

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

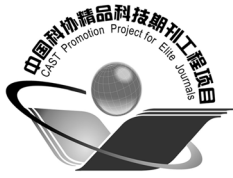


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

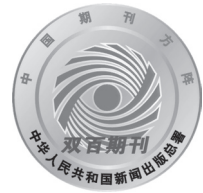
第52卷 第6期

Vol.52 No.6



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

综述与评论

- 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑…………… 赵彦锋 程道全 陈杰等 (1197)
- 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展…………… 卢明珠 吕宪国 管强等 (1209)

研究论文

- 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素… 杨帆 黄来明 李德成等 (1226)
- 中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性…………… 任圆圆 张学雷 (1237)
- 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征…………… 于洋 赵业婷 常庆瑞 (1251)
- 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演…………… 李萍 赵庚星 高明秀等 (1262)
- 干湿交替对黄土崩解速度的影响…………… 王健 马璠 张鹏辉等 (1273)
- 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟…………… 吴奇凡 樊军 杨晓莉等 (1280)
- 旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征…………… 孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰等 (1291)
- 流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响…………… 李忠意 徐仁扣 (1301)
- 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析…………… 于飞 施卫明 (1311)
- 太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化…………… 刘建玲 贾可 廖文华等 (1325)
- 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性…………… 杨文 周脚根 王美慧等 (1336)
- 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征…………… 李红林 贡璐 朱美玲等 (1345)
- 东北平原土壤硒分布特征及影响因素…………… 戴慧敏 宫传东 董北等 (1356)
- 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究…………… 林维雷 应雨骐 姜培坤等 (1365)
- 土壤非多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应…………… 马静静 钱新春 张伟等 (1374)
- 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究…………… 赵丽娅 李文庆 唐龙翔等 (1383)
- 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应…………… 张体彬 康跃虎 万书勤等 (1392)
- 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应…………… 杨晓玲 丁文魁 马中华等 (1401)
- 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究…………… 李杰彪 苏锐 周志超等 (1412)

研究简报

- 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究…………… 宋金红 吴景贵 赵欣宇等 (1422)
- 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估…………… 单燕 李水利 李茹等 (1430)
- 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用…………… 赵纯 袁国富 刘晓等 (1438)

信息

- 《土壤学报》入选“2015期刊数字影响力100强”…………… (1437)

封面图片：滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地（由张体彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201501270058

近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析*

于 飞^{1, 2} 施卫明^{1†}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 利用文献调研的方法, 对中国知网和维普数据库公开发表的研究时间为 2004 年以来的中文氮肥效应研究相关文献及数据进行了统计分析。结果表明: 目前三大粮食作物可获得的不施氮肥的基础产量可达到施氮条件下最高产量的 67.9%~75.9%; 根据施氮量与相对产量的回归方程, 水稻、小麦、玉米的最高产量施氮量分别为 246、250、274 kg hm⁻²。近 10 年我国氮肥表观利用率、农学效率有所提高, 水稻、小麦、玉米氮肥表观利用率分别为 39.0%、34.8%、29.1%, 农学效率分别为 12.7、9.2、11.1 kg kg⁻¹; 氮肥表观利用率较 2001—2005 年统计结果提高 6.8 个百分点, 基本达到 20 世纪 80 年代的平均水平(35%)。三大粮食作物的氮肥施用量与氮肥偏生产力的相关性均可以用幂指数方程拟合, 且拟合效果均较好, 水稻 R²=0.848 9, 小麦 R²=0.657 5, 玉米 R²=0.791 7, 偏生产力是现阶段评价氮肥肥料效应的适宜指标。综合考虑三大粮食作物的产量要求和氮肥利用率, 本研究认为 180~240 kg hm⁻² 的施氮量是目前我国三大粮食作物较适宜的施氮量范围。这与国家农业部办公厅发布的《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议》的推荐施氮量有较高的一致性。

关键词 氮肥表观利用率; 氮肥农学效率; 氮肥偏生产力; 粮食作物; 适宜施氮量

中图分类号 S147 **文献标识码** A

氮素在作物产量和品质形成中起着关键作用。若无化学氮肥施用, 全球无法维持 70 亿人口的粮食供应, 中国 13.7 亿人口的粮食问题也无法解决。据估计, 施用氮肥全球多养活了 48% 的现有人口^[1]。自 20 世纪 70 年代以来, 我国农业生产中的氮肥施用量迅速增加。根据 FAO 的统计资料^[2], 从 1978 年至 2008 年, 我国氮肥(文中氮肥用量均以纯氮计)施用量增加了 3.58 倍, 平均每年增加约 7.8 × 10⁵ t。2008 年耕地面积仅占世界 7% 的中国, 消耗了 3.3 × 10⁷ t 氮肥, 占全球当年氮肥消耗量 9.2 × 10⁷ t 的 36%。有预测表明, 我国的氮肥施用量还可能继续增加^[3]。氮肥过量施用势必造成严重的生态环境问题^[4-5]。因此, 在合理施肥确保粮食安全的前提下, 提高氮肥利用率减少氮损失, 历来是我国科学家关注的焦点。1992 年, 朱

兆良^[6]在总结 782 个田间试验数据的基础上, 得出当时主要粮食作物的氮肥利用率为 28%~41%, 平均为 35%; 2008 年, 张福锁等^[7]对 2001—2005 年不同作物和不同区域试验结果分析发现, 我国主要粮食作物的氮肥利用率为 26.1%~28.3%, 平均为 27.5%, 较 20 世纪 80 年代显著降低。自 2004 年开始, 我国粮食生产发生了较大变化, 国家采取多项措施保证粮食产量连续增长, 包括 2005 年启动的全国测土配方施肥工作。这些背景下, 当前我国主要粮食作物的氮肥利用率是多少? 氮肥的增产效应发生了怎样的变化? 哪些因素引起的这些变化? 这些问题值得关注和讨论。为此, 本研究利用已发表的中文文献资料数据, 针对这些问题进行了分析和讨论, 以为我国粮食生产中的氮肥施用问题提供一些参考和启示。

* 国家科技重大专项课题“竺山湾农田种植业面源污染综合治理技术集成研究与工程示范”(2012ZX07101-004)资助

† 通讯作者, E-mail: wmsi@issas.ac.cn

作者简介: 于 飞(1979—), 女, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: yufei@issas.ac.cn

收稿日期: 2015-01-27; 收到修改稿日期: 2015-04-13

1 材料与amp;方法

1.1 数据来源

采用各种相关字段及组合（氮肥利用率；氮肥肥效；施氮量+作物产量等）于中国知网和维普数据库检索截至2014年10月15日公开发表的，研究时间为2004年以来的我国主要粮食作物水稻、小麦、玉米的氮肥效应相关中文文献（考虑到目前我国科研成果承载的主要载体是中文文献，本研究没有收集英文发表的数据文献），筛选在满足作物磷、钾肥需求量条件下的氮肥效应田间试验及数据进行统计分析。同时，数据分析整理过程中，排除

了在实际生产中没有大规模运用的特殊肥料处理及其数据，如控释肥料处理、加硝化抑制剂处理，以及特殊氮肥运筹处理，如根据植物叶色诊断施氮处理、实时实地氮肥管理处理等的数据，以获得常规肥料品种及运筹条件下的氮肥利用率结果。本研究获得的氮肥利用率结果，其肥料品种多为尿素，其次为碳铵、复合肥，氮肥的运筹方式为常规的基肥、追肥。本研究共获得有效文献241篇，其中水稻相关文献83篇，小麦相关文献78篇，玉米相关文献80篇，具体涉及的研究地点及文献数量见表1。从表1可以看出，研究地点的分布与我国的作物布局基本吻合，本研究的数据基础是比较可靠的。

表1 研究获取的文献数、文献研究地点分布

Table 1 Volumes of literature obtained in this study and distributions of literature research sites

作物 Crop	文献数 Article number	研究地点分布 Research site
水稻 Rice	83	江苏（29）、浙江（8）、安徽（7）、辽宁（5）、湖南（5）、湖北（5）、四川（4）、贵州（3）、江西（3）、黑龙江（3）、福建（2）、广东（2）、广西（2）、河南（1）、宁夏（1）、山东（1）、上海（1）、云南（1）
小麦 Wheat	78	陕西（13）、山东（20）、江苏（13）、河南（9）、河北（7）、安徽（4）、山西（4）、内蒙古（2）、宁夏（2）、甘肃（1）、黑龙江（1）、四川（1）、新疆（1）、浙江（1）
玉米 Maize	80	河北（15）、陕西（12）、山东（9）、吉林（8）、辽宁（7）、河南（5）、黑龙江（4）、山西（4）、四川（4）、内蒙古（3）、北京（2）、甘肃（2）、广西（1）、贵州（1）、湖南（1）、浙江（1）、重庆（1）

