

氮磷配施和施肥方式对潮土小麦氮吸收利用的影响

苏同庆^{1, 3}, 邢璐^{2, 3}, 王火焰^{3, 4*}

(1. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁师范大学, 广西 南宁 530001; 2. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沭 276700; 3. 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, 江苏 南京 210008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 通过石灰性潮土上不同氮磷组合(氮均为¹⁵N标记)和施肥方式下的小麦盆栽试验, 探究小麦氮吸收利用情况与氮肥利用效率评价指标。不同氮磷组合为尿素(N1)与硫酸铵(N2)配施磷酸二氢钙(P1)和磷酸氢二铵(P2); 不同施肥方式为全土混施(A), 垂直方向距土壤表层5 cm、水平方向距小麦根系0 cm条施(B), 垂直方向距土壤表层5 cm、水平方向距小麦12 cm条施(C)3种。研究表明:(1) PIN2、P2N1和P2N2组合的B施肥方式的小麦籽粒¹⁵N累积量均显著高于A施肥方式, 以PIN2的B施肥方式最高, 为0.37 g·盆⁻¹, 氮肥在一定土层条施深施显著优于全土混施;(2) PIN2、P2N1和P2N2同一肥料组合的不同施肥方式之间, B施肥方式的¹⁵N示踪法氮肥利用率显著高于A, 高肥力土壤选用¹⁵N示踪法氮肥利用率更为合适。上述结果为潮土小麦种植合理施用氮肥和科学评估氮肥利用效率提供了重要参考。

关键词: 小麦; 氮肥; 施肥方式; 氮肥利用率; 潮土

华北平原是我国主要粮食产区之一, 粮食作物主要是冬小麦-夏玉米, 周年轮作。在作物生长期间, 化学肥料的持续大量施用, 在提高作物产量的同时, 也对生态环境造成了一定压力。肥料施用的主要目的是在可接受的环境效应范围内, 获得较高的目标产量、产品品质和经济效益并维持或提高土壤肥力^[1]。改进施用肥料种类和施肥方式以提高肥料利用率、减轻环境压力是农业发展亟须解决的问题。

作物对不同形态氮肥的喜好不同, 在相同施氮量下, 不同形态氮肥的增产效果和肥料利用率也不相同。有研究显示, 在黄河三角洲玉米大田试验中, 尿素增产效果优于硫酸铵^[2], 在云南三七试

验中, 尿素增产效果优于铵态氮肥^[3], 而在库布齐沙地柳枝稷和四川西部蒙山春茶产量提高方面尿素效果不如铵态氮肥^[4-5]。改进氮肥施用方法, 将氮肥施在作物近根区, 使氮肥养分释放与作物的吸收利用尽可能地匹配^[6], 是减少氮肥损失、提高氮肥利用率的另一有效途径。已有研究表明, 相比表面撒施或撒施后旋耕, 氮肥穴施或条施提高了江西和湖北的油菜产量、氮素吸收量和氮肥利用率^[7]; 在美国密苏里州, 氮肥深施有利于玉米产量和氮肥利用率的提高^[8]; 在华南双季稻区、华中免耕稻田、环太湖单季中稻区和孟加拉国南部地区, 较常规撒施, 氮肥深施显著提高了水稻的氮累积量、水稻产量和氮肥利用率^[9-12]。但是, 对于不同种类氮磷配施和施用方式对潮土小麦氮吸收利用和氮肥利用率的研究仍十分匮乏。

作物吸收的氮, 既可能来源于当季施用的氮肥, 也可能来源于前茬施用的氮肥和土壤氮。肥料中的养分与土壤中的养分库会不可避免地发生替代, 在养分固定能力较强的土壤中这种替代的比例会很高。差减法氮肥利用率不能区分作物吸收的氮素来自当季施用氮肥还是土壤氮, 且其受土壤肥力的影响显著^[13], 因此, 单纯使用差减法氮肥利用率不能真实地反映当季施用的氮肥被作物吸收利用

收稿日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200901); 国家自然科学基金项目(31960238); 广西科技基地和人才专项项目(桂科AD19245103); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2019KY0421); 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(南宁师范大学)和广西地表过程与智能模拟重点实验室(南宁师范大学)系统基金项目(GTEU-KLOP-X1813)。

