.3	
小麦	北方	26	258	33.6	3.4 ~ 82.4	25.8	9.6 ~ 36.0	10.3	1.2 ~ 26.5
	南方	19	158	44.5	6.5 ~ 86.1	34.0	16.0 ~ 54.4	12.3	3.5 ~ 23.2
	平均			38.2		29.3		11.1	
玉米	北方	65	227	30.2	4.2 ~ 57.0	32.6	0.8 ~ 80.6	9.6	1.8 ~ 22.6
	南方	19	228	33.6	5.3 ~ 63.5	34.2	19.1 ~ 63.9	11.6	3.4 ~ 20.2
	平均			31.0		33.0		10.1	4.2 ~ 22.6

表 8 水稻、小麦、玉米磷肥利用效率
Table 8 Phosphate fertilizer use efficiencies of rice, wheat and maize

作物	范围	样本数	施氮量 (kg/hm ²)	肥料利用率		生理效率		农学效率	
				平均值(%)	变幅(%)	平均值(kg/kg)	变幅(kg/kg)	平均值(kg/kg)	变幅(kg/kg)
水稻	北方	14	128	17.4	0.8 ~ 46.2	74.6	10.8 ~ 104.7	10.0	0.8 ~ 25.8
	南方	35	86	11.3	0.2 ~ 71.2	81.2	3.9 ~ 241.5	8.7	1.0 ~ 33.3
	平均			13.0		79.3		9.1	
小麦	北方	18	139	14.2	0.1 ~ 42.8	67.6	9.4 ~ 234.8	7.0	0.2 ~ 24.8
	南方	17	89	19.8	3.0 ~ 55.7	53.2	14.7 ~ 99.6	8.9	2.8 ~ 24.4
	平均			16.9		60.6		7.9	
玉米	北方	42	119	16.8	1.5 ~ 22.2	64.6	11.7 ~ 194.6	10.6	1.0 ~ 37.4
	南方	12	105	10.2	0.5 ~ 40.8	73.3	19.3 ~ 189.8	7.2	0.4 ~ 22.2
	平均			15.3		66.5		9.8	

表 9 水稻、小麦、玉米钾肥利用效率
Table 9 Potash fertilizer use efficiencies of rice, wheat and maize

作物	范围	样本数	施氮量 (kg/hm ²)	肥料利用率		生理效率		农学效率	
				平均值(%)	变幅(%)	平均值(kg/kg)	变幅(kg/kg)	平均值(kg/kg)	变幅(kg/kg)
水稻	北方	14	130	31.6	7.8 ~ 72.7	31.4	8.9 ~ 59.9	8.0	0.4 ~ 17.1
	南方	35	140	26.7	0.8 ~ 89.0	30.6	2.8 ~ 96.0	6.9	0.5 ~ 33.1
	平均			28.1		30.8		7.2	
小麦	北方	18	136	19.4	1.5 ~ 78.4	24.3	1.3 ~ 45.3	4.4	1.1 ~ 12.0
	南方	17	106	32.2	5.6 ~ 82.8	24.1	0.3 ~ 61.7	6.9	0.5 ~ 24.6
	平均			25.6		24.2		5.6	
玉米	北方	42	158	27.1	2.5 ~ 88.2	29.7	8.7 ~ 50.6	8.0	0.3 ~ 32.0
	南方	12	105	42.2	3.7 ~ 80.4	32.7	8.6 ~ 93.3	8.6	1.8 ~ 40.7
	平均			30.5		30.4		8.1	

生理效率反映了作物所吸收的肥料在体内的利用效率。从表 7 ~ 表 9 可以看出, 3 种肥料生理效率大小表现为磷肥 > 氮肥 > 钾肥。氮肥生理效率平均值为 35.1 kg/kg, 变化范围为 0.8 ~ 86.2 kg/kg; 磷肥生理效率平均值在 70 kg/kg 左右, 变化范围非常大, 最

低 3.9 kg/kg, 最高可达 241.5 kg/kg; 钾肥生理效率平均值多在 20 ~ 30 kg/kg 之间。说明作物对所吸收的磷肥利用效率最高, 吸收 1 kg 磷肥可增加产量 70 kg 左右; 对钾肥利用效率最低, 吸收到体内的钾肥 1 kg 增产 20 ~ 30 kg。

农学效率是单位施肥量对作物产量增加的反映。研究表明,水稻、小麦、玉米的农学效率均表现为氮肥>磷肥>钾肥,1 kg 氮肥可分别增产 11.3、11.1、10.1 kg 的水稻、小麦或玉米,1 kg 磷肥可增产 7~10 kg,1 kg 钾肥大约可增产 5~8 kg。