1.2 研究方法

本研究从收集的文献中获得的数据包括：产量及相对产量、施氮量、吸氮量及氮肥利用效率参

数（如氮肥表观利用率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮肥生理利用率）。各参数的样本量如表2所示。

表2 研究获取的各参数样本量

Table 2 Volumes of various parameter samples obtained in the research

作物 Crop	施氮量 N rate	产量 Yield	相对产量 Relative yield	氮肥表观利用率 REN	氮肥农学效率 AEN	氮肥偏生产力 PFPN	氮肥生理利用率 PEN
水稻Rice	932	893	586	530	711	725	527
小麦Wheat	854	801	509	334	645	638	305
玉米Maize	702	617	410	341	510	504	328

相对产量：在氮肥效应试验中，作物产量在一定范围内随氮肥施用量的增加而增加，但超出这个范围，过量氮肥将引起产量降低，本文将这个过

程中出现的最高产量定义为100，其余产量与之的比值即为相应氮肥用量条件下的相对产量。理论上相对产量可以减少由于不同地区土壤地力、作物品

种、不同年份气候等引起的差异。

氮肥表观利用率 (apparent recovery rate of applied nitrogen, RE_N): 表征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。

氮肥农学效率 (agronomic efficiency of applied nitrogen, AE_N): 表征单位施氮量所增加的作物籽粒产量, 即 $AE_N = (Y - Y_0) / F$, 其中 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。

氮肥偏生产力 (partial factor productivity from applied nitrogen, PFP_N): 表征单位投入的肥料氮所能生产的作物籽粒产量, 即 $PFP_N = Y / F$ 。

氮肥生理利用率 (physiological efficiency of applied nitrogen, PE_N): 表征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, 即 $PE_N = (Y - Y_0) / (U - U_0)$, 反映了作物吸收的氮对产量和秸秆形成的贡献差异和利用效率。

2 结果与讨论

2.1 主要粮食作物的氮肥产量效应

2004 年以来, 三大粮食作物的施氮效应如表 3 所示。从表 3 数据可知, 在不施氮肥的情况下, 三大粮食作物均可获得较高的产量及相对产量。水稻可获得的基础产量为 $2.77 \sim 9.29 \text{ t hm}^{-2}$, 均值为 5.89 t hm^{-2} ; 相对产量为 $44.6\% \sim 90.4\%$, 均值为 67.9% 。小麦可获得的基础产量为 $0.68 \sim 9.85 \text{ t hm}^{-2}$, 均值为 5.36 t hm^{-2} ; 相对产量为 $33.2\% \sim 97.4\%$, 均值为 72.1% 。玉米可获得的基础产量为 $2.48 \sim 14.40 \text{ t hm}^{-2}$, 均值为 7.86 t hm^{-2} ; 相对产量为 $31.7\% \sim 96.1\%$, 均值为 75.9% 。基础产量的变幅较大, 可能与土壤肥力、气候、品种、管理方式及病虫害在地区间及年份间的变化有关, 但总体可以看出, 我国目前土壤氮素肥力较高。朱兆良等^[8]在太湖地区的研究也表明, 2004—2006 年水稻不施氮肥的基础产量 (6.42 t hm^{-2}) 较 1982—1985 年 (5.23 t hm^{-2}) 提高 1.89 t hm^{-2} , 并将其归因于环境氮的大量增加和土壤氮素肥力的提高, 以及栽培品种的改善。方玉东等^[9]研究发现, 21 世纪初中国农田氮素投入总量

为 $34.22 \times 10^6 \text{ t}$, 农田氮素支出总量为 $31.57 \times 10^6 \text{ t}$, 农田氮素处于盈余状态, 盈余总量为 $2.65 \times 10^6 \text{ t}$ 。黄耀等^[10]研究也表明, 近 20 年来, 占中国大陆农田面积 $53\% \sim 59\%$ 的土壤肥力 (有机碳) 呈明显增加的趋势, 同时他还预测, 随着秸秆还田、平衡施肥、少 (免) 耕等保护性耕作措施的进一步推广, 如农业部于 2005 年启动测土配方施肥行动, 决定对全中国大陆 484 个县的 1330 万 hm^2 农田普及应用测土施肥技术, 中国大陆大部分农田土壤肥力将呈现稳定上升的态势。

施氮增加作物产量, 在目前的田间生产条件下, 氮肥施用使水稻、小麦和玉米的产量均值分别增加至 8.42 、 6.87 、 9.89 t hm^{-2} , 水稻的氮肥增产效应 (即 (施氮处理平均产量 - 不施氮肥处理产量) / 不施氮肥处理产量) 最高, 约 43.0% , 小麦、玉米次之, 分别约 28.2% 、 25.8% 。施氮使水稻、小麦、玉米的相对产量均值分别达到 92.7% 、 94.4% 、 93.5% ; 相对产量增加值分别为 $9.6\% \sim 54.4\%$, $2.6\% \sim 66.8\%$, $3.9\% \sim 67.3\%$ 。氮肥的增产效应与氮肥施用量、土壤肥力及作物品种特性等有关。一般而言, 随着氮肥用量的增加, 氮肥的增产效应先增加后降低, 符合报酬递减的规律。土壤肥力越低, 氮肥的增产效应也越大。张军等^[11]在江苏省 3 种肥力水稻田上连续两年的研究表明, 施氮对徐稻 3 号产量影响较大, 施氮肥 $148.5 \sim 445.5 \text{ kg hm}^{-2}$, 高地力稻田水稻增产幅度为 $49.9\% \sim 80.4\%$, 中地力稻田水稻增产幅度为 $49.9\% \sim 91.8\%$, 低地力稻田水稻增产幅度为 $55.2\% \sim 109.7\%$, 低地力土壤条件下的氮肥增产效应更显著。冯洋等^[12]在湖北黄冈地区的研究也获得了相似的结果。晏娟等^[13]研究结果显示, 氮高效品种水稻种质 4007 在 4 个氮肥处理水平下 (100 、 150 、 200 和 250 kg hm^{-2}) 分别较无肥区增产 20.6% 、 33.6% 、 37.3% 和 34.8% , 常规品种武运粳 15 则增产 9.4% 、 14.3% 、 20.3% 和 19.4% , 氮高效品种 4007 对氮肥的响应显著高于常规品种武运粳 15。

利用氮肥效应方程 (一元二次方程) 分别对三大粮食作物的氮肥施用量与作物产量及相对产量进行拟合 (图 1 ~ 图 3), 发现氮肥施用量与相对产量的拟合效果 (R^2 : 水稻 0.5681 , 小麦 0.5468 , 玉米 0.3585) 均高于氮肥施用量与产量的拟合效果 (R^2 : 水稻 0.4231 , 小麦 0.1872 , 玉米

表3 施氮对三大粮食作物产量的影响

Table 3 Effects of application of nitrogen fertilizer on yields of the three major grain crops

作物 Crop	不施氮肥 No nitrogen						施氮量 Nitrogen rate (kg hm ⁻²)	施氮肥 With nitrogen					
	基础产量 Yield (t hm ⁻²)			相对产量 Relative yield (%)				产量 Yield (t hm ⁻²)			相对产量 Relative yield (%)		
	样本	变幅	均值	样本	变幅	均值		样本	变幅	均值	样本	变幅	均值
	Sample	Range	Average	Sample	Range	Average		Sample	Range	Average	Sample	Range	Average
水稻 Rice	177	2.77 ~ 9.29	5.89	95	44.6 ~ 90.4	67.9	45 ~ 540	716	3.08 ~ 13.32	8.42	491	63.3 ~ 100.0	92.7
小麦 Wheat	163	0.68 ~ 8.95	5.36	98	33.2 ~ 97.4	72.1	30 ~ 419	638	1.69 ~ 11.72	6.87	411	67.3 ~ 100.0	94.4
玉米 Maize	121	2.48 ~ 14.40	7.86	71	31.7 ~ 96.1	75.9	45 ~ 600	496	3.83 ~ 15.94	9.89	339	59.2 ~ 100.0	93.5