作者简介: 苏同庆(1982-), 助理研究员, 博士, 主要从事土壤肥力、土壤生态研究。E-mail: tqsu2007@163.com。

通讯作者: 王火焰, E-mail: hywang@issas.ac.cn。

的情况。本研究通过盆栽试验探讨不同种类氮磷配施和施用方式对小麦氮吸收利用的影响,同时用 ^{15}N 标记氮肥,探究当季施用氮肥的差减法氮肥利用率和 ^{15}N 示踪法氮肥利用率,为华北平原冬小麦种植的科学施肥和氮肥利用率的合理评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验选用土壤采自河北省衡水市郊 ($37^{\circ}44'\text{N}$, $115^{\circ}47'\text{E}$)。衡水市地处河北省平原中部,地势平坦,属于大陆季风气候区,四季分明,全年 0°C 以上积温为 4863°C ,年日照时数为 2563h 。盆栽用土为 $0\sim 20\text{cm}$ 耕地表层土壤,类型为潮土,质地为砂质壤土, $\text{pH } 8.29$ (土水比 $1:2.5$),有机质 $18.4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.25\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.64\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $88.20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤风干过 2mm 筛备用。供试的小麦品种为宁麦 13 (*Triticum aestivum* L.),供试氮肥为尿素 (N1) 和硫酸铵 (N2),配施磷肥为磷酸二氢钙 (P1) 和磷酸氢二铵 (P2),其中 N1、N2、P2 中的氮均为 ^{15}N 标记,且均购买自上海化工研究院。

1.2 试验设计与样品采集测定

试验在中国科学院南京土壤研究所温室内进行。选用长方体盆钵 ($35\text{cm}\times 25\text{cm}\times 12\text{cm}$),每盆装土 10kg 。氮肥与磷肥 4 种组合为:①尿素与磷酸二氢钙共施 (P1N1);②硫酸铵与磷酸二氢钙共施 (P1N2);③尿素与磷酸氢二铵共施 (P2N1);④硫酸铵与磷酸氢二铵共施 (P2N2)。氮磷肥以 $\text{N } 0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施肥量分 3 种施肥方式施用:全土混施 (A),垂直方向土下 5cm 、水平方向小麦根侧 0cm (B) 和垂直方向土下 5cm 、水平方向小麦根侧 12cm (C),同时设置不施肥对照处理 (CK),共 13 个处理,每个处理重复 3 次,共计 39 盆。钾肥为氯化钾 ($\text{K}_2\text{O } 0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),中微量元素为阿农营养液 (100 倍, $10\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}$),与全土混匀施用。选取 25 粒均一的催芽后小麦种子平行于施肥条带等株距条播,其他管理与田间一致。

小麦成熟后,分别采集秸秆与籽粒,洗净、烘干、磨碎,用硫酸-混合加速剂-蒸馏法测定全氮含量,用质谱法测定 ^{15}N 含量^[14]。

1.3 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2010 处理、Origin 8.5 作图,

并用 SPSS 20.0 进行统计分析。图中数据为平均值 $\pm$ 标准差,不同字母表示差异显著 (one-way ANOVA, LSD, $P<0.05$)。

相关计算如下:

氮收获指数 = 小麦籽粒吸氮量 / 地上吸氮量

肥料氮收获指数 = 小麦籽粒 ^{15}N 累积量 / 地上 ^{15}N 累积量

差减法氮肥利用率 (%) = (施氮处理地上吸氮量 - 对照处理地上吸氮量) / 施氮量 $\times 100$

^{15}N 示踪法氮肥利用率 (%) = 施氮处理地上 ^{15}N 累积量 / ^{15}N 施用量 $\times 100$

2 结果与分析

2.1 氮磷配施和施肥方式对小麦吸氮量和氮收获指数的影响

氮磷配施和施肥方式对小麦秸秆、籽粒、地上吸氮量和氮收获指数影响不同 (图 1, 表 1)。与不施肥的 CK 相比,不同施肥处理小麦地上吸氮量显著提高,但氮磷配施和施肥方式对其均没有显著影响。所有施肥处理的小麦籽粒吸氮量均显著高于 CK ($0.23\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$),且 P1N2 和 P2N1 的 B 施肥方式效果显著优于 A。其中, P1N2 的 B 施肥方式小麦籽粒吸氮量最高,达到 $0.66\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$,而 P2N1 的 A 施肥方式最低,仅为 $0.39\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。与之不同, P1N1、P2N1 和 P2N2 的 A 施肥方式小麦秸秆吸氮量显著高于 B 和 C,且 B 和 C 之间差异不显著。在 A 施肥方式中, P2N1 的小麦秸秆吸氮量最高 ($0.41\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$),是 CK 处理 ($0.06\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$) 的 6.6 倍。除 P2N1 外, B 和 C 施肥方式的氮收获指数与 CK 没有显著差异,但施肥方式 B 显著高于 A 施肥方式。在 A 施肥方式下,无论是尿素 N1,还是硫酸铵 N2,均是磷酸二氢钙 P1 配施较与磷酸氢二铵 P2 配施氮收获指数高。