从图 5 来看,氮肥利用率分布范围比较宽,水稻、

小麦、玉米主要分布在 20%~40%、15%~65%、20%~50% 之间。磷肥利用率较低且分布范围较集中,多在 5%~20% 之间;北方水稻磷肥利用率范围较宽,在 10%~40%。水稻、小麦钾肥利用率主要集中在 10%~40% 之间;玉米分布范围普遍高于前两者,多分布在 20%~60% 之间。

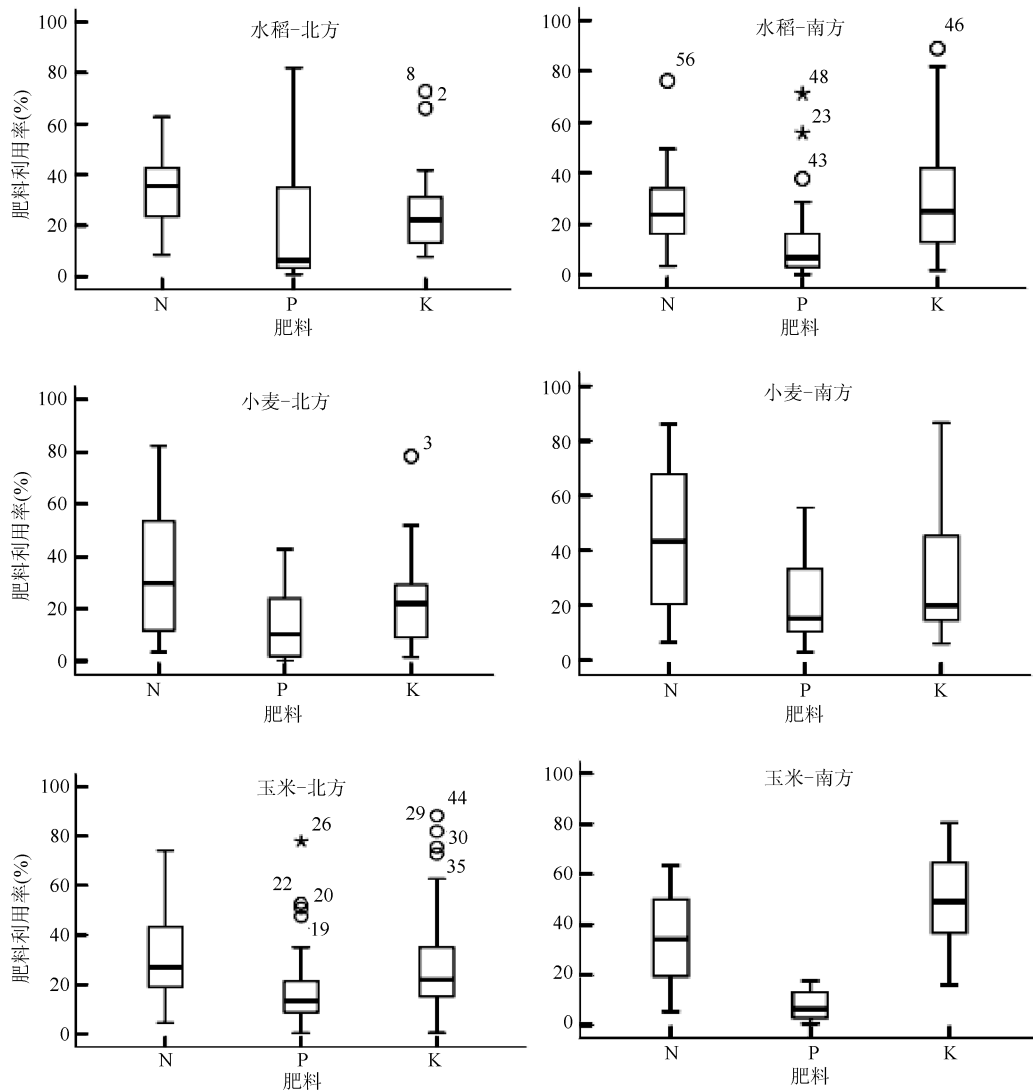


图 5 水稻、小麦、玉米氮磷钾肥利用率分布图

Fig. 5 Distributions of N, P and K use efficiencies of rice, wheat and maize

3 讨论与结论

化肥利用效率问题一直以来受到学者们高度关注。目前,国内外评价作物氮肥利用效率的指标有多种,概括起来可分为两类:氮吸收效率和氮利用效率(或氮生产效率)^[19-20]。氮吸收效率是指供应单位有效氮植物所能吸收的氮量,如氮肥利用率。氮利用效率是指单位植株地上部吸氮量所产生的生物学产量或经济产量^[21],如氮肥农学效率和生理效率。表 10 可

