

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23079

侧深施氮对我国水稻产量和氮利用效率影响的整合分析

胡 洋¹, 肖大康¹, 李 炫¹, 李锦涛¹, 胡 仁¹, 任科宇², 侯 俊^{1*}, 曹玉贤^{3*}

(1. 长江大学农学院 / 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;

3. 长江大学生命科学学院, 湖北 荆州 434025)

摘 要: 探讨在不同条件下侧深施氮 (SDN) 对水稻产量及氮肥利用效率的影响, 为水稻精准施氮提供理论依据。通过搜集已发表的文献, 建立了 214 组 SDN 和农民常规撒施 (BN) 下水稻产量和氮肥利用效率的数据库。采用整合分析的方法, 研究在水稻种植区、土壤氮素含量、不同施氮量等条件下 SDN 对水稻产量及氮肥利用效率的提升幅度, 采用随机森林方法明确了影响 SDN 效果的主控因素。相对于 BN, SDN 能够显著提高产量、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥吸收利用率, 提高幅度分别为 4.57%、4.57%、23.94% 和 21.11%。不同种植区域下 SDN 对产量的提升幅度东北稻区最大。不同水稻类型下 SDN 的产量和氮肥利用效率提升幅度不同, 产量提升方面, 粳稻 (6.85%) > 籼稻 (5.11%), 杂交稻无显著提升; SDN 对氮肥农学利用率和吸收利用效率的提升幅度方面, 籼稻 > 粳稻 > 杂交稻。不同种植模式下 SDN 对产量和氮肥利用效率的提升幅度均为单季稻 > 双季稻。土壤全氮 < 2 g/kg、速效氮 < 150 mg/kg 时 SDN 对产量的提升幅度较大。当 SDN 的氮肥施用量 ≤ 150 kg/hm² 和追肥施氮均使水稻产量和氮肥利用效率提升幅度较大, 然而, 随着 SDN 施氮量的提升, 增产增效幅度下降。随机森林分析结果表明 SDN 对水稻产量的提高幅度主要受土壤全氮、有效磷和施氮量的影响, 而其对水稻氮肥利用效率的提升幅度主要受速效氮、施氮量和有效磷的影响。SDN 对水稻产量和氮肥利用效率均有显著的提高, 南方稻区和长江流域采取 SDN 对产量和氮素利用效率增幅不如东北稻区, SDN 有利于含氮量较低的土壤水稻增产增效, 且 SDN 施氮量不宜超过 150 kg/hm², 增效型氮肥、追施氮肥以及磷肥与 SDN 配合施用利于增产增效。

关键词: 水稻; 侧深施肥; 氮素; 产量; 氮利用效率

我国是世界上最大的水稻生产国家, 但水稻平均单产较低, 氮利用效率仅为 30% ~ 35%^[1-2]。要实现水稻高产高效就不能过度依赖氮投入^[3], 需要探究氮肥管理对水稻产量和氮利用效率的影响。水稻机插侧深施氮 (SDN) 指在秧苗移栽的同时, 将肥料颗粒精准施用在水稻秧苗侧面 3 ~ 5 cm 的土壤中^[4], 这种施氮方式能有效促进水稻对氮素的吸收, 提高水稻的氮肥利用率和产量^[5]。SDN 对水稻产量和氮利用效率的影响已经开展了很多研究并取得较多成果, 然而其增产增效结果却有

差异。SDN 对单季稻和双季稻的增产增效作用均显著^[5]; 然而, 杨剑波的研究^[6]却表明 SDN 对水稻产量和氮利用效率提升不显著甚至有降低的可能。此外, SDN 增产增效作用还受到追肥的影响, 例如, 王晓丹^[7]研究表明, 一次性 SDN 基施氮肥可显著提高水稻产量和氮利用效率; SDN 基施后追若干次氮肥的增产增效作用与一次性 SDN 比差异不显著或小幅降低。然而, 黄恒等^[5]研究却表明, 相对于一次性 SDN, SDN 加后期追肥会使水稻获得更高的产量和氮利用率。SDN 的增产增效作用还受到种植区域、管理措施、氮肥类型和土壤理化性等影响。首先土壤基础肥力水平是决定作物能否高效利用肥料的关键因子, 我国种植区域辽阔, 土壤肥力差异较大, 导致水稻产量及氮利用率响应特征不同^[3, 8], 水稻类型及不同种植模式对其影响也比较密切, 因此有必要在上述条件下探究 SDN 对水稻产量和氮利用效率的影响。尽管大量研究报告 SDN 对水稻产量和氮利用率等方面有影响,

收稿日期: 2023-02-10; 录用日期: 2023-05-27

基金项目: 碳账户核算及减排固碳技术研究 (衢农合 2022-31); 2022 年湖北省重点研发计划 (2022BBA002); 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金 (KF202109); 国家重点研发计划 (2017YFD0200705)。

作者简介: 胡洋 (2001-), 本科生, 主要研究方向为养分资源综合管理研究。E-mail: 1787089572@qq.com。

通讯作者: 侯俊, E-mail: houjungoodluck1@163.com; 曹玉贤, E-mail: 1553671854@qq.com。



但大多都集中在施氮量和施肥次数方面,此外,不同地区、水稻类型、管理措施以及土壤基础肥力等之间的差异影响无法分析。因此,需要综合田间试验并结合相关影响因素来探索 SDN 对水稻增产增效的影响。本研究采用整合分析的方法,综合量化侧深施氮在各因素下对水稻产量和氮利用效率的影响变化幅度,并通过随机森林模型阐明不同因素的重要度,为实际生产过程中 SDN 的使用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