2.2 氮磷配施和施肥方式对小麦 ^{15}N 累积量和肥料氮收获指数的影响

氮磷配施和施肥方式对小麦秸秆、籽粒、地上 ^{15}N 累积量和肥料氮收获指数影响各异 (图 2、表 1)。对于小麦秸秆而言, P1N1、P2N1 和 P2N2 组合的 A 施肥方式 ^{15}N 累积量均显著高于 C 施肥方式,其中, P2N1 的 A 施肥方式秸秆 ^{15}N 累积量为 $0.19\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$,是 P1N1 的 B 施肥方式的 190%,表明 A 施肥方式,即全土混施更有利于小麦生长前期对氮肥的吸收利用。对于小麦籽粒而言, P1N2、

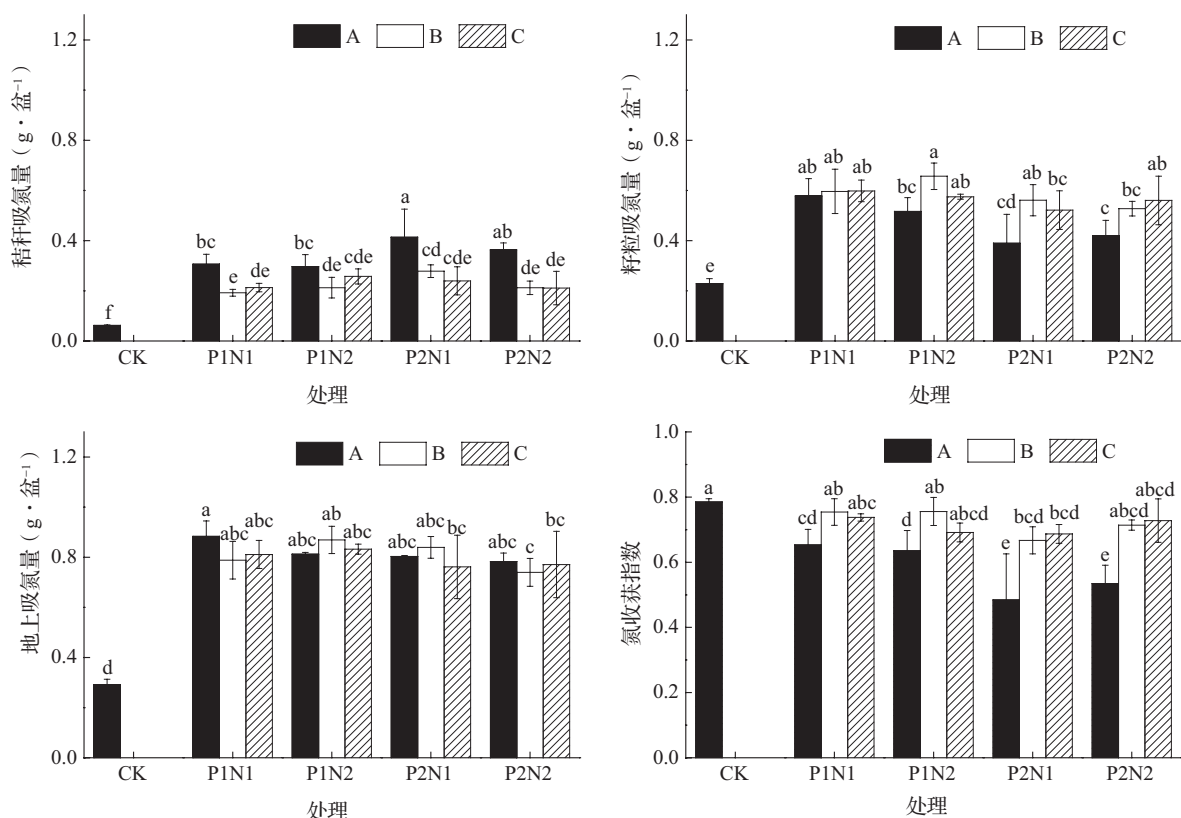


图1 不同氮磷配施和施肥方式下小麦吸氮量和氮收获指数

注: 同一行不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。表1 肥料种类、施肥方式及其相互作用对相关指标 (不含对照) 的影响 (F 值)