0.1875)。这是因为理论上相对产量可以减少由于土壤肥力、作物品种、年份、气候等引起的差异。

通过相对产量和施氮量的拟合方程,得到中国大陆目前水稻最高产量下的施氮量为 246 kg hm⁻²,小麦最高产量下的施氮量为 250 kg hm⁻²,玉米最高产量下的施氮量为 274 kg hm⁻²,该结果基本符合中国大陆目前三大粮食作物生产中氮肥施用的实际情况。闫湘^[14]对我国 2000—2005 年不同省(区)农户调查结果显示:水稻施氮量的变化范围为 129 ~ 328 kg hm⁻²,多数省(区)主要集中在 170 ~ 250 kg hm⁻²;小麦施氮量变幅 112 ~ 251 kg hm⁻²;玉米施氮量变幅 125 ~ 266 kg hm⁻²。李红莉等^[15]对 10 380 个农户的调研数据表明,2007 年全国水稻、小麦、玉米氮肥平均施用量分别为 231、229、273 kg hm⁻²。武良^[16]对 32 219 个农户的调研数据显示,2007—2009 年全国水稻、小麦、玉米氮肥平均施用量分别为 210、210、220 kg hm⁻²。

朱兆良等^[8]报道,由于品种的改进,当前栽培品种的增产潜力比较高、对氮肥的反应比较大,有利于氮肥的增产效果发挥,太湖地区水稻最高产量施氮量从 1982—1985 年的 184 kg hm⁻²提高至 2004—2006 年的 240 kg hm⁻²。陈婧^[17]报道:中国南方稻区水稻最高产量下的施氮量在 213 ~ 357 kg hm⁻² 范围内,双季常规籼稻 227 kg hm⁻²,双季杂交籼稻 213 kg.hm⁻²,单季常规籼稻 261 kg hm⁻²,单季杂交籼稻 223 kg hm⁻²,单季粳稻 357 kg hm⁻²。冯洋等^[12]在湖北黄冈地区的

研究表明,高产田、中产田水稻最高产量施氮量为 180 kg hm⁻²,低产田为 240 kg hm⁻²。张铭等^[18]报道,在高、中、低土壤肥力条件下,施氮量分别为 203、270 和 338 kg hm⁻² 时,江苏淮北地区两个小麦主栽品种氮肥利用率和籽粒产量均达到最高。蔡瑞国等^[19]报道,冀东地区宝麦 38 和京冬 8 号籽粒产量达到最高的施氮量在雨养条件下均为 120 kg hm⁻²,在灌溉条件下分别为 120 kg hm⁻² 和 240 kg hm⁻²。马兴华等^[20]研究表明,将施氮量从 240 kg hm⁻² 降至 168 kg hm⁻²,增加追肥比例,小麦氮肥利用率提高且产量变化无显著差异。王宜伦等^[21]连续两年在河南省的研究表明,超高产夏玉米(≥12 000 kg hm⁻²)施氮量 300 kg hm⁻² 时产量和收益最佳。叶东靖等^[22]对东北春玉米的研究结果显示,玉米产量随施氮量的增加而显著提高,当施氮量高于 240 kg hm⁻² 时,产量有减少趋势。可见,作物最高产量施氮量因土壤肥力、作物品种以及相关的耕作管理措施、氮肥运筹措施等不同而不同。

2.2 主要粮食作物的氮肥利用率

参照张福锁等^[7]研究结果,本研究对三大粮食作物不同氮肥施用量下的氮肥利用率分别进行了统计。表 4 数据表明,水稻氮肥施用量 < 60 kg hm⁻² 时,氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力、生理利用率均处于较高的水平,分别为 52.5%、17.2 kg kg⁻¹、116.9 kg kg⁻¹、39.8 kg kg⁻¹;氮肥施用量 60 ~ 240 kg hm⁻² 时,氮肥表观利用率、农学效率、生理利用率稍有下降或变化不

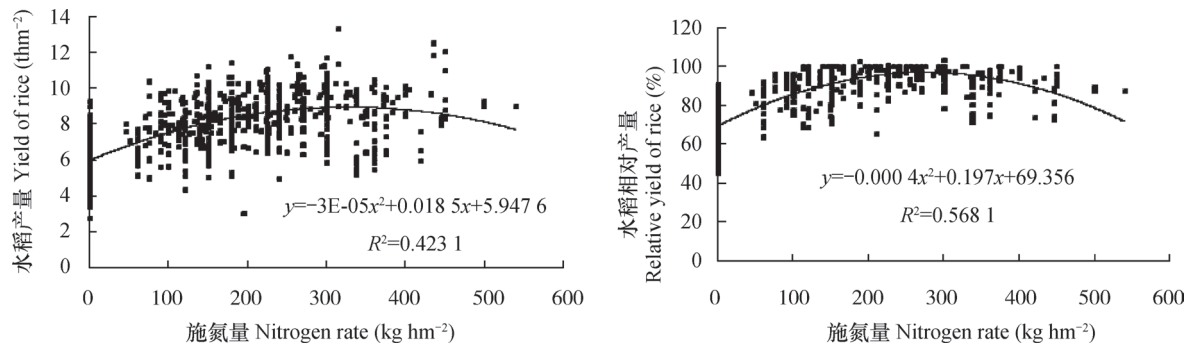


图1 水稻产量和相对产量与氮肥施用量的关系

Fig. 1 Relationships of yield and relative yield of rice with Nitrogen application rate

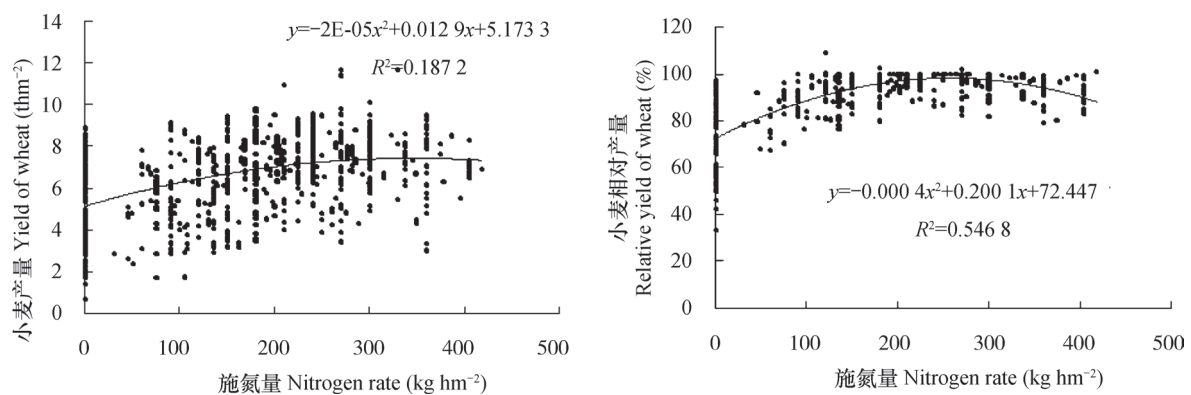


图2 小麦产量和相对产量与氮肥施用量的关系

Fig. 2 Relationships of yield and relative yield of wheat with nitrogen application rate

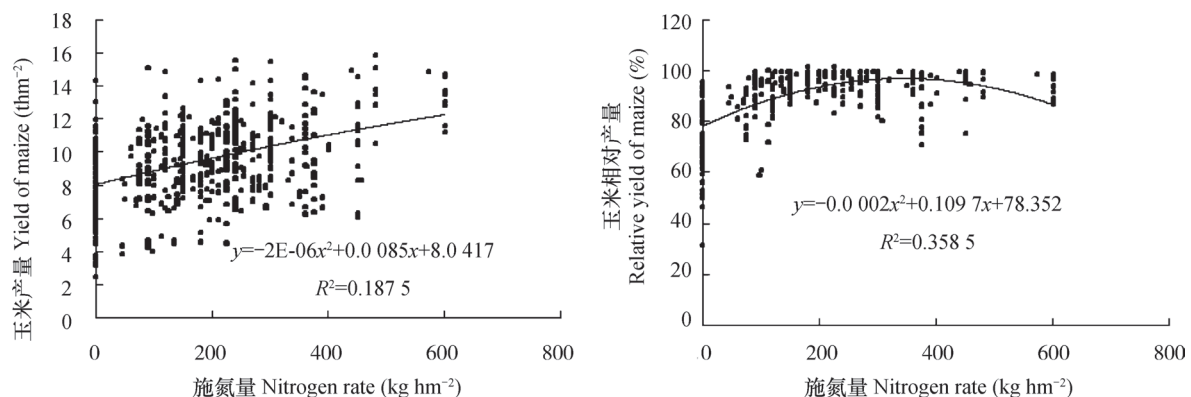


图3 玉米产量和相对产量与氮肥施用量的关系

Fig. 3 Relationships of yield and relative yield of maize with Nitrogen application