以看出,我国水稻、小麦、玉米氮肥利用率分别为 27.3%、38.2% 和 31.0%,与张福锁等^[4]2001—2005 年全国粮食主产区进行的 1 333 个田间试验结果相比,水稻和玉米氮肥利用率比较接近,分别为 28.3% 和 26.1%,而本文小麦氮肥利用率高于其 10 个百分点。由于肥料利用率受施肥量、施肥方式、土壤条件、气候条件等多种因素影响,因而不同研究存在一定的差异,但总体可以看出本文试验结果基本反映了当时我国的肥料利用率状况。

表 10 不同国家(地区)氮肥利用效率比较
Table 10 Comparison of nitrogen fertilizer use efficiencies in different countries and regions

作物	来源	范围	样本数	氮肥农学效率(kg/kg)	氮肥利用率(%)
水稻	本文	全国	79	11.3	27.3
	张福锁等 ^[4]	全国	1 333	10.4	28.3
	Ladha 等 ^[22]	世界	307	22	46
	Dobermann 和 Cassman ^[23]	南亚及东南亚	179	12	31
	Haefele 等 ^[24]	西非	151	17	36
小麦	本文	全国	49	11.1	38.2
	张福锁等 ^[4]	全国	1 333	8.0	28.2
	Ladha 等 ^[22]	世界	507	18	57
	Dobermann 和 Cassman ^[25]	印度	46	11	—
	Terry ^[27]	印度	21	—	49
玉米	本文	全国	49	10.1	31.0
	张福锁等 ^[4]	全国	1333	9.8	26.1
	Ladha 等 ^[22]	世界	76	24	65
	Dobermann 和 Cassman ^[25]	印度尼西亚	20	17	—
	Cassman 等 ^[26]	美国	55	—	37
	Terry ^[27]	美国北部	56	—	37

将本文氮肥利用率的研究结果与同期世界不同国家或地区的结果进行比较(表 10),可以发现,我国谷物氮肥利用率低于同期世界平均水平^[22],水稻、小麦和玉米均低 20%~30%左右,与南亚及东南亚^[23]、西非^[24]、印度^[25]和美国^[26-27]相比也相差近 10%。三大作物氮肥农学效率与世界平均水平相比均低 10%左右。可见,就当时的施肥条件和管理水平下,我国的氮肥利用率和农学效率均不高。

有学者将氮肥施用量分成 3 级,150~250 kg/hm²为适中,<150 kg/hm²为不足,>250 kg/hm²为超量^[4]。依此分级,本文调查的一万多个地块中,水稻、小麦和玉米氮肥用量适中的分别占 60%、35%和 47%,超量的为 23%、25%、43%,用量不足的分别为 17%、40%和 10%。说明在当时农业生产条件和产量水平下,氮肥过量施用占相当大比例,约占 25%~40%,施用不足的也有 10%~25%。朱兆良和金继运^[28]收集了世界范围内水稻、小麦、玉米施氮量研究结果,分别为 113、117 和 102 kg/hm²,本文所得结果为 193.5、165.3、186.8 kg/hm²,与之相比,可以发现我国施氮量已远远高于世界平均水平。

从我国氮肥利用效率和施氮量与世界的比较结果可以总结得出,中国粮食生产高投入并没有实现高利用效率。按照报酬递减规律,当施肥量达到一定水平时,随着施肥量的增加,农学效率必然下降。这说明我国大部分农业产区已经处于高投入高产出的高度集约化条件下,进一步提高肥料利用效率对我国种

植业可持续发展非常重要,也具有相当难度^[28]。徐振华等^[1]研究提出以增产带增效观点,即在不增加投入的情况下,优化栽培管理技术,增加作物产量是提高化肥利用效率的重要途径。

农田过量施肥导致了主要粮食作物肥料利用效率下降,造成农业面源污染,影响农业增产和农民增收。而肥料用量不足不能保证农业可持续发展,将会严重损害土壤的长期生产能力,使得高效率的农业生产难以为继。因此,亟需优化施肥量,提高肥料利用率,保障粮食等主要农产品有效供给。针对当前普遍存在的化肥过量施用和利用率不高的问题,2015 年农业部制订发布《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,将化肥减量增效作为当前农户施肥调控政策的首要目标,这是政府积极探索产出高效、资源节约、环境友好的现代农业发展之路的重要举措,对引导农民科学施肥具有重要的政策引领作用。