利用中国知网 (CNKI) 和 Web of Science 两个数据库对发表的关于水稻 SDN、产量及氮利用效率的国内外期刊及学位论文进行检索。分别以“侧深施氮”“水稻”“产量”“氮利用效率”和“rice”“yield”“deep fertilization”“China”为关键词检索获得相关文献。文献需满足如下筛选条件: (1) 以水稻 (单季稻、双季稻, 籼稻、粳稻、杂交稻) 为研究对象的大田试验, 具有明确的试验地点; (2) 试验处理必须包含农民常规施肥 (BN, 撒施, 追肥 1 ~ 3 次) 和 SDN (不追肥或者追肥 1 ~ 2 次), 且在施氮量相同的条件下, 有产量和氮利用效率数据; (3) 每个试验处理重复不少于 3 次; (4) 含有试验前表层土壤 (0 ~ 20 cm) 基础理化性质数据, 包括土壤全氮含量、速效氮含量。文献中以图呈现的数据通过 Get Data Graph Digitizer 2.24 (Get Data Pty Ltd, KogarahNSW2210, 澳大利亚) 提取。经过筛选, 共获取 56 篇文献, 214 组数据 (产量 214 组, 氮素偏生产力 212 组, 农学利用率 114 组, 吸收利用效率 56 组)。本文参考 Chen 等^[9] 和全国第二次土壤普查^[10] 得到的土壤养分含量分级标准, 将土壤氮素含量划分为高、中、低 3 个水平, 如全氮 ≤ 1.5 、 $1.5 \sim 2$ 、 >2 ; 参考 Zhang 等^[11] 的研究将施氮量划分为高 (>250 kg/hm²)、中 ($150 \sim 250$ kg/hm²)、低 (≤ 150 kg/hm²) 3 个水平。水稻实际产量、农学利用率、氮素偏生产力、氮素吸收利用效率为响应变量直接获取或者参考朱从桦等^[4] 的方法计算, 水稻氮品种、施氮量、SDN 次数、全氮含量、速效氮含量、稻米品种、地区 (样本少于 2 个则不作统计)、种植模式为解释变量, 其具体划分如表 1 所示。

表 1 侧深施氮对水稻产量和氮利用效率效应数据库

解释变量分类分组	
解释变量	分组
氮品种	ENF vs ENF; CN vs ENF; CN vs CN
施氮量 (kg/hm ²)	≤ 150 ; $150 \sim 250$; >250
侧深施氮次数	1; >1
全氮 (g/kg)	≤ 1.5 ; $1.5 \sim 2$; >2
速效氮 (mg/kg)	≤ 90 ; $90 \sim 150$; >150
水稻类型	粳稻; 籼稻; 杂交稻
种植区域	东北稻区; 长江流域稻区; 南方稻区; 其他稻区
种植模式	单季稻; 双季稻

注: ENF 和 CN 分别代表增效氮肥和速效型氮肥, ENF vs ENF 为农民常规撒施和侧深施氮肥均为增效型氮肥; CN vs ENF 为农民常规撒施氮肥品种为速效型氮肥, 侧深施氮肥品种为增效型氮肥; CN vs CN 为农民常规撒施和侧深施氮肥均为速效型氮肥。东北稻区包括吉林省、黑龙江省、辽宁省; 长江流域稻区包括湖北省、重庆市、四川省东部、江西省、浙江省; 南方稻区包括广东省、福建省、海南省、浙江省、湖南省、广西壮族自治区; 其他地区主要包括云南省、贵州省等。下同。

1.2 数据计算与分析

整合分析方法对多个相互独立的研究结果进行定量综合评价。本研究采用 Metawin 2.1 进行整合统计分析^[12], 并用自然对数响应比 $\ln R$ 来描述 SDN 对水稻产量、氮肥利用效率及构成因子的影响^[13]:

$$\ln R = \ln(x_a/x_b)$$

公式中的 x_a 和 x_b 分别是 BN 和 SDN 对应的水稻产量及氮利用效率的平均值。在分组计算合并效应时, 利用对独立的响应比进行加权处理, 公式如下:

$$V = \frac{SD_a^2}{nx_a^2} + \frac{SD_b^2}{nx_b^2}$$
$$W = \frac{1}{V}$$

V 为平均变异系数, W 为权重系数, SD_a^2 和 SD_b^2 分别代表 BN 处理组和 SDN 处理组的标准差, 用产量平均数的 5% 作为相应处理的 SD 。其中 n 表示重复数。采用随机效应模型计算平均效应值, 95% 置信区间采用 bootstrapping ($n=4999$) 法进行估计。本研究中的合并效应值以百分比表示, 通过公式 $(e^{\ln R} - 1) \times 100\%$ 进行换算^[14]。