大，分别为39.2%~43.9%、13.6~14.6 kg kg⁻¹、36.7~41.8 kg kg⁻¹，但氮肥偏生产力下降较快，施氮量180~240 kg hm⁻²时已下降至39.7 kg kg⁻¹；氮肥施用量>240 kg hm⁻²时，氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力、生理利用率显著降低，而氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力、生理利用率均下降较多，分别降至36.1%、9.9 kg kg⁻¹、28.4 kg kg⁻¹、27.6 kg kg⁻¹。

小麦氮肥施用量<60 kg hm⁻²时，氮肥表观

利用率、农学效率、偏生产力、生理利用率分别为44.4%、24.0 kg kg⁻¹、98.9 kg kg⁻¹、64.2 kg kg⁻¹；氮肥用量60~120 kg hm⁻²时，氮肥农学效率、偏生产力、生理利用率显著降低，而氮肥表观利用率变化不大；氮肥用量120~240 kg hm⁻²时，氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力稳定分别在32.6%~33.0%、8.5~9.5 kg kg⁻¹、25.4~25.5 kg

表4 三大粮食作物氮肥利用率

Table 4 Nitrogen fertilizer use efficiencies of the three major grain crops

作物Crop	施氮量Nitrogen rate (kg hm ⁻²)	氮肥表观利用率 RE _N (%)	氮肥农学效率AE _N (kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFP _N (kg kg ⁻¹)	氮肥生理利用率 PE _N (kg kg ⁻¹)	相对产量 Relative yield (%)
水稻Rice	< 60	52.5	17.2	116.9	39.8	82.2
	60 ~ 120	43.9	14.2	77.5	41.0	89.8
	120 ~ 180	39.2	14.6	51.4	41.8	91.2
	180 ~ 240	40.2	13.6	39.7	36.7	95.1
	> 240	36.1	9.9	28.4	27.6	93.9
	平均	39.0	12.7	46.0	35.6	92.7
小麦 Wheat	< 60	44.4	24.0	98.9	64.2	77.6
	60 ~ 120	42.6	12.3	62.4	27.2	90.9
	120 ~ 180	33.0	9.5	42.2	25.5	94.0
	180 ~ 240	32.6	8.5	33.6	25.4	97.5
	> 240	33.3	6.8	23.7	22.9	95.3
	平均	34.8	9.2	38.8	26.0	94.4
玉米Maize	< 60	32.1	16.0	140.8	49.1	87.5
	60 ~ 120	33.6	14.8	99.4	51.6	87.7
	120 ~ 180	33.0	14.5	60.6	39.9	95.9
	180 ~ 240	31.0	10.3	45.5	33.0	97.7
	> 240	20.9	7.2	30.0	39.3	93.5
	平均	29.1	11.1	54.5	40.5	93.6

kg⁻¹；氮肥用量 > 240 kg hm⁻²时，氮肥农学效率、偏生产力、生理利用率进一步降低，分别降至6.8 kg kg⁻¹、23.7 kg kg⁻¹、22.9 kg kg⁻¹。

玉米氮肥施用量 < 60 kg hm⁻²时，氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力、生理利用率分别为32.1%、16.0 kg kg⁻¹、140.8 kg kg⁻¹、49.1 kg kg⁻¹；氮肥施用量60 ~ 180 kg hm⁻²时，氮肥表观利用率、农学效率变化不大，氮肥偏生产力和生理利用率显著降低；氮肥施用量180 ~ 240 kg hm⁻²时，氮肥表观利用率波动较小，其余显著降低；氮肥施用量 > 240 kg hm⁻²时，氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力大幅下降，分别降至20.9%、7.2 kg kg⁻¹、30.0 kg kg⁻¹。

总体而言，随着氮肥施用量的增加，三大粮食作物的氮肥利用率均呈下降趋势，这符合一般的规律；但不同作物对氮肥的利用特性不同。

本研究结果显示，目前（2004年以来）我国主要粮食作物水稻、小麦、玉米的氮肥表观利用率分别平均为39.0%、34.8%、29.1%，平均为34.3%，

与王桂良^[23]研究结果（37%、35%、30%）基本一致。1992年朱兆良等^[6]对782个田间试验数据调研表明，当时主要粮食作物的氮肥表观利用率为28% ~ 41%，平均为35%。1998年，他进一步指出主要粮食作物的氮肥表观利用率为30% ~ 35%^[24]。2008年张福锁等^[7]对2001—2005年全国粮食主产区进行的1 333个田间试验结果进行分析，得出该时段主要粮食作物氮肥表观利用率为26.1% ~ 28.3%，平均为27.5%。综合可见，近30年来，我国氮肥表观利用率变化呈现出先降低再升高的态势，目前氮肥表观利用率水平达到20世纪80年代的水平。前半段氮肥表观利用率的降低，可能主要与氮肥过量施用有关。据《中国农业年鉴》^[25-26]，1985年全国农作物氮肥平均施用量88 kg hm⁻²，至2005年上升至169 kg hm⁻²，而同一时期作物平均产量，以水稻为例，1985年为5.26 kg hm⁻²，2005年为8 kg hm⁻²，氮肥用量的增速远大于水稻产量的增速。后半段氮肥表观利用率的提高，除了栽培品种的改善外，可能主要与施肥技

术及养分资源管理水平的发展提高有关。朱兆良等^[8]在太湖地区的研究表明,在相同施氮量(200 kg hm⁻²)下,2004—2006年该地区水稻的氮肥利用率为35%,较1982—1985年的29%上升了6个百分点,并将其中3个百分点归结为栽培品种的增产潜力和吸收能力的提高,另外3个百分点归结为施肥技术的提高。农业部于2005年启动测土配方施肥行动,势必促进肥料的合理施用。对测土配方施肥项目3 000多个田间试验和示范数据的分析表明,测土配方施肥比常规施肥氮肥、磷肥和钾肥的表观利用率分别提高10%、7%~10%和7%以上^[27]。

Dobermann等^[28-29]统计表明,亚洲国家大田生产条件下水稻平均施氮量111 kg hm⁻²,氮肥表观利用率为31%,田间试验条件下为40%。由于农户生产条件、施肥技术、管理水平的差异,农户条件下的肥料表观利用率较试验条件下约低10个百分点^[30]。Ladha等^[31]对已发表的试验研究数据的统计表明,世界范围水稻平均施氮量115 kg hm⁻²,氮肥表观利用率平均为46%;小麦平均施氮量112 kg hm⁻²,氮肥表观利用率平均为57%;玉米平均施氮量123 kg hm⁻²,氮肥表观利用率为65%。Cassman等^[32]研究发现,美国玉米平均施氮量146 kg hm⁻²,氮肥表观利用率为37%。Roberts^[33]进一步研究显示,美国平均施氮量103 kg hm⁻²,玉米氮肥表观回收率为37%。可见,在相应的氮肥施用范围内,我国水稻(施氮量60~180 kg hm⁻²)的氮肥表观利用率为39.2%~43.9%,与亚洲水平基本一致,稍低于世界平均水平;小麦(施氮量60~120 kg hm⁻²)的氮肥表观利用率为42.6%,低于世界平均水平约15个百分点;玉米(施氮量60~180 kg hm⁻²)的氮肥表观利用率为33.0%~33.6%,稍逊于美国的平均水平,但显著低于世界水平,仅为世界平均水平的一半。我国目前总体氮肥表观利用率水平较低的原因,一方面应主要是氮肥施用过量引起的,尤其水稻,一方面可能与土壤肥力、品种特性、施肥技术及管理水平关系较大,尤其小麦和玉米。要确保我国粮食安全(总量及单产),化肥的高投入是不可避免的^[34-35]。根据我国国情,只能追求保持较高产量下合理的氮肥利用率,而不应一味追求高的氮肥利用率而降低产量^[35-36]。鉴于此,合理施肥及怎样进一步提高氮肥表观利用率(尤其小麦和玉米)值得进一步研究。