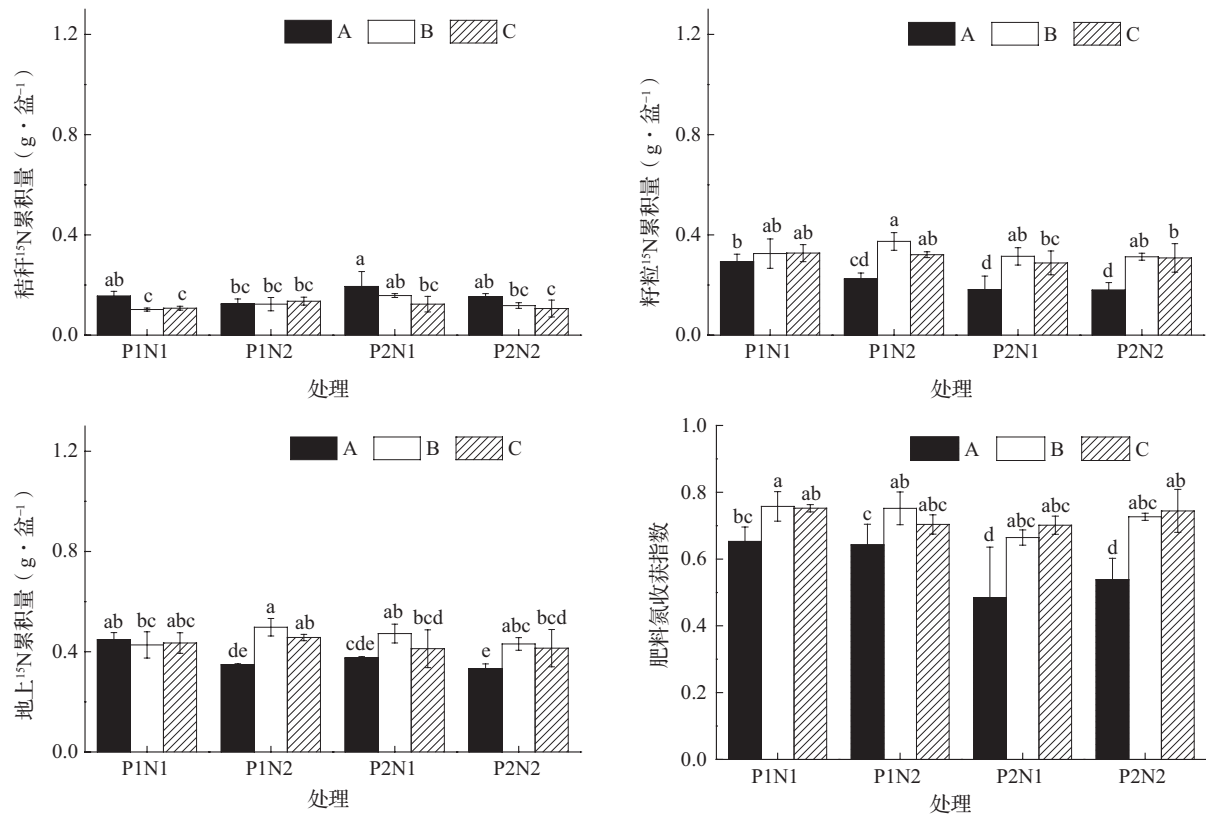
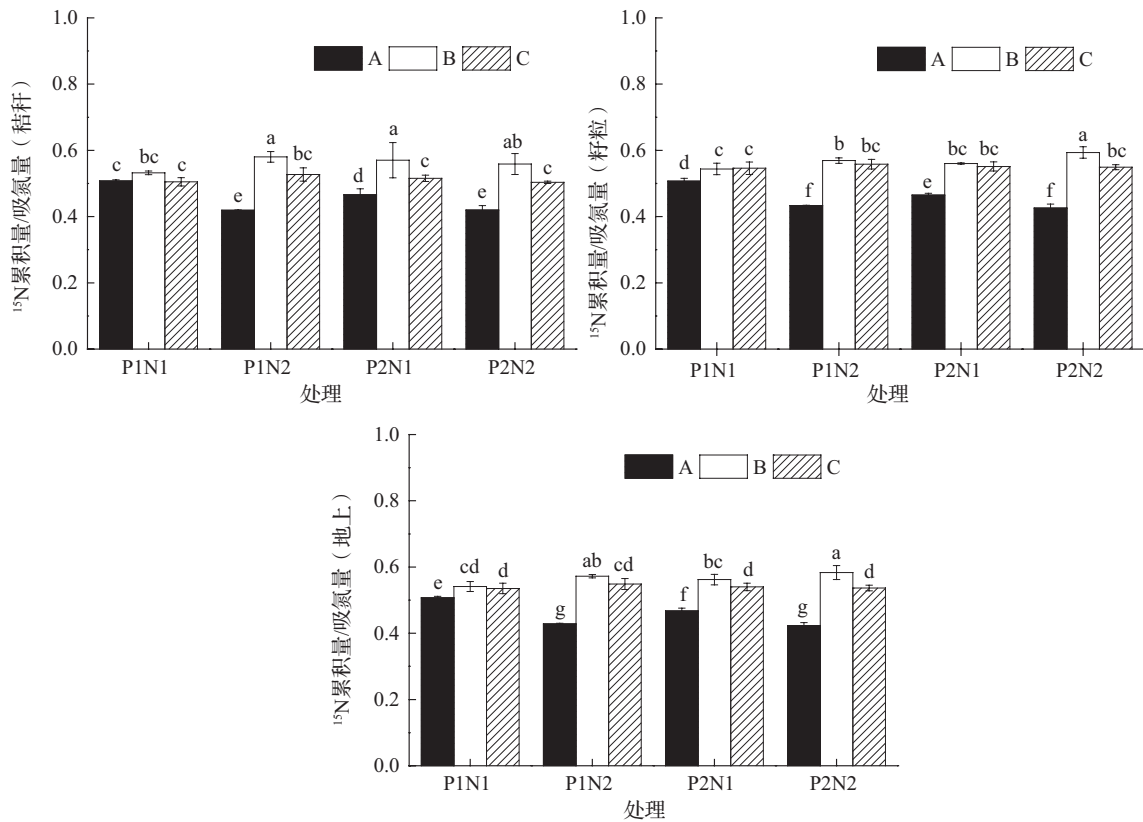
相关指标	肥料种类	施肥方式	肥料种类 × 施肥方式
秸秆吸氮量	3.66*	22.9**	1.20
籽粒吸氮量	5.14**	8.45**	1.07
地上吸氮量	2.08	0.46	1.00
氮收获指数	5.24**	23.10**	1.28
秸秆 ¹⁵ N 累积量	3.98*	7.59**	1.62
籽粒 ¹⁵ N 累积量	4.38*	28.20**	1.68
地上 ¹⁵ N 累积量	2.19	12.10**	2.63*
肥料氮收获指数	5.05**	23.40**	1.29
¹⁵ N 累积量 / 吸氮量 (秸秆)	2.23	78.40**	6.88**
¹⁵ N 累积量 / 吸氮量 (籽粒)	1.68	287.00**	18.00**
¹⁵ N 累积量 / 吸氮量 (地上)	2.20	250.00**	17.10**
差减法氮肥利用率	2.08	0.46	1.00
¹⁵ N 示踪法氮肥利用率	2.19	12.10**	2.63*

