

氮肥对水稻吸收累积汞及其分配的影响研究^①

周红韵¹, 徐晓航², 杨晨东¹,
韩佳良¹, 许志东², 钱晓莉¹, 仇广乐²

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550003;

2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

摘要: 选择万山汞矿区汞污染土壤为研究对象, 采用露天盆栽试验, 设置 5 种处理组: 全尿素肥按生长期 3 次添加常规施肥对照(CK)、尿素作基肥 1 次性添加(CN1)、尿素+硝酸钙+硫酸铵作分蘖肥 1 次性添加(NN2)、尿素+硝酸钙+硫酸铵作穗粒肥 1 次性添加(NN3)和尿素+硝酸钙+硫酸铵照生长期 3 次添加(CNN3), 探究不同氮肥种类和施用方式对水稻不同部位中汞的质量及生物量的影响。结果表明, 在相同施肥量条件下, 5 种氮肥处理的水稻生物量无显著变化, 但处理组 NN2, NN3 和 CNN3 可使水稻结实率增加, 其中 CNN3 组最高可增加 9.0%。与 CK 组相比, 其他氮肥处理均能降低水稻对汞的吸收累积, 但对水稻各部位的降低效果不同, 其中 NN3 处理下稻米中汞降低最大, 达 49%, CNN3 处理下水稻叶中汞降低最大, 达 39%。本试验研究结果显示, NN3 处理对稻米中汞的吸收累积抑制效果最好, 可考虑作为汞污染土壤的农艺调控措施。

关键词: 氮肥; 水稻; 总汞; 影响

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)03-0029-08

汞(Hg)是一种有毒有害的重金属元素, 已被我国和联合国规划署、世界卫生组织、欧盟及美国环境保护署等机构列为优先控制污染物^[1]。中国土壤汞污染十分严重, 土壤中汞的质量呈逐年增高趋势, 而人为活动如矿山的开采、化学品的生产以及有机汞农药的大量施用等, 是导致土壤汞的质量剧增的主要原因^[2]。贵州省汞矿资源丰富, 位于铜仁市的万山汞矿誉有“中国汞都”之称, 自秦朝开始至 2004 年政策性关闭以来, 矿山开采与冶炼活动过程产生大量的废水、废渣及废气, 已经对农田生态系统造成严重的破坏^[3-4], 而水稻田作为汞矿区居民主要的耕作方式, 稻田土壤汞污染十分严重, 食用稻米已成汞矿区居民甲基汞暴露的主要途径^[5-8]。因此, 积极探索稻田土壤汞污染的调控方法, 减少稻田土壤汞向稻米中累积, 为矿区居民通过食用大米产生的暴露风险提供技术方法, 具有重要的现实意义。

氮肥是农业生产中必不可少的肥料, 始终与农业土壤-植物系统相伴。合理确定施氮量, 可以提高水稻的产量和品质。氮肥进入土壤后会与土壤发生反应或产生自身形态转化, 并在施肥点及其施肥半径内影响土壤理化性质^[9]。同时, 氮素是影响水稻生产的一个重要因素, 其影响程度仅次于水^[10-11]。研究表明, 植物吸收土壤中的重金属受到土壤中各种离子的影响, 如低施氮水平有利于降低稻米中的 As, Cd 的质量^[12-13]; 氮肥的不同形态对土壤中 Zn, Cu 和 Cd 的溶出均有促进作用^[14]; 尿素和铵态氮肥能够增加土壤中水溶及盐溶态 Cu, Cd 的质量^[15]。但是, 大部分研究均针对 As, Cd, Zn 等重金属元素, 对矿区土壤的肥料施用对水稻吸收累积 Hg 的研究鲜有报导。本研究选取万山坭溪土法汞冶炼区作为试验地点, 采用万山五

① 收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41573135); 贵州省生态学一流学科建设项目(GNYL[2017]007)。

作者简介: 周红韵(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境科学与资源利用研究。

通信作者: 钱晓莉, 副教授, 硕士研究生导师。

坑汞污染严重的土壤作为试验材料,以水稻为研究对象开展盆栽试验,探讨不同氮肥品种和施用方式对水稻各部位吸收 Hg 的影响,以期为 Hg 污染农田区域的合理施肥提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 氮肥购置

供试氮肥为尿素、硫酸铵氮肥和硝酸钙氮肥,3 种氮肥中总氮的比例分别为 46%,21%,11%. 尿素购买于贵阳农业科学研究院肥料供销社,硫酸铵氮肥购买于历下昌磊化工经营部,硝酸钙氮肥购买于李想农资.

1.1.2 供试土壤

供试土壤来自万山汞矿区五坑(WK)受大规模炼汞影响后 Hg 污染严重的农田土. 采集 0~20 cm 的表层土壤,剔除土样中沙石和动植物残体后,平铺于塑料薄膜上于野外阴凉干燥处自然风干 3~4 d,压碎后过筛(10 目)分别装入直径 50 cm,高 80 cm 的硬质塑料桶中,每桶 50 kg. 供试土壤的理化性质如表 1 所示.