如果一个变量的 95% 置信区间重叠于零, 表明该 BN 组的变量与 SDN 组无显著差异。如果分类

变量的 95% 置信区间没有重叠,则认为它们的均值存在显著差异,在零刻度右边表明 SDN 处理显著高于 BN;左边表明 SDN 处理显著低于 BN。通过卡方检验对不同分组间的效应值进行异质性检验,若检验结果 $P<0.05$,表示分组间结果存在异质性,说明该效应结果受施肥方式因素显著影响,可采用随机效应模型计算合并统计量,否则采取固定效应模型^[15]。数据采用 Excel 2010 整理,Meta Win 2.1 进行 Meta 统计分析。在 Meta 分析中,不同处理间产量和氮利用效率的显著性分析用 SPSS 11.0,图 1 利用 Meta 分析了 212 组水稻 SDN 对水稻产量及氮利用效率的响应比是指 SDN 对产量及氮利用效率的增加幅度,且分布检验表明全部响应比符合正态分布 ($P<0.01$),水稻 SDN 对产量、农学利用

率、氮素偏生产力和氮肥吸收利用效率的响应比平均值分别为 0.04 ± 0.08 、 0.22 ± 0.24 、 0.05 ± 0.08 和 0.19 ± 0.21 ,因此不用进行数据转化而直接进行因素分析。随机森林方法则是运用 R 语言中的“Random Forest”来计算各因素对 SDN “增效”作用的重要度^[16],采用 Sigmaplot 10.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 样本描述统计

SDN 较 BN 能显著增加水稻产量,与 BN 相比,总体平均增长幅度为 4.57% (置信区间为 3.57% ~ 5.62%) (表 2)。与 BN 相比,SDN 处理下的氮素偏生产力、农学利用率和吸收利用率的增长幅度分别为 23.94%、4.57% 和 21.11%。

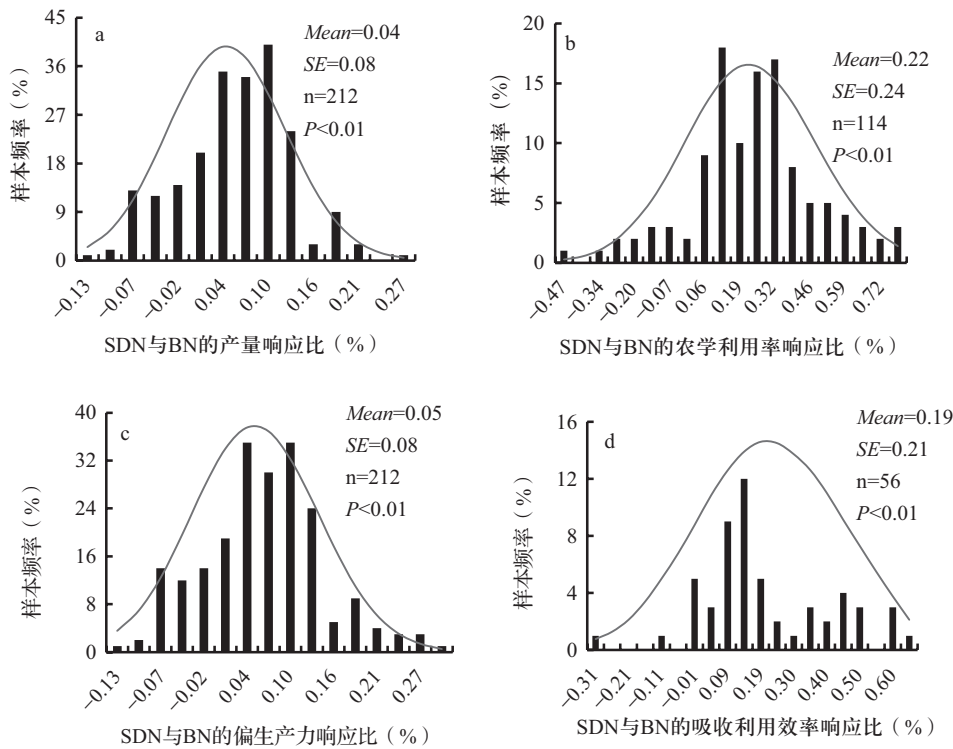


图 1 产量 (a)、氮素农学利用率 (b)、氮素偏生产力 (c) 和氮素吸收利用效率 (d) 样本分布频率

注: 曲线代表数据呈极显著的正态分布 ($P<0.01$); Mean 和 SE 分别代表数据的平均值和标准误。

表 2 样本总体侧深施氮对农民常规产量及氮利用效率的影响

项目	产量 (kg/hm ²)	氮素偏生产力 (kg/kg)	氮素农学利用率 (kg/kg)	氮素吸收利用率 (%)
BN	9098 ± 455	49.74 ± 2.49	13.14 ± 0.66	35.84 ± 1.79
SDN	9510 ± 475	53.35 ± 2.67	16.43 ± 0.82	43.47 ± 2.17
增加 (%)	4.57 ± 0.23	4.57 ± 0.23	23.94 ± 1.20	21.11 ± 1.06
置信区间 (%)	3.57 ~ 5.62	3.55 ~ 5.59	19.30 ~ 28.24	15.68 ~ 26.79