化肥农学效率是评价化肥增产效应较为准确的指标^[7]。氮肥的增产效果决定于作物对氮肥的吸收效率和所吸收化肥氮形成稻谷产量的生理效率这两个因素,在非标记的氮肥试验中,可以用氮肥的表观利用率和表观稻谷生理效率来衡量^[8]。本研究结果(表4)表明,目前我国三大粮食作物的氮肥农学效率分别平均为12.7、9.2、11.1 kg kg⁻¹;氮肥生理利用率分别平均为35.6、26.0、40.5 kg kg⁻¹。而张福锁等^[7]研究结果表明,2001—2005年我国水稻、小麦、玉米平均氮肥农学效率分别平均为10.4、8.0、9.8 kg kg⁻¹,氮肥生理利用率分别平均为36.7、28.3、37.5 kg kg⁻¹,本研究结果与之相比,氮肥农学效率显著增加,氮肥生理利用率变化不大。由此可以得出,目前我国三大粮食作物氮肥增产效果的提高,应主要为氮肥表观利用率的提高所致,与张福锁等^[7]研究结果相比,近10年来,我国主要粮食作物氮肥表观利用率平均提高了约6.8个百分点。

目前我国水稻、小麦、玉米的氮肥偏生产力分别平均为46.0、38.8、54.5 kg kg⁻¹,与张福锁等^[7]研究结果(54.2、43.0、51.6 kg kg⁻¹)相比,水稻、小麦氮肥偏生产力有降低的趋势,而玉米的氮肥偏生产力则稍有增加。这种趋势与李红莉等^[15]的结果不同,他们的结果表明2007年与2000年相比,小麦、玉米和水稻的单产分别增加17.6%、7.9%和8.2%,而相应的氮肥单位面积施肥量分别增加12.3%、37.3%和6.0%,因此,这7年中小麦和水稻的氮肥偏生产力增加,玉米的氮肥偏生产力减小。差异的原因可能是因为计算方法的不同所致,本研究及张福锁等的研究为各田间试验结果的算术平均值,而李红莉等的结果为加权平均值;也可能是本研究时间跨度较大所致,本研究为测土配方施肥项目实施近10年以来的平均效应。

2.3 主要粮食作物的适宜施氮量

表4数据还显示,三大粮食作物相对产量均表现随氮肥施用量增加先升高后降低,均在氮肥施用量180~240 kg hm⁻²获得较高的相对产量,这和众多学者推荐的适宜施氮量范围是基本吻合的。王德建等^[37]在太湖地区的研究表明,氮肥适宜用量随着稻麦产量的提高而增加,研究区两种主要土壤水稻、小麦高产的氮肥适宜用量分别为225~270 kg hm⁻²与180~225 kg hm⁻²。晏娟等^[13]的结果显示,太湖地区水稻的区域平均适宜施氮

表5 农业部推荐三大粮食作物施肥配方及合计施氮量

Table 5 Fertilizer formulas for the three major grain crops recommended by the Ministry of Agriculture and corresponding total nitrogen application rate

作物 Crop	产区 Region	配方 Formula (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	目标产量 Target yield (kg hm ⁻²)	配方肥用量 Application rate in the formula (kg hm ⁻²)	追肥尿素用量 Urea sidedressing rate (kg hm ⁻²)	合计推荐施氮量 Total nitrogen rate recommended (kg hm ⁻²)
水稻 Rice	东北寒地单季稻区	13-19-13	6 750 ~ 10 500	270 ~ 435	120 ~ 225	90 ~ 160
	东北吉辽内蒙古单季稻区	16-16-14	7 500 ~ 10 500	360 ~ 495	180 ~ 240	140 ~ 190
	长江上游单季稻区	16-16-13	6 750 ~ 9 750	405 ~ 600	150 ~ 195	134 ~ 186
	长江中游单双季稻区(早稻)	18-15-10	5 250 ~ 8 250	390 ~ 615	120 ~ 195	125 ~ 200
	长江中游单双季稻区(中稻)	16-16-13	6 750 ~ 9 750	420 ~ 615	150 ~ 225	136 ~ 202
	长江中游单双季稻区(晚稻)	19-13-13	6 000 ~ 9 000	420 ~ 630	120 ~ 190	135 ~ 209
	长江下游单季稻区	19-15-11	7 500 ~ 10 500	465 ~ 645	270 ~ 375	213 ~ 295
	江南华南单双季稻区(早稻)	19-13-13	5 250 ~ 8 250	360 ~ 570	120 ~ 195	124 ~ 198
	江南华南单双季稻区(中稻)	17-14-14	6 750 ~ 9 750	420 ~ 600	150 ~ 225	140 ~ 206
	江南华南单双季稻区(晚稻)	19-13-13	5 250 ~ 8 250	360 ~ 570	120 ~ 195	124 ~ 198
	华南平原丘陵双季稻区(早稻)	18-12-16	5 250 ~ 8 250	390 ~ 615	120 ~ 195	125 ~ 200
	华南平原丘陵双季稻区(晚稻)	18-12-16	5 250 ~ 8 250	390 ~ 615	120 ~ 195	125 ~ 200
	西南高原山地单季稻区	17-13-15	6 000 ~ 9 000	390 ~ 585	150 ~ 210	135 ~ 196
小麦 Wheat	东北春麦区	12-20-13	3 750 ~ 6 750	210 ~ 390	105 ~ 195	74 ~ 137
	西北雨养旱作麦区	28-12-5	3 750 ~ 7 500	360 ~ 720	0	101 ~ 202
	西北灌溉麦区	17-18-10	4 500 ~ 8 250	285 ~ 525	165 ~ 300	124 ~ 227
	华北灌溉冬麦区	15-20-12	6 000 ~ 9 000	360 ~ 540	195 ~ 300	144 ~ 219
	华北雨养冬麦区	18-15-12	5 250 ~ 9 000	420 ~ 705	135 ~ 240	138 ~ 237
	长江中下游冬麦区	18-15-12	4 500 ~ 8 250	345 ~ 630	135 ~ 255	124 ~ 231
	西南麦区	19-15-11	3 750 ~ 7 500	255 ~ 510	90 ~ 195	90 ~ 187
玉米 Maize	东北冷凉春玉米区	14-18-13	7 500 ~ 10 500	345 ~ 480	165 ~ 240	124 ~ 178
	东北半湿润春玉米区	15-18-12	8 250 ~ 12 000	360 ~ 525	195 ~ 270	144 ~ 203
	东北半干旱春玉米区	13-20-12	6 750 ~ 10 500	375 ~ 570	210 ~ 285	145 ~ 205
	东北温暖湿润春玉米区	17-17-12	7 500 ~ 10 500	360 ~ 510	210 ~ 285	158 ~ 218
	华北中部夏玉米区	18-12-15	6 750 ~ 9 750	300 ~ 450	195 ~ 285	144 ~ 212
	华北南部夏玉米区	18-15-12	6 000 ~ 9 000	405 ~ 600	165 ~ 255	149 ~ 225
	西北春玉米区	15-20-10	6 750 ~ 10 500	345 ~ 525	180 ~ 285	135 ~ 210
	北方灌溉春玉米区	13-22-10	7 500 ~ 12 000	390 ~ 630	195 ~ 300	140 ~ 220
	西北绿洲灌溉春玉米区	17-23-6	8 250 ~ 12 000	405 ~ 600	225 ~ 315	172 ~ 247
	四川盆地玉米区	17-16-12	6 000 ~ 9 000	420 ~ 630	165 ~ 240	147 ~ 218
	西南山地丘陵玉米区	20-15-10	6 000 ~ 9 000	360 ~ 540	150 ~ 240	141 ~ 218
西南高原玉米区	19-15-11	6 000 ~ 10 500	360 ~ 630	150 ~ 255	137 ~ 237	

注:表中尿素的含氮量以460 g kg⁻¹计 Note: The concentration of nitrogen in urea is 460 g kg⁻¹

量为 $(176 \pm 24.2) \text{ kg hm}^{-2}$ ，小麦为 $(228 \pm 27.1) \text{ kg hm}^{-2}$ ；郭天财等^[38]通过环境经济学的 Coase 原理和边际收益分析，综合考虑蛋白质含量、籽粒产量、经济和生态效益，认为202~239 kg hm^{-2} 为河南小麦兰考矮早八兼顾多目标适宜的氮肥用量；杨宪龙等^[39]通过玉米-小麦-玉米连续三季田间试验，得出陕西关中小麦-玉米轮作区兼顾作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量，小麦为 150 kg hm^{-2} 、玉米为 180 kg hm^{-2} ，该施肥量下作物可获得相对较高的产量和氮肥利用率，且能保持作物收获前后土壤无机氮库的基本稳定，也可将氮肥表观损失降至较低水平。根据农业部办公厅发布的《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议（2013）》（以下简称《施肥建议》）^[40]，本研究计算了三大粮食作物在较高目标产量下的推荐氮肥施用量（《施肥建议》将目标产量划分为4个等级，为了计算的推荐施氮量相对比较集中，本研究计算的施氮量不包括最高和最低等级目标产量下的施氮量，以避免将最高最低施氮量计算在内导致施肥范围过宽而影响“平均”范围）。从计算结