参考文献:

- [1] 徐振华,郭彩娟,马文奇,等. 典型区域粮食产量、养分效率和经济效益关系实证研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(11): 116-122
- [2] 马文奇,张福锁,毛达如. 山东省粮食作物施肥状况的评价[J]. 土壤通报, 1999, 30(5): 217-220
- [3] 王圣瑞,马文奇,徐文华,等. 陕西省小麦施肥现状与评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 31-37
- [4] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924

- [5] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136-1143
- [6] 北京农业大学. 肥料手册[M]. 北京: 农业出版社, 1979: 25-35
- [7] 孙曦, 王芳维. 农业化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 67-98
- [8] 毛达如. 有机肥料[M]. 北京: 农业出版社, 1982: 23-56
- [9] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994: 123-158
- [10] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 33-59
- [11] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 494-500
- [12] 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 江西: 江西科学技术出版社, 1998: 3-15
- [13] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. Plant and Soil, 1981, 58(1/3): 177-204
- [14] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Research, 1998, 56(1/2): 7-39
- [15] 李韵珠, 王凤仙, 黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较[J]. 土壤通报, 2000, 31(4): 150-155
- [16] Timsina J, Singh U, Badaruddin M, et al. Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh[J]. Field Crops Research, 2001, 72: 143-161
- [17] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103
- [18] 吴延寿, 徐阳春, 沈其荣, 等. 种稻方式对后茬大麦生长及土壤氮素转化和氮肥利用的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 169-172
- [19] 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[J]. 土壤, 2001, 33(2): 64-69
- [20] 李世清, 王瑞军, 张兴昌, 等. 小麦氮素营养与籽粒灌浆期氮素转移的研究进展[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 106-111
- [21] Moinuddin S, Ansari S A, Afridi M M. Leaf NRA and its relationship with grain and protein yield of triticale as affected by progressive application of nitrogen and phosphorus fertilizer levels[J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19: 785-794
- [22] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. Advances in Agronomy, 2005, 87: 86-156
- [23] Dobermann A, Cassman K G. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia[J]. Plant and Soil, 2002, 247: 153-175
- [24] Haefele S M, Wopereis M C S, Donovan C, et al. Improving the productivity and profitability of irrigated rice production in Mauritania[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 14: 181-196
- [25] Dobermann A, Cassman K G. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption[J]. Science in China, 2005, 48: 745-758
- [26] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. Ambio, 2002, 31: 132-140
- [27] Terry L R. Increasing nutrient use efficiency[J]. Journal of Agriculture and Forestry, 2008, 32: 177-182
- [28] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273

Fertilizer Use Efficiencies and Yield-increasing Rates of Grain Crops in China

YAN Xiang, JIN Jiyun, LIANG Mingzao

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: In this paper, the fertilization data of 13 667 farmlands in 19 provinces and the data of field experiments in 32 nutrient monitoring points in 22 provinces were collected and analyzed to study the fertilizer rates, yield-increasing rates, fertilizer use efficiencies (FUE) and agronomical efficiencies (AE) of grains in China. The results showed that fertilizer rates of rice, wheat and maize were 294.8, 263.6 and 269.6 kg/hm², respectively. Yield-increasing rates of N were 28.4%, 30.9% and 26.4%, P were 9.2%, 14.3% and 12.2%, K were 11.1%, 7.1% and 11.0%, respectively. FUE_N were 27.3%, 38.2% and 31.0%, FUE_P were 13.0%, 16.9% and 15.3%, FUE_K 28.1%, 25.6% and 30.5%, respectively. AE_N were 11.3, 11.1 and 10.1 kg/kg, AE_P were 9.1, 7.9 and 9.8 kg/kg, AE_K were 7.2, 5.6 and 8.1 kg/kg, respectively. The excessive application of nitrogen fertilizer accounted for about 25%–40% while the insufficient application for about 10%–25% under the production conditions at that time. FUE_N and AE_N were 20%–30% and 10% lower than world average levels, respectively. High fertilizer input of China's grain production did not achieve high fertilizer use efficiency, thus, it is the primary goal to reduce fertilizer rate and to improve fertilizer use efficiency for fertilization policy in China.

Key words: Fertilizer use efficiency; Yield-increasing rate; Fertilizer rate; Grain