注: BN 为农民常规施肥, SDN 为侧深施氮。下同。

2.2 侧深施氮对水稻产量的影响

2.2.1 不同水稻种植区、水稻类型和种植模式下侧深施氮对产量的影响

整合分析结果表明(图2),在不同种植区域条件下,东北稻区>南方稻区>长江流域稻区。对于不同的水稻类型而言,SDN较NB对水稻产量的提升幅度为粳稻>籼稻>杂交稻,其中粳稻提升幅度为6.85%(置信区间为5.42%~8.33%),籼稻提升幅度为5.11%。不同的种植模式方面,SDN较BN对单季稻产量的提升幅度(7.39%)大于双季稻(2.00%)。

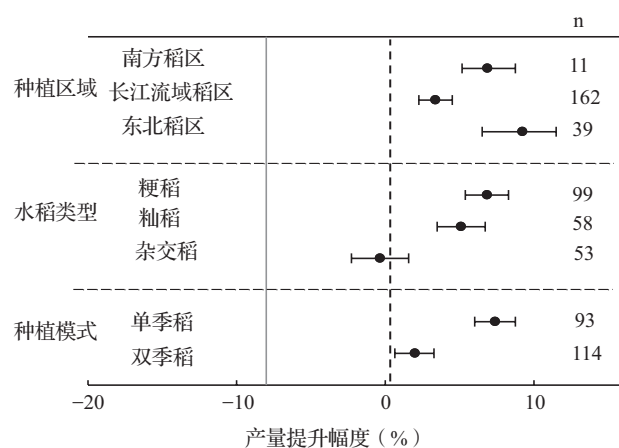


图2 不同水稻种植区、水稻类型和种植模式

下侧深施氮对产量增幅的影响

注: n 指样本数, 点和误差线分别代表响应比及其 95% 置信区间, 如果误差线没有跨越零线表示处理和对照存在显著差异, 后面的数值代表样本数。下同。

2.2.2 不同稻田土壤性质和氮肥管理下侧深施氮对产量的影响

如图3所示, SDN对水稻产量的提高与稻田肥力密切相关。随着土壤全氮含量的增加, SDN对水稻产量提高的幅度呈先降低后增加的趋势, 当全氮 ≤ 1.5 g/kg时提高的幅度最大, 为10.45%。SDN对水稻产量提高的幅度随土壤速效氮呈先降低后增加的趋势, 当速效氮 ≤ 90 mg/kg时, 提升幅度最大为9.47%。如图4所示, 与BN相比, 在不同氮品种、施氮量和施肥次数条件下SDN均能显著提高水稻产量。对于不同氮肥品种而言, 当BN条件下氮品种为速效型氮肥而SDN为增效型氮肥时, 产量提升幅度最高6.67%(置信区间为4.23%~8.95%), 但是差异不显著。随着施氮量的增加, 产量提升幅度先减小后增加, 施氮量 ≤ 150 kg/hm²时, 产量提

升幅度为8.65%(置信区间为6.64%~10.96%)。SDN为一次性施肥时, 产量提升幅度为3.93%, 追施氮肥(施肥次数>1), SDN产量提升幅度为4.56%, 略高于一次施肥, 但差异不显著。

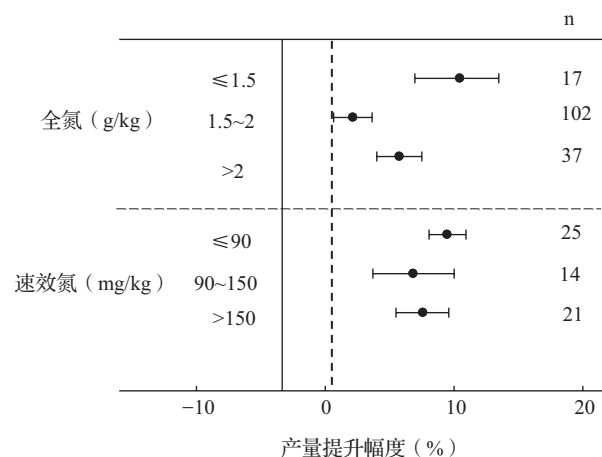


图3 不同土壤养分水平下侧深施氮对产量增幅的影响

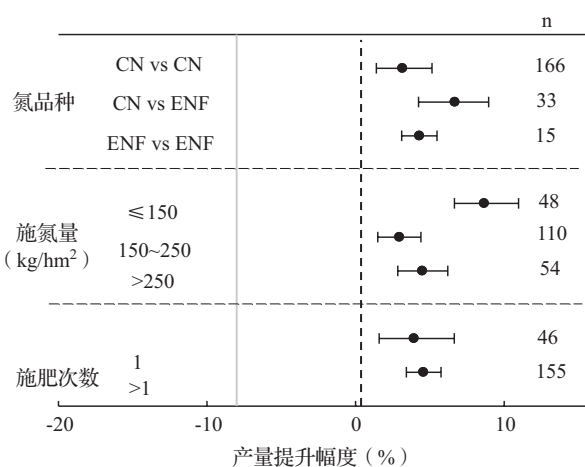


图4 不同氮管理下侧深施氮对产量增幅的影响

2.3 侧深施氮对水稻氮利用效率提升的影响

2.3.1 不同水稻类型、种植区和不同种植模式下侧深施氮对氮利用效率提升的影响

如表3所示, 在不同的水稻类型下, SDN较BN对水稻氮素农学利用率、氮素偏生产力和吸收利用效率都有显著提升, 籼稻的农学利用率和吸收利用效率最大, 提升幅度分别为37.01%和40.43%。在不同的种植区下, SDN对水稻的氮利用效率都有显著提升, 具体表现为南方稻区(39.29%)>东北稻区(29.50%)>长江流域稻区(20.94%)。SDN对水稻氮素偏生产力和氮素吸收利用率的提升幅度为东北稻区较大, 分别为12.60%