果（表5）可以看出，作物因产区不同，目标产量也由之不同，计算得到的氮肥推荐施用量也不同，水稻为90~295 kg hm^{-2} ，小麦为74~237 kg hm^{-2} ，玉米为135~247 kg hm^{-2} 。本研究结果与之相比，得到的相对产量较高时的施氮量180~240 kg hm^{-2} 与《施肥建议》的推荐施氮量有较高的一致性。由此，综合考虑三大作物的产量要求、氮肥利用率均在氮肥施用量 $> 240 \text{ kg hm}^{-2}$ 后有较大幅度下降的现象，本研究认为从全国尺度上综合考虑，180~240 kg hm^{-2} 的施氮量是目前我国三大粮食作物较适宜的施氮量范围。

2.4 施氮量与氮肥利用率的相关分析

表征氮肥利用率的参数很多，如作物的生产系数或边际产量、作物的偏生产率、作物的生产效率等。目前国内比较通用的是肥料表观利用率、农学效率、偏生产力、生理利用率4个参数。本研究根据近10年来田间试验数据对氮肥施用量与氮肥利用率进行了相关分析。图4~图6为三大粮食作物施氮量与氮肥利用率相关性的散点分布图。从各散点的分布可见，三大粮食作物的氮肥利用率总体上随氮

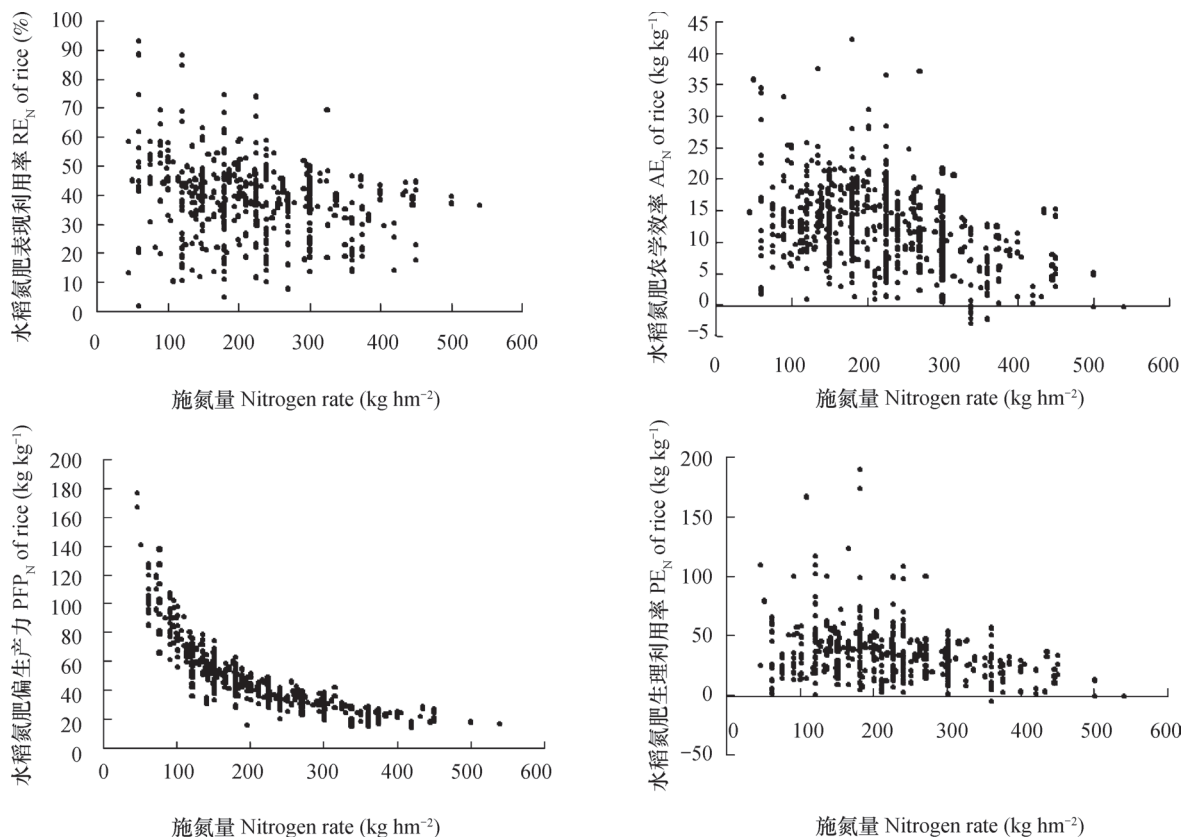


图4 水稻氮肥施用量与氮肥利用率的相关散点图

Fig. 4 Correlation scatter diagram between nitrogen application rate and nitrogen use efficiency in rice cultivation

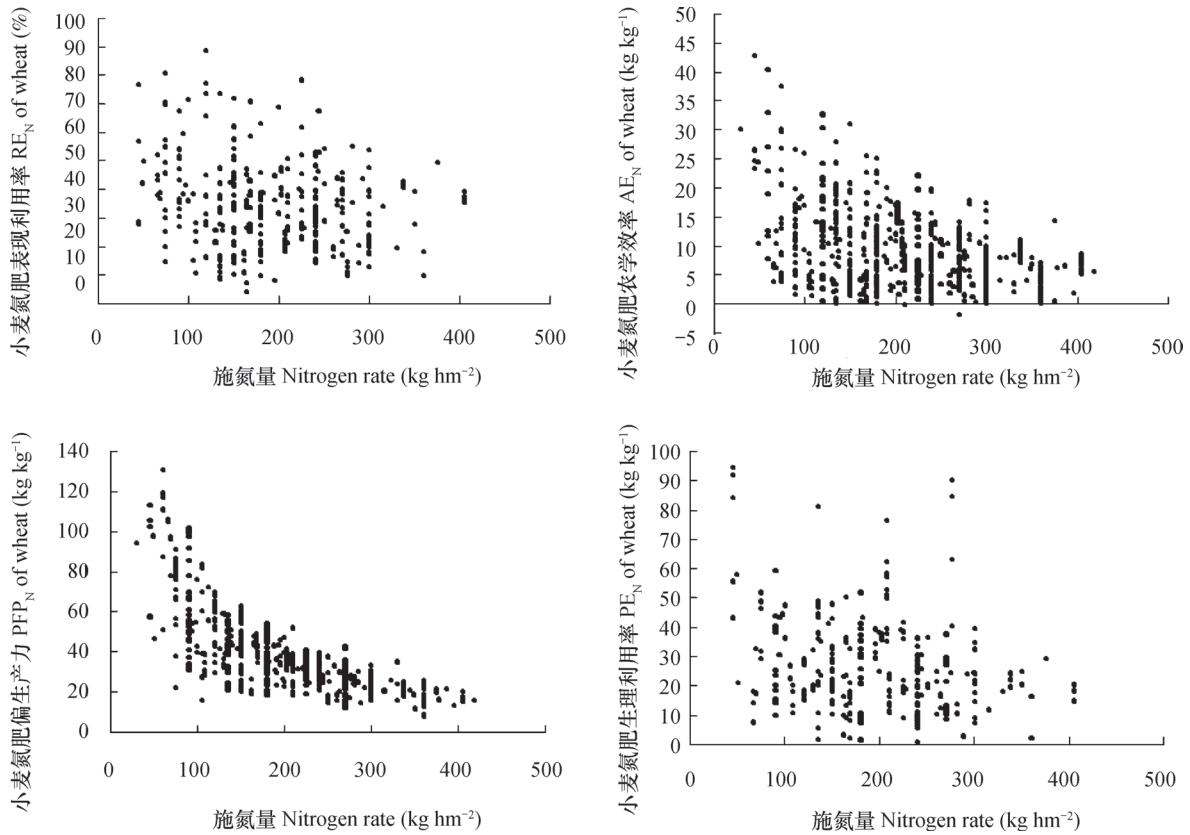


图5 小麦氮肥施用量与氮肥利用率的相关散点图

Fig. 5 Correlation scatter diagram between nitrogen application rate and nitrogen use efficiency in wheat cultivation