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

P2N1 和 P2N2 组合的 B 施肥方式 ¹⁵N 累积量均显著高于 A 施肥方式, 以 P1N2 的 B 施肥方式最高 ($0.37 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$), 表明 B 施肥方式, 即土下 5 cm、小麦根侧 0 cm 施肥更有利于小麦生长后期, 即籽粒形成过程中对氮肥的吸收利用。小麦地上 ¹⁵N 累积量与小麦籽粒呈现类似的规律。对于肥料氮收获指数, 不同肥料组合的 B 施肥方式均显著高于 A 施肥方式, 且在施肥方式 A 下, 无论是尿素 N1, 还是硫酸铵 N2, 均是与磷酸二氢钙 P1 配施较与磷酸氢二铵 P2 配施肥料的氮收获指数高。

2.3 氮磷配施和施肥方式对小麦 ¹⁵N 累积量与吸氮量比例的影响

施肥方式对小麦秸秆、籽粒、地上 ¹⁵N 累积量与吸氮量比例有不同影响 (图 3, 表 1)。对于小麦秸秆, P1N2、P2N1 和 P2N2 肥料组合的 B 施肥方式 ¹⁵N 累积量与吸氮量比例最高, C 施肥方式次之, A 施肥方式最低。且在 A 施肥方式中, 尿素 N1 的比例较硫酸铵 N2 的比例高。对于小麦籽粒, 所有肥料组合的 B 和 C 施肥方式均显著高于 A, 但是仅有 P2N2 的 B 施肥方式显著高于 C, P1N1、P1N2