和 14.97%。不同的种植模式下，SDN 对水稻氮利用效率的提升幅度为单季稻高于双季稻，单季稻氮素农学利用率、氮素偏生产力和氮素吸收利用率的增幅分别是 31.46%、8.63% 和 28.63%。

表 3 不同水稻类型、地区、种植模式下侧深施氮对氮利用效率的影响

项目		氮素农学利用率		氮素偏生产力		氮素吸收利用效率	
		增幅（%）	置信区间（%）	增幅（%）	置信区间（%）	增幅（%）	置信区间（%）
水稻类型	粳稻	20.27（59）	14.28 ~ 26.62	7.96（97）	6.32 ~ 9.72	17.27（31）	12.54 ~ 22.35
	籼稻	37.01（30）	30.35 ~ 44.13	5.71（58）	3.92 ~ 7.52	40.43（12）	28.23 ~ 53.12
	杂交稻	17.39（23）	5.87 ~ 29.09	-0.41（53）	-2.25 ~ 1.46	9.77（11）	-5.62 ~ 27.87
地区	东北稻区	29.50（19）	22.61 ~ 37.77	12.60（37）	9.75 ~ 15.76	14.97（9）	11.61 ~ 21.36
	长江流域稻区	20.94（85）	15.40 ~ 26.44	3.49（162）	2.30 ~ 4.68	4.95（39）	2.21 ~ 15.82
	南方稻区	39.29（10）	27.04 ~ 52.63	6.89（11）	5.19 ~ 8.61	—	—
	其他稻区	—	—	0.26（2）	-0.46 ~ 1.00	—	—
种植模式	单季稻	31.46（49）	25.60 ~ 37.32	8.63（91）	7.14 ~ 10.20	28.63（25）	19.28 ~ 38.17
	双季稻	18.18（64）	11.82 ~ 24.82	2.22（114）	0.79 ~ 3.62	14.49（30）	9.47 ~ 20.44

注：括号中的数据为对应解释变量的样本数，下同。

2.3.2 不同土壤性质和氮管理下侧深施氮对水稻氮利用效率提升的影响

如表 4 所示，不同稻田肥力下 SDN 对氮利用效率的提高不同。随着土壤全氮含量的增加，SDN 对水稻农学利用率提高的幅度先减小后增加，在全氮 ≤ 1.5 g/kg 时提高幅度最大，为 51.56%，水稻氮

素偏生产力提高的幅度有相似规律。随着土壤全氮含量的增加，SDN 对水稻氮素吸收利用率提高的幅度具体表现为：当全氮 ≤ 1.5 g/kg、1.5 ~ 2 g/kg 和 >2 g/kg 时增幅分别为 51.95%、19.04% 和不显著。随着土壤速效氮的增加，SDN 对水稻氮素农学利用率提高的幅度先增加后减小。不同

表 4 不同稻田肥力、不同氮品种、施氮量和施氮次数下侧深施氮对氮利用效率的影响

项目		氮素农学利用率		氮素偏生产力		氮素吸收利用效率	
		增幅（%）	置信区间（%）	增幅（%）	置信区间（%）	增幅（%）	置信区间（%）
全氮 （g/kg）	≤ 1.5	51.56（16）	34.23 ~ 71.04	9.60（19）	6.67 ~ 13.04	51.95（7）	39.26 ~ 66.08
	1.5 ~ 2	14.35（52）	7.67 ~ 21.64	2.76（108）	1.19 ~ 4.38	19.04（34）	11.97 ~ 27.41
	>2	22.84（20）	10.75 ~ 35.60	6.07（29）	3.86 ~ 8.24	-3.03（4）	-20.44 ~ 18.19
速效氮 （mg/kg）	≤ 90	43.75（22）	33.63 ~ 55.72	10.53（26）	8.38 ~ 13.04	48.11（12）	36.51 ~ 60.64
	90 ~ 150	49.45（7）	24.19 ~ 81.03	6.10（15）	3.06 ~ 9.20	39.91（7）	23.36 ~ 58.58
	>150	34.54（14）	23.54 ~ 47.43	11.08（22）	7.33 ~ 15.20	—	—
氮品种	ENF vs ENF	10.81（2）	9.78 ~ 11.85	3.15（15）	1.38 ~ 5.25	—	—
	CN vs ENF	28.81（17）	14.05 ~ 43.43	6.67（33）	4.22 ~ 9.05	29.29（14）	15.73 ~ 45.69
	CN vs CN	23.41（95）	17.56 ~ 29.36	4.29（166）	3.04 ~ 5.57	18.55（42）	12.15 ~ 25.41
施氮量 （kg/hm ² ）	≤ 150	34.89（30）	26.06 ~ 45.14	10.88（48）	8.16 ~ 13.75	27.30（12）	16.20 ~ 41.38
	150 ~ 250	28.54（49）	19.72 ~ 37.93	3.16（110）	1.66 ~ 4.60	26.01（27）	14.94 ~ 38.32
	>250	9.80（35）	2.34 ~ 17.22	4.36（54）	2.48 ~ 6.30	27.30（17）	5.31 ~ 14.92
施氮次数	1	15.52（31）	4.25 ~ 26.71	4.14（46）	1.64 ~ 6.86	16.33（27）	8.18 ~ 24.65
	>1	24.52（71）	20.01 ~ 29.19	5.33（153）	3.98 ~ 6.67	20.55（25）	14.48 ~ 27.42