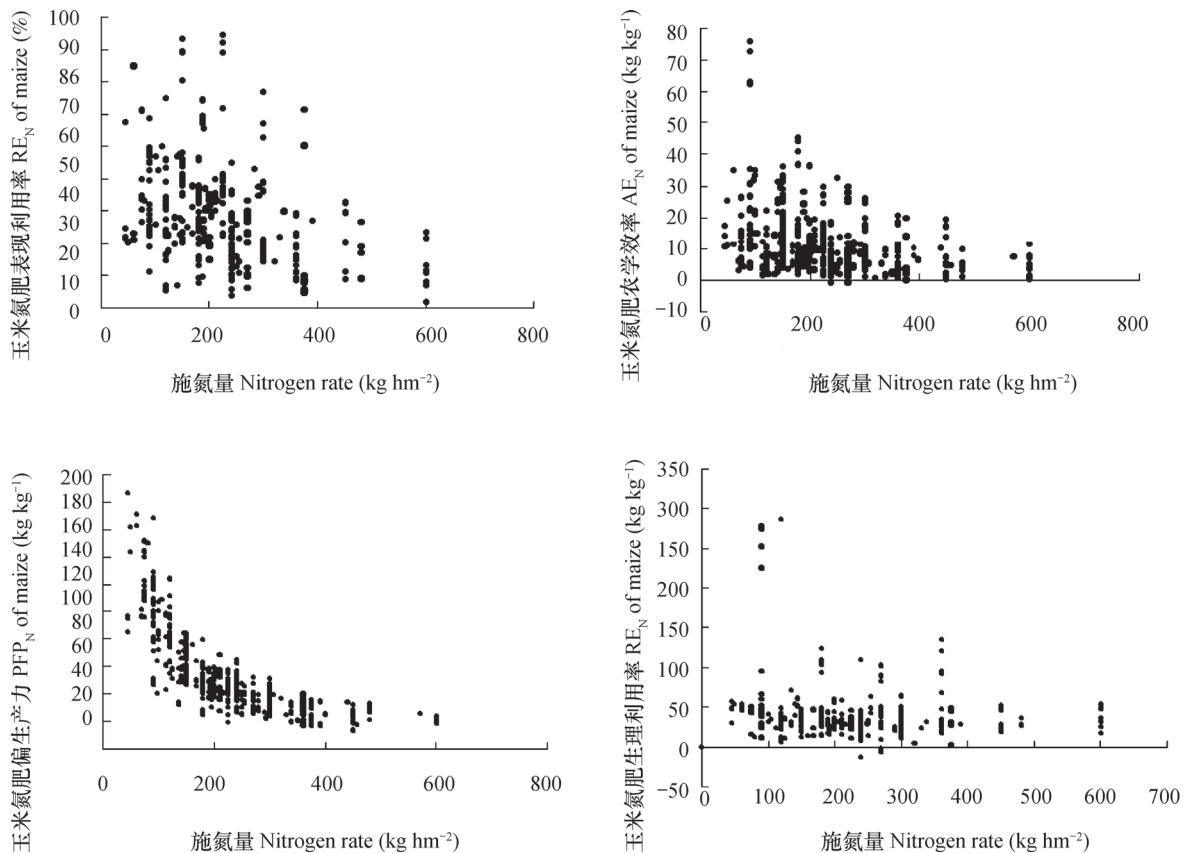


图6 玉米氮肥施用量与氮肥利用率的相关散点图

Fig. 6 Correlation scatter diagram between nitrogen application rate and nitrogen use efficiency in maize cultivation

肥施用量的增加而降低，但不是简单的线性关系。这主要是因为氮肥利用率不但受施氮量的深刻影响，而且受土壤-气候条件、施氮方法和时期、作物生长中其他营养元素的供应状况、光热水等其他因素的满足情况的深刻影响^[37]。

根据图4~图6中的散点分布特征，用幂指数方程拟合氮肥施用量与氮肥偏生产力，拟合效果均较好，水稻 $R^2=0.8489$ ，小麦 $R^2=0.6575$ ，玉米 $R^2=0.7917$ 。国内外学者普遍认为：偏生产力的计算不需要测定空白区产量和养分吸收量，简单明了、易于掌握，因此在农学界使用广泛^[7, 32]。我国当前仍习惯使用化肥表观回收率（即本文的表观利用率）表征肥料利用效率，一是由于过去化肥资源紧缺，节约化肥非常重要，二是由于过去我国土壤肥力普遍低下，土壤和环境来源养分少，化肥的增产效应非常显著，表观回收率能很好地反映作物对化肥养分的吸收状况。但是现今上述两方面的情况均发生了很大的变化，单纯应用化肥表观回收率值得商榷。在目前我国土壤和环境养分供应量增大、化肥增产效益下降的现实条件下，偏生产力是评价肥料效应的适宜指标^[7]。本研究验证了这一说法。

3 结 论

我国目前土壤氮素肥力较高，三大粮食作物不施氮肥的基础产量已处于较高水平，达到最高产量的67.9%~75.9%，施氮可以使产量增加至最高产量的92.7%~93.5%。三大粮食作物的氮肥施用量与相对产量的相关性均高于氮肥施用量与产量的相关性。根据氮肥施用量与相对产量相关方程，得到最高产量施氮量水稻为246 kg hm⁻²、小麦为250 kg hm⁻²、玉米为274 kg hm⁻²。近30年，我国三大粮食作物水稻、小麦、玉米的氮肥表观利用率经历了先降低再升高的一个过程，目前平均为34.3%，较2001—2005年的统计结果提高6.8个百分点，基本回升至20世纪80年代的平均水平。氮肥施用量与氮肥偏生产力相关性均可以用幂指数方程拟合，且拟合效果均较好，水稻 $R^2=0.8489$ ，小麦 $R^2=0.6575$ ，玉米 $R^2=0.7917$ 。偏生产力是现阶段评价氮肥效应的适宜指标。综合考虑三大作物的产量要求、氮肥利用率，本研究认为180~240 kg hm⁻²的施氮量是目前我国三大粮食作物较适宜的施氮量范围。