图2 不同氮磷配施和施肥方式下小麦 ^{15}N 累积量和肥料氮收获指数图3 不同氮磷配施和施肥方式下小麦 ^{15}N 累积量与吸氮量比例

和 P2N1 的 B 和 C 施肥方式差异不显著, 这可能是因为氮肥作为基肥一次性施用, 小麦生长前期, 氮肥充足, 小麦更多利用氮肥, 后期氮肥供应不足, 小麦更多利用土壤氮。小麦地上 ^{15}N 累积量/吸氮量比值趋势与小麦秸秆类似, 在 P1N2、P2N1 和 P2N2 肥料组合下均呈现施肥方式 B>C>A 的规律。

2.4 氮磷配施和施肥方式对小麦氮肥利用率的影响

氮磷配施和施肥方式对小麦差减法氮肥利用率和 ^{15}N 示踪法氮肥利用率影响有显著差异 (图 4,

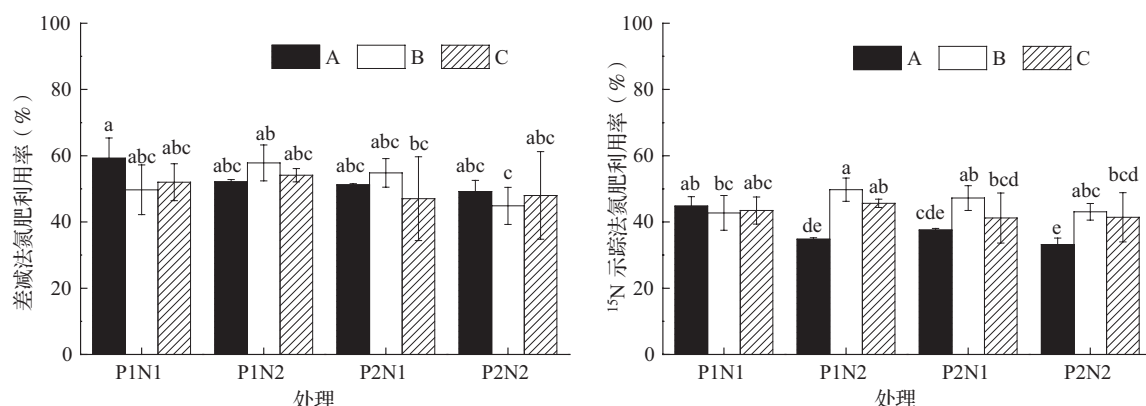


图 4 不同氮磷配施和施肥方式下小麦差减法氮肥利用率和 ^{15}N 示踪法氮肥利用率

3 讨论

氮肥和配施磷肥种类显著影响了小麦对氮肥的吸收利用。同一施肥方式下的不同氮肥对秸秆 ^{15}N 累积量没有显著影响, 其原因是在小麦早期营养生长阶段, 土壤中可利用氮素和氮肥总量充足, 均能满足小麦生长所需, 但磷酸氢二铵配施较磷酸二氢钙配施显著促进了小麦秸秆对尿素态氮肥的吸收 (图 2, 小麦秸秆 P2N1-B>P1N1-B)。对于小麦籽粒 ^{15}N 累积量, 尿素态氮肥处理含量显著高于硫酸铵氮肥处理 (图 2, 小麦籽粒 P1N1-A>P1N2-A), 且磷酸二氢钙较磷酸氢二铵显著促进了小麦籽粒对尿素态氮肥的吸收 (图 2, 小麦籽粒 P1N1-A>P2N1-A), 这可能与不同形态氮肥对植物收获器官的促进作用不同有关。研究显示, 尿素对于大田试验中玉米、小麦的增产效果优于铵态氮肥^[2, 15], 而尿素在槟榔幼苗植株全氮含量提高方面^[16]与在柳枝稷、蒙山春茶和甘薯产量提高方面的效果相比, 不如铵态氮肥^[4-5, 17], 即铵态氮肥在促进营养生长方面更优, 尿素则在促进籽粒形成方面更佳, 这与本试验尿素处理小麦籽粒 ^{15}N 累积量显著高于

表 1)。对于小麦差减法氮肥利用率, 同一肥料组合的不同施肥方式之间没有显著差异, 同一施肥方式的不同肥料组合之间, 除了 P1N2 的 B 施肥方式显著高于 P2N2 的 B 施肥方式外, 其他均差异不显著。对于 ^{15}N 示踪法氮肥利用率, P1N2、P2N1 和 P2N2 不同肥料组合的同一施肥方式之间没有显著差异, 同一肥料组合的不同施肥方式之间, B 施肥方式显著高于 A 施肥方式, 表明与全土混施相比, 土下 5 cm、小麦根侧 0 cm 氮肥条施的 ^{15}N 示踪法氮肥利用率更高。