氮品种下, CN vs ENF 对氮素农学利用率、氮素偏生产力和氮素吸收利用率的提升幅度都最大, 分别为 28.81%、6.67% 和 29.29%。随着施氮量的增加, 氮素农学利用率和氮素偏生产力的提升幅度逐渐减小, 氮素吸收利用效率提升幅度相差不大。SDN 追肥氮 (施肥次数 >1) 氮素农学利用率、偏生产力和利用效率的提升幅度均大于 SDN 一次性施肥。

2.4 氮利用影响侧深施氮增产增效效果的主控因素

利用随机森林分析 SDN 对水稻产量及氮利用效率增幅的影响因素进行重要性分析 (图 5)。重要度指预测误差准确性降低的程度, 该值越大表示该变量的重要性越大。各指标对水稻产量响应比均有一定的影响, 通过比较各变量的重要性可知, 其中全氮、速效氮、施氮量 3 个因素的重要程度较大, 而其他因素影响较小。

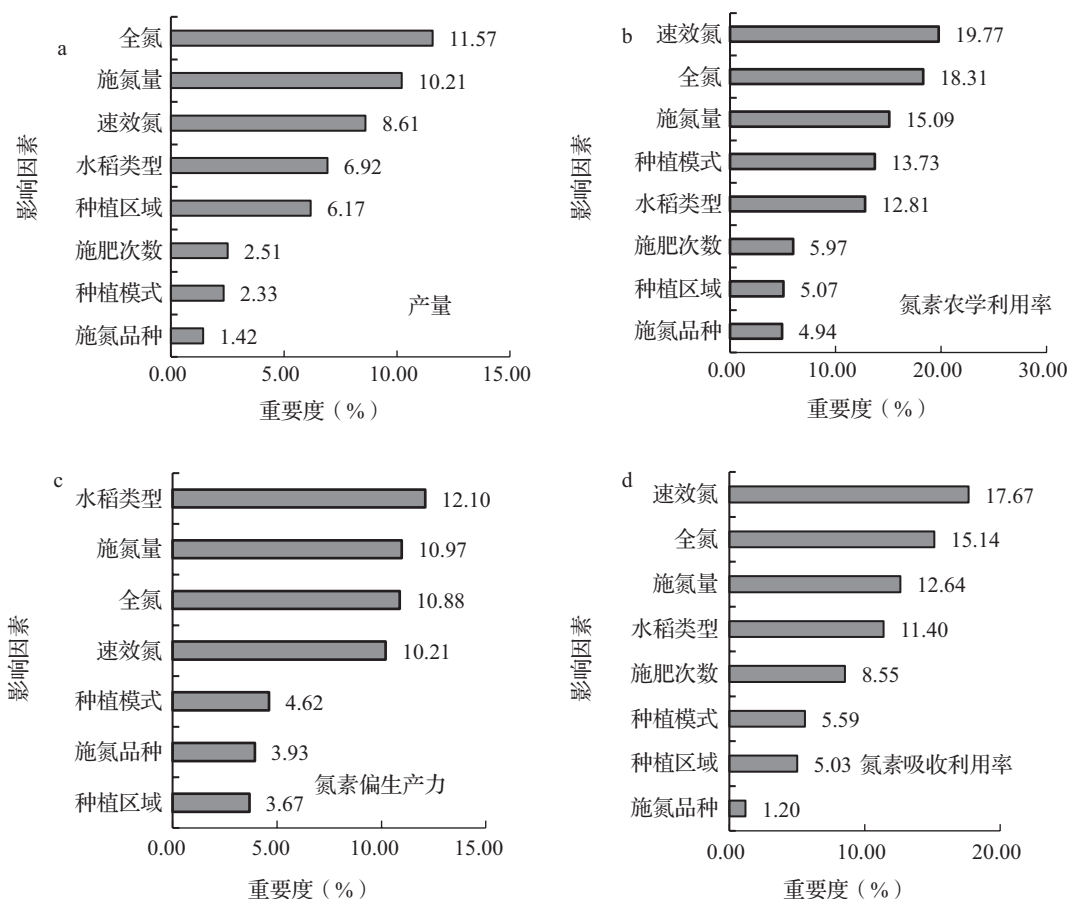


图 5 各因素影响侧深施氮水稻产量及氮利用效率的重要度

3 讨论

3.1 侧深施肥对水稻产量提升的影响

本研究中, 不同水稻种植区域、水稻类型和种植模式下 SDN 对产量增幅不同。朱从桦等^[4]研究表明, SDN 分别对单季稻和双季稻产量提升幅度均显著增加, 这与本研究结果一致; 同时, 本研究还发现单季稻产量提升幅度大于双季稻, 分别为 7.93% 和 2.00%。这与单季稻生育周期长和平均施氮量高有关, 例如华中地区, 单季稻生育期为