参 考 文 献

- [1] Erisman J W, Galloway J N, Sutton M S, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 636—639
- [3] FAO. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/site/575/DesktopDefault.aspx?PageID=575#ancor>
- [3] 常铁智, 李加楠. 2013—2017 年中国氮肥行业投资分析及前景预测报告. <http://www.ocn.com.cn>. Chang Y Z, Li J N. Report on investment analysis and predict of nitrogen industry from 2013—2017 (In Chinese). <http://www.ocn.com.cn>
- [4] 中华人民共和国国土资源部. 2012 中国环境状况公报. http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/201306/t20130604_1223034.htm, 2013-06-04. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Bulletin of environment status of China in 2012 (In Chinese). http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/201306/t20130604_1223034.htm, 2013-06-04
- [5] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494 (7438) : 459—462
- [6] 朱兆良. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理//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.//Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soil of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228—245
- [7] 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. *土壤学报*, 2008, 45 (5) : 915—924. Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5) : 915—924
- [8] 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 颜晓元. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (1) : 1—5. Zhu Z L, Zhang S L, Yin B, et al. Historical comparison on the response curves of rice yield-nitrogen application rate in Tai-lake region (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (1) : 1—5
- [9] 方玉东, 封志明, 胡业翠, 等. 基于GIS技术的中国农田氮素养分收支平衡研究. *农业工程学报*, 2007, 23 (7) : 35—41. Fang Y D, Feng Z M, Hu Y C, et al. Balance of field nitrogen nutrient input/output using GIS technology in China (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (7) : 35—41
- [10] 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, 2006, 51 (7): 750—763. Huang Y, Sun W J. The change trend of organic carbon content of farmland surface soil in China in last 20 years (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (7): 750—763
- [11] 张军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响. 作物学报, 2011, 37 (11): 2020—2029. Zhang J, Zhang H C, Duan X M, et al. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2011, 37 (11): 2020—2029
- [12] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (1): 7—16. Feng Y, Chen H F, Hu X M, et al. Optimal nitrogen application rates on rice grain yield and nitrogen use efficiency in high, middle and low-yield paddy fields (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20 (1): 7—16
- [13] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 太湖地区稻麦轮作系统中氮肥效应的研究. 南京农业大学学报, 2009, 32 (1): 61—66. Yan J, Yin B, Zhang S L, et al. Studies on the nitrogen fertilizer application of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32 (1): 61—66
- [14] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究. 北京: 中国农业科学院, 2008. Yan X. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition in China (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008
- [15] 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. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1136—1143. Li H L, Zhang W F, Zhang F S, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16 (5): 1136—1143
- [16] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究. 北京: 中国农业大学, 2014. Wu L. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2014
- [17] 陈婧. 基于统计模型的中国南方稻区适宜施氮量及氮素损失估算. 南京: 南京农业大学, 2011. Chen J. Quantifying optimum nitrogen rates and nitrogen losses for rice production in southern China based on statistical model (In Chinese). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011
- [18] 张铭, 蒋达, 缪瑞林, 等. 不同土壤肥力条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收利用及产量的影响. 麦类作物学报, 2010, 30 (1): 135—140, 148. Zhang M, Jiang D, Miao R L, et al. Effects of N application rate on nitrogen absorption, utilization and yield of wheat under different soil fertility after rice (In Chinese). Journal of Triticeae Crops, 2010, 30 (1): 135—140, 148
- [19] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响. 麦类作物学报, 2014, 34 (2): 194—202. Cai R G, Zhang D, Zhang M, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat under irrigated and rainfed condition (In Chinese). Journal of Triticeae Crops, 2014, 34 (2): 194—202
- [20] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收利用及子粒产量和蛋白质含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (2): 150—155. Ma X H, Yu Z W, Liang X F, et al. Effects of nitrogen application rate and ratio of base and topdressing on nitrogen absorption, utilization, grain yield, and grain protein content in winter wheat (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12 (2): 150—155
- [21] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响. 中国农业科学, 2013, 46 (12): 2483—2491. Wang Y L, Liu T X, Zhao P, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and soil nitric N in super-high-yield summer maize (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (12): 2483—2491
- [22] 叶东靖, 高强, 何文天, 等. 施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (3): 552—558. Ye D J, Gao Q, He W T, et al. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16 (3): 552—558
- [23] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析. 北京: 中国农业大学, 2014. Wang G L. Quantitative analysis of reactive nitrogen losses and nitrogen use efficiency of three major grain crops in China (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2014
- [24] 朱兆良. 中国氮肥的使用现状、问题和对策 // 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 // Li Q K, 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
- [25] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴1986. 北京: 中国农业出版社, 1987. The Editorial Board of China Agriculture Yearbook. China agriculture yearbook 1986 (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1987
- [26] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴2006. 北京: 中国农业出版社, 2007. The Editorial Board of China Agriculture Yearbook. China agriculture yearbook 2006 (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2007
- [27] 张福锁, 马文奇. 测土配方施肥助推粮食增产增收. <http://www.fert.cn/news/2009/6/5/200965913145353.shtml>. 2009-06-05. Zhang F S, Ma W Q. Project of soil testing and fertilizer recommendation helps to improve grain yield and farmers income (In Chinese). <http://www.fert.cn/news/2009/6/5/200965913145353.shtml>
- [28] Dobermann A, Cassman K G. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 2002, 247 (1): 153—175
- [29] Dobermann A, Witt C, Dawe D, et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Research*, 2002, 74: 37—66
- [30] IFA /UNEP. The fertilizer industry//World food supplies and the environment. Paris: IFA, 1998
- [31] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 86—156
- [32] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31: 132—140
- [33] Roberts T L. Improving nutrient use efficiency. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2008, 32: 177—182
- [34] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全. *资源科学*, 2008, 30 (3): 415—422. Wang J Q, Ma W Q, Jiang F R, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security (In Chinese). *Resources Science*, 2008, 30 (3): 415—422
- [35] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (1): 1—6. Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20 (1): 1—6
- [36] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考. *生态环境*, 2003, 12 (2): 192—197. Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2003, 12 (2): 192—197
- [37] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. *土壤学报*, 2003, 40 (3): 426—432. Wang D J, Lin J H, Sun R J, et al. Optimum nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the ground water in the Taihu Lake area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 426—432
- [38] 郭天财, 宋晓, 冯伟, 等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量. *作物学报*, 2008, 34 (5): 886—892. Guo T C, Song X, Feng W, et al. Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high-yielding regions (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34 (5): 886—892
- [39] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量研究. *生态学报*, 2014, 34 (21): 6115—6123. Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain, Shaanxi Province (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (21): 6115—6123
- [40] 农业部种植业管理司. 农业部办公厅关于印发《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议(2013)》的通知. (2013-07-29). http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tfw/201307/t20130729_3541508.htm. Department of Plantation Management of the Ministry of Agriculture. Notification from the office of the Ministry of Agriculture about promulgating and distributing "Fertilizer Formulas and Fertilization Recommendations for Wheat, Maize and Rice in their Major Production Regions (2013)" (In Chinese). (2013-07-29). http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tfw/201307/t20130729_3541508.htm

NITROGEN USE EFFICIENCIES OF MAJOR GRAIN CROPS IN CHINA IN RECENT 10 YEARS

Yu Fei^{1, 2} Shi Weiming^{1†}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Application of nitrogen fertilizer is an important approach to ensurance of food security in China. In recent years a large volume of nitrogen fertilizer applied has, though, increased crop yields significantly, it has also at the same time brought about a series of serious environmental problems. So, it is of great importance to get to know well the current situation of nitrogen use efficiency in China, to how to coordinate agricultural benefit with environmental impacts of the use of nitrogen fertilizer in formulating a reasonable fertilization strategy. Therefore, on the basis of the researches accomplished in the 1980s and 2001—2005, nitrogen use efficiencies in the resent 10 years of major grain crops in China were analyzed in this research. The literature research method was used to retrieve all the papers (in Chinese) related to the subject of crop response to nitrogen fertilizer application from the CNKI and VIP databases published after 2004. Results show that currently the basic yields of the three major grain crops without nitrogen fertilization could reach up to 67.9% ~ 75.9% of the maximum yields of the crops with nitrogen fertilization. Yield response of rice, wheat and maize to nitrogen fertilizer application might reach up to 43.0%, 28.2% and 25.8%, respectively. Based on the regression equation of nitrogen application rates and relative yields, the nitrogen application rate for maximum yield of rice, wheat and maize was 246, 250 and 274 kg hm⁻², respectively. In the recent 10 years, both the apparent recovery rate (RE_N) and agronomic efficiency of applied nitrogen (AE_N) somewhat increased, reaching up to 39.0%, 34.8% and 29.1%, and 12.7, 9.2 and 11.1 kg kg⁻¹, respectively, for rice, wheat and maize. Compared with the statistics of the period (2001—2005), RE_N increased by 6.8%, almost reaching 35% of the level in the 1980s. The relationship between nitrogen application rate and partial factor productivity (PFP_N) of nitrogen fertilizer could be well described with the power exponent equation for all the three major crops, with R² for rice, wheat and maize being 0.848 9, 0.657 5 and 0.791 7, respectively. Currently, PFP_N is an appropriate index for use in evaluating nitrogen fertilizer utilization efficiency. Taking into overall account target yields and nitrogen use efficiencies of the three major grain crops, it is held that 180 ~ 240 kg hm⁻² is the proper N application rate for all the three crops in China today, and quite in consistence with the recommendation in the “Fertilizer Formulas and Fertilization Recommendations for Wheat, Maize and Rice in their Major Production Regions” promulgated and distributed by the Ministry of Agriculture of China.

Key words Apparent recovery rate of applied nitrogen (RE_N); Agronomic efficiency of applied nitrogen (AE_N); Partial factor productivity from applied nitrogen (PFP_N); Grain crops; Proper nitrogen application rate

(责任编辑: 卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system..... Zhao Yanfeng, Cheng Daoquan, Chen Jie, et al. (1207)
 Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)

Research Articles

- Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. (1235)
 Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties typical of Central and East China Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
 Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
 Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta Li Ping, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. (1271)
 Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1278)
 Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
 Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
 Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
 Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
 Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978–2008 Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
 Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China Yang Wen, Zhou Jiaogen, Wang Meihui, et al. (1343)
 Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
 Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
 Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
 Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on *Eisenia fetida* Ma Jingjing, Qian Xinchun, Zhang Wei, et al. (1381)
 Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
 Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonetz Zhang Tibin, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. (1399)
 Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Ma Zhonghua, et al. (1410)
 Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive waste disposal Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)

Research Notes

- Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data Song Jinhong, Wu Jinggui, Zhao Xinyu, et al. (1429)
 Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
 Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)

Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