硫酸铵处理的结果一致。

氮肥的施用方式显著影响了小麦对氮肥的吸收利用。营养生长阶段, 全土混施处理小麦吸收更多甚至过多的氮形成营养器官, 即秸秆; 生殖生长阶段, 小麦不能获取足量的氮形成籽粒, 因此小麦肥料氮收获指数较低。土下 5 cm、根侧 0 cm 条施, 在一定程度上起到了缓释作用, 避免了小麦秸秆形成时期氮肥的奢侈吸收, 保证更多的氮肥用于籽粒形成, 故小麦肥料氮收获指数较高。从肥料氮收获指数和 ^{15}N 示踪法氮肥利用率总体来看, 该试验中肥料全土混施处理当季利用效率最低, 土下 5 cm、根侧 0 cm 条施处理最高, 且显著高于全土混施处理。前人研究表明, 氮肥穴施、条施深施均较常规表面撒施提高了氮素吸收、氮累积量和氮肥利用率^[7-12]。在江苏, 穗肥氮肥减量 10% 的同时基肥侧位深施相较撒施能够保证水稻产量不减少, 同时提高水稻氮素吸收利用的效率和氮素吸收利用率^[18]; 在施肥次数和施肥量均相同的情况下, 基肥侧深施用较常规撒施显著提高了水稻产量^[19-20]。在黑龙江, 侧深施肥和点深施肥的寒地水稻产量和氮肥利用率均较全层施肥更高^[21]。因此, 氮肥穴

施、条施深施既能提高氮肥利用率,又能减少氨挥发对大气环境的压力^[22],是合理施用氮肥的一条有效途径。

差减法氮肥利用率^[23-24]和¹⁵N示踪法氮肥利用率^[25-26]是评估氮肥利用效率的常用指标。本试验中,¹⁵N示踪法氮肥利用率较差减法氮肥利用率低,且在差减法氮肥利用率中没有显著差异的处理在¹⁵N示踪法氮肥利用率中表现出了显著的差异。之前的研究表明,¹⁵N示踪法氮肥利用率比差减法氮肥利用率低,是由于差减法氮肥利用率包括了作物因施氮肥而多吸收的土壤氮^[27]。肥料施入土壤后,肥料中的养分与土壤中的养分不可避免地发生替代,土壤对肥料养分的这种固定和替代能力正是土壤保肥能力的关键所在^[13]。有¹⁵N示踪研究证实,一次性施用的标记氮肥在土壤中的残留氮在今后不断被作物吸收利用或损失掉的过程将持续数十年^[28]。土壤肥力越高,差减法氮肥利用率与¹⁵N示踪法氮肥利用率相差越大,反之亦然。因此,在选择使用差减法氮肥利用率或¹⁵N示踪法氮肥利用率时,应该具体情况具体对待:如果土壤肥力较低,选用两种指标差别不大;如果土壤肥力较高,在评价氮肥效果时,应该使用更能反映施用氮肥后作物氮素营养的实际提高程度的差减法氮肥利用率;在研究氮肥的转化和去向时,应该使用更能反映化肥氮的利用、残留及损失的¹⁵N示踪法氮肥利用率^[27]。

本研究为一季冬小麦的盆栽试验,结果存在一定的偶然性,因此,后续将开展相应的微区试验和大田试验,进一步探讨不同种类氮磷配施和施用方式对小麦氮吸收利用的影响,以期得到更为准确的结果用来指导小麦生产实践。

4 结论

在潮土小麦施肥措施中,氮肥在一定土层深度集中施用不仅可以提高氮肥利用率,还可以减少其以氨挥发方式向大气的流失。本研究中,¹⁵N示踪法氮肥利用率能更好地反映小麦对当季施用化肥氮的吸收利用情况。

参考文献:

- [1] 巨晓棠,张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13.
- [2] 苗琪,于宝超,孙福来,等. 氮肥种类和用量对黄河三角洲玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 717-726.
- [3] 孙玉琴,陈中坚,韦美丽,等. 不同氮肥种类对三七产量和品质影响的初步研究[J]. 中国土壤与肥料, 2008(4): 22-25.
- [4] 陶梦,王铁梅,苏德荣,等. 氮肥对库布齐沙地柳枝稷目标产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(7): 87-95.
- [5] 张锡洲,王永东,李廷轩,等. 氮肥种类和用量对川西眉山春茶产量和品质的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 138-141.
- [6] 王火焰,周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. 土壤, 2013, 45(5): 785-790.
- [7] 刘波,鲁剑巍,李小坤,等. 不同栽培模式及施氮方式对油菜产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3551-3560.
- [8] Steusloff T W, Nelson K A, Motavalli P P, et al. Fertilizer placement affects corn and nitrogen use efficiency in a claypan soil[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(5): 2512-2522.
- [9] Pan S G, Wen X C, Wang Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 139-149.
- [10] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80-90.
- [11] 刘晓伟,王火焰,朱德进,等. 氮肥施用方式对水稻产量以及氮、磷、钾养分吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(2): 203-210.
- [12] Mazid M M A, Gaihre Y K, Hunter G, et al. Fertilizer deep placement increases rice production: evidence from farmers' fields in southern Bangladesh[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(2): 1-8.
- [13] 王火焰,周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 216-225.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 代新俊,杨珍平,陆梅,等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 710-720.
- [16] 王成,李昌珍,廖钰,等. 氮肥形态对槟榔幼苗全氮含量、土壤有效氮和酶活性的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(19): 6564-6573.
- [17] 安霞,董月,吴建燕,等. 氮肥形态对甘薯产量和养分吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1049-1054.
- [18] 刘红江,张辉,盛婧,等. 基肥侧位深施条件下穗肥减量对水稻氮素利用率的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1366-1374.
- [19] 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.

- [20] 周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (11): 2683–2691.
- [21] 李红宇, 李逸, 赵海成, 等. 点深施肥对寒地水稻产量品质及氮肥利用率的影响 [J]. 华北农学报, 2021, 36 (1): 159–168.
- [22] 刘学军, 沙志鹏, 宋宇, 等. 我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议 [J]. 环境科学研究, 2021, 34 (1): 149–157.
- [23] 赵营, 刘晓彤, 罗健航, 等. 缓/控释肥条施对春玉米产量、吸氮量与氮平衡的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 34–39.
- [24] 冯小杰, 战秀梅, 王雪鑫, 等. 包膜尿素不同配比减施对土壤无机氮含量及玉米氮素吸收的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (10): 1733–1745.
- [25] 钟珍梅, 黄勤楼, 陈钟钿, 等. 基于 ^{15}N 示踪的“稻/草-食用菌-菜”循环系统氮肥利用率评价 [J]. 农业工程学报, 2020, 36 (21): 253–259.
- [26] 杜思婕, 张艺磊, 张志勇, 等. 冬小麦—夏玉米轮作体系不同新型尿素的氮素利用率及去向 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (1): 24–34.
- [27] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考 [J]. 生态环境, 2003 (2): 192–197.
- [28] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110 (45): 18185–18189.

The effects of nitrogen combined with phosphorus and application methods on nitrogen uptake and utilization of wheat in fluvo-aquic soil

SU Tong-qing^{1, 3}, XING Lu^{2, 3}, WANG Huo-yan^{3, 4*} (1. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning Guangxi 530001; 2. Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linshu Shandong 276700; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210008; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Through the wheat potting experiment under different nitrogen (^{15}N) combined with phosphorus and application methods in calcareous fluvo-aquic soil, the nitrogen uptake and utilization of wheat and index of nitrogen fertilizer use efficiency were investigated. The mixed application was urea (N1) and ammonium sulfate (N2) combined with calcium dihydrogen phosphate (P1) and diammonium hydrogen phosphate (P2). The three different fertilizer methods included: in the entire soil pot (A); strip application with a vertical distance of 5 cm from the soil surface and a horizontal distance of 0 cm from the root system of wheat (B); and strip application with a vertical distance of 5 cm from the soil surface and a horizontal distance of 12 cm from the root system of wheat (C). The results showed that (1) The ^{15}N of wheat grain derived from application method B was significantly higher than A with P1N1, P2N1 and P2N2 fertilizer combination, which was the highest with a value of $0.37 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ for the application method B of P1N2. The strip application of nitrogen fertilizer at a certain soil depth was better than the mixed application in the whole soil pot. (2) The nitrogen fertilizer use efficiency with ^{15}N trace method of application method B was significantly higher than A under P1N2, P2N1 and P2N2 with the same fertilizer combination and different application methods. It was better to choose nitrogen fertilizer use efficiency with ^{15}N trace method in soil with high soil fertility. These results provided an important reference for reasonably applying nitrogen fertilizer and scientifically evaluating nitrogen fertilizer use efficiency of wheat in fluvo-aquic soil.

Key words: wheat; nitrogen fertilizer; application methods; nitrogen fertilizer use efficiency; fluvo-aquic soil