120 d 左右, 平均施氮为 $N\ 226\ kg/hm^2$ ^[17], 东北稻区显著优于南方稻区和长江流域稻区, 原因可能是东北稻区多为单季稻种植模式, 南方稻区和长江流域稻区为单双季稻混种模式; 此外南方稻区土壤全氮含量平均值 ($1.68\ g/kg$) 低于东北稻区和长江流域稻区的全氮含量平均值 (1.92 和 $1.95\ g/kg$) (本研究数据)。本研究表明土壤氮含量对水稻产量具有显著影响 (图 3), 在土壤全氮和速效氮低含量下 SDN 对水稻产量提升幅度最大。原因可能是低肥力土壤对氮肥敏感性更强^[18], 低氮情况下, 水

稻结实率和氮素偏生产力较高,与水稻穗数的相关性更大^[19]。这说明南方稻区和长江流域稻区采用SDN仍有较大潜力。此外,本研究发现SDN使粳稻和籼稻分别显著增产6.85%和5.11%,黄恒等^[5]和吴文革等^[20]研究分别认为SDN最高增产2.37%~15.91%和仅达到稳产。杨剑波^[6]研究表明杂交稻(甬优1538和晶两优1468)SDN无显著增产,原因是其研究中杂交稻常规施肥下均产(8667和9639 kg/hm²)较高,SDN增产相对困难。由于多次施用和缓释氮肥一次施用均能满足水稻氮素需求,所以水稻营养器官生长旺盛,还可提高水稻的光合势并极大地促进灌浆^[5],利于氮素积累和转移^[21]。

3.2 侧深施氮对水稻氮利用效率提升的影响

不同水稻类型、种植区域和种植模式下SDN对水稻氮利用效率有不同的影响效果。吴文革等^[20]的研究表明,SDN下籼稻和粳稻均可以提高氮利用效率;祁雪姣等^[22]研究表明,籼稻相比于粳稻可产生大量的一氧化碳,从而促进水稻对氮素的高效利用,但是籼稻平均施氮量小于粳稻和杂交稻(分别是173.49、220.47和203.61 kg/hm²),最终氮素农学利用率和吸收利用效率籼稻更占优。单季稻的氮肥利用效率优于双季稻(图3)的原因是单季稻相比于双季稻的早稻、晚稻,温光资源条件优于早稻和晚稻^[23-24]。由于东北稻区氮利用效率大于长江流域和南方稻区,但氮素农学利用率相比于南方稻区较低,原因是多方面的,史常亮等^[25]总结认为东北地区水稻移栽期温度较低,缓苗慢和水肥用量大是不利因素。

不同土壤氮素含量下SDN对水稻氮利用效率提升的影响不同。鲁艳红等^[26]研究表明,高基础地力土壤对肥料的依赖程度降低,从而氮肥利用效率降低。在低氮条件下,SDN以缓释肥作为基肥,其缓慢释放氮素的特性能进一步减少氮素损失量^[4],缓控释氮部分代替速效型氮时,能有效增加土壤中无机氮持续供应,从而促进土壤微生物繁殖,利于提高水稻氮素吸收和利用效率^[27]。本研究增效型氮肥和SDN结合能显著提高水稻氮利用效率(表4),这与朱从桦等^[4]的研究结果相似,因此SDN采用增效氮肥效果更佳。氮素偏生产力主要反映了水稻从土壤及灌溉水系统中吸收的氮素对稻谷生产的贡献^[28],与氮肥施用量呈负相关,随着氮肥用量的增加而降低^[3]。速效型氮肥品种下SDN追肥更利于提高氮利用效率^[5],因此,SDN

如果采用一次性轻简化施肥需要与增效氮肥结合,SDN采用速效型氮肥则需要追1~2次氮肥确保增产增效。

4 结论

SDN对水稻产量和氮利用效率都有显著的提高,具体结论如下:

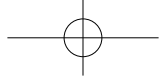
(1) 南方稻区和长江流域采取SDN对产量和氮素利用效率增幅不如东北稻区,需要深入分析限制因素、提高效能。

(2) 含氮量较低的土壤,SDN促进水稻增产增效的作用显著;反之,则增产增效作用不显著。

(3) 施氮量不宜超过150 kg/hm²,增效型氮肥、追施氮肥配合施用利于增产增效。

参考文献:

- [1] Lu S Y, Feng C, Gao C M, et al. Multifunctional environmental smart fertilizer based on L-aspartic acid for sustained nutrient release [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64 (24): 4965-4974.
- [2] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 2014, 514: 486-489.
- [3] 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.
- [4] 朱从桦,张玉屏,向镜,等. 侧深施氮对机插水稻产量形成及氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (23): 4228-4239.
- [5] 黄恒,姜恒鑫,刘光明,等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47 (11): 2232-2249.
- [6] 杨剑波. 侧深施肥下肥料种类及用量对机直播水稻产量和氮肥利用效率的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2020.
- [7] 王晓丹. 施肥模式对机插水稻产量及氮素利用的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
- [8] 包耀贤,徐明岗,吕粉桃,等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (20): 4197-4204.
- [9] Chen Y S, Camps-arbestain M, Shen Q H, et al. The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: a meta-analysis and review [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111 (2/3): 103-125.
- [10] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998: 356.
- [11] Zhang X, Fang Q, Zhang T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (2): 888-900.
- [12] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. Metawin: statistical software for meta-analysis with resampling tests (Version 1) [M]. Sunderland MA: Sinauer Associates Inc., 1997.



- [13] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, 80 (4): 1150-1156.
- [14] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis [J]. Ecology, 2006, 87 (1): 53-63.
- [15] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2014, 20 (5): 1366-1381.
- [16] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45: 5-32.
- [17] Yuan S, Cassman K G, Huang J L, et al. Can ratoon cropping improve resource use efficiencies and profitability of rice in central China [J]. Field Crops Research, 2019, 234: 66-72.
- [18] 艾玉春, 董月, 汪吉东, 等. 水稻产量主要养分限制因子及养分运筹应对技术研究 [J]. 江苏农业学报, 2015, 31 (3): 558-563.
- [19] 孙志广, 王宝祥, 杨波, 等. 施氮量对不同水稻品种氮肥利用率和农艺性状的影响 [J]. 江西农业学报, 2019, 31 (12): 23-28.
- [20] 吴文革, 季雅岚, 许有尊, 等. 新型控释肥机插侧深施对江淮中稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 中国稻米, 2021, 27 (5): 59-63.
- [21] Yang Y C, Zhang M, Li Y C, et al. Controlled-release urea commingled with rice seeds reduced emission of ammonia and nitrous oxide in rice paddy soil [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42 (6): 1661-1673.
- [22] 祁雪姣, 谢乾坤, 谢雨欣, 等. 籼稻品种 Y 两优 886 高氮素利用效率机制研究 [J]. 河南农业科学, 2021, 50 (3): 25-32.
- [23] 郑华斌, 李波, 王慰亲, 等. 不同栽培模式对“早籼晚粳”双季稻光氮利用效率及产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (7): 1565-1578.
- [24] 叶廷红, 李鹏飞, 侯文峰, 等. 早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (2): 212-222.
- [25] 史常亮, 朱俊峰. 我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30 (9): 57-63.
- [26] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响 [J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 597-606.
- [27] 钟雪梅, 吴远帆, 彭建伟, 等. 控释掺混肥机插侧深施实现双季稻增产与增效 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (4): 256-262.
- [28] 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.

Effects of side deep fertilization of nitrogen on rice yield and nitrogen use efficiency in China: a meta-analysis

HU Yang¹, XIAO Da-kang¹, LI Xuan¹, LI Jin-tao¹, HU Ren¹, REN ke-yu², HOU Jun^{1*}, CAO Yu-xian^{3*} (1. College of Agriculture/Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wet land Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081; 3. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025)

Abstract: The effect of side deep fertilization of nitrogen (SDN) on rice yield and nitrogen use efficiency under different conditions was investigated to provide a theoretical basis for precise fertilization of nitrogen for rice. By collecting published literature, this study established a database of rice yield and nitrogen use efficiency under 214 groups of SDN and broadcast of nitrogen (BN). The meta-analysis method was used to study the improvement of SDN on rice yield and nitrogen use efficiency under different rice planting areas, soil physicochemical properties, nitrogen application rates and so on. The random forest analysis was used for the main controlling factors of SDN's impacts. SDN could significantly improve yield, nitrogen partial factor productivity, nitrogen agronomic efficiency and nitrogen recovery efficiency by 4.57%, 4.57%, 23.94% and 21.11%, respectively. For the different planting areas, the yield improvement of SDN was the largest in Northeast rice area. Different rice types had different increase rates in SDN yield and nitrogen use efficiency, ranked as Japonica rice (6.85%) > Indica rice (5.11%), and Hybrid rice had no significant effects on yield increase rate. In terms of the improvement of SDN on nitrogen agronomic efficiency and nitrogen recovery efficiency, it ranked as Indica > Japonica rice > Hybrid rice. Under different crop types, the yield increase rate of SDN was single-season rice (7.39%) > double-season rice (2.00%), and the increase of nitrogen use efficiency was single-season rice > double-season rice. Soil properties total nitrogen <2 g/kg and available nitrogen <150 mg/kg had greatly improved the rice yield. When nitrogen fertilization rate of SDN was ≤150 kg/hm² and top-dressing nitrogen application, both the rice yield and nitrogen use efficiency were greatly improved. The results of random forest analysis showed that the increase of SDN on rice yield was mainly affected by soil total nitrogen, available phosphorus and nitrogen application rate, while nitrogen use efficiency increase rate was mainly affected by available nitrogen, nitrogen application rate and available phosphorus. SDN can significantly improve rice yield and nitrogen use efficiency. And the use of side deep fertilization of nitrogen in Southern rice area and Yangtze River basin did not increase yield and nitrogen use efficiency as well as Northeast rice area. SDN was conducive to increasing the yield and efficiency of rice in soil with low nitrogen content. Nitrogen application rate of SDN should not exceed 150 kg/hm². Enhanced-efficiency nitrogen fertilizers, topdressing nitrogen fertilizer and phosphorus fertilizer combined with SDN are beneficial to increase the sustainability production of rice.

Key words: rice; side deep fertilization; nitrogen; yield; nitrogen use efficiency