表 1 供试土壤的理化性质及汞质量分数

土壤	有机质	pH 值	Eh/mv	EC/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	汞的质量分数/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	0.80±0.12a	7.59±0.07a	129.9±4.24a	146.3±1.85b	111.6±6.24a
CN1	1.21±0.30a	7.64±0.03a	128.4±11.69a	195.5±3.12a	112.3±11.7a
NN2	1.26±0.20a	7.52±0.15a	125.6±7.87a	207.6±28.03a	110.4±2.8a
NN3	1.16±0.44a	7.56±0.06a	125.1±10.86a	142.3±5.34b	111.3±3.8a
CNN3	0.81±0.15a	7.60±0.06a	117.0±8.39a	208.5±27.31a	104.6±2.4a

注:同一数据后不同字母表示不同处理间 5%水平差异有统计学意义.

1.1.3 供试水稻

供试水稻材料名称为两优 302(*Oryzasativa* L.),该品种属中熟偏迟粳型早稻,感温性较强;具有高感稻瘟病,中感白叶枯病的特征. 本试验于 2017 年 4 月 25 日播种,6 月 3 日移栽,9 月 12 日收获,全生育期 146 d.

1.2 试验设计

本试验共设 5 个处理,每个处理设 4 个平行. 处理包括:全尿素肥按生长期分 3 次添加常规施肥对照(CK)、尿素作基肥 1 次性添加(CN1)、尿素+硝酸钙+硫酸铵作分蘖肥 1 次性添加(NN2)、尿素+硝酸钙+硫酸铵作穗粒肥 1 次性添加(NN3)、尿素+硝酸钙+硫酸铵按生长期分 3 次添加(CNN3). 尿素在 CK, CN1 处理中占比为 100%,在 NN2,NN3,CNN3 处理中占 60%,硫酸铵氮肥和硝酸钙氮肥在处理中均为 20%. 土壤平衡 15 d 后加水,使土壤保持在淹水状态. 采集长势相同苗龄(一个月左右)的水稻秧苗,移栽于塑料桶中,每桶 4 株水稻苗,随机排列,整个水稻的生长发育期按照大田模式管理. 按研究表明的水稻最适施肥量为基准,根据万山土壤肥力及当地农户常用施肥情况对氮肥添加量酌情调节,使用(202.5 kg/hm² N)为本试验最适施肥量来进行试验设置^[16-17]. 氮肥添加量如表 2 所示.

表 2 供试氮肥的添加量

处 理	氮肥添加量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			磷酸二氢钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	尿素	硫酸铵氮肥	硝酸钙氮肥	
CK	285	—	—	34
CN1	285	—	—	34
NN2	171	57	57	34
NN3	171	57	57	34
CNN3	171	57	57	34

注:CK 施肥方式为全尿素作 60%基肥+20%分蘖肥(营养生长期)+20%穗粒肥(生殖生长期)来进行添加;CN1 施肥方式为全尿素作 100%基肥来进行添加;NN2 施肥方式为 60%尿素+20%硫酸铵氮肥+20%硝酸钙氮肥作 100%分蘖肥(营养生长期)来进行添加;NN3 施肥方式为 60%尿素+20%硫酸铵氮肥+20%硝酸钙氮肥作 100%穗粒肥(生殖生长期)来进行添加;CNN3 施肥方式为 60%尿素+20%硫酸铵氮肥+20%硝酸钙氮肥作 60%基肥+20%分蘖肥(营养生长期)+20%穗粒肥(生殖生长期)来进行添加.

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品的采集与前处理

于成熟期(约 150 d)采集水稻植株样品, 用陶瓷剪刀先采集穗, 然后将植株连根拔起, 现场用自来水冲洗植株直至根和地上部完全无泥土和附着物, 带回实验室后, 将植株按根、茎、叶、壳、米部位分开, 用去离子水反复冲洗干净后放入冰箱(4 ℃)低温冷藏保存, 然后置于冷冻干燥机(FDU-1110)中-40 ℃以下干燥, 取出后称取各部位生物量干质量.

植株样品冷干称质量后采用植物样品粉碎机(AQ-180E)磨碎过 100 目筛, 果实采用小型水稻脱壳机(JLGJ-45 型)分离为壳和米, 再采用植物样品粉碎机(AQ-180E)磨碎过 100 目筛. 用于测定各部位 THg 的质量; 同时采集土壤样品, 风干后过 200 目筛, 用于测定土壤的理化性质. 为避免交叉污染, 每个样品间均用去离子水及无水乙醇清洗用具.

1.3.2 样品的测定

植物样品总汞(THg)的测定: 称取 0.1~0.2 g(精确到 0.000 1 g)样品于 50 mL 离心分离管中; 加 5 mL HNO₃/HSO₄(4/1)于样品中, 摇匀; 管盖拧松放入水浴锅中加热 3 h(95 ℃); 离心管中加入少许超纯水(DDW)和 0.5 mL BrCl₂, 然后用 DDW 定容接近 25ml 刻度线, 加盖, 放置 24 h 以上, 加入 400 μL NH₂OH·HCl, 用超纯水定容至 25 mL, 摇匀; 澄清后取上清液<7 mL 于气泡瓶中, 再加入 200~400 μL SnCl₂ 于气泡瓶中, 使用 F732-V 冷原子吸收测汞仪进行测定^[18].

土壤总汞(THg)测定: 采用王水消解, BrCl 氧化和 NH₂OH·HCl 还原多余的 BrCl, 再经 SnCl₂ 还原后用 F732-V 冷原子吸收测汞仪进行测定.

土壤 pH 值采用(土: 水=1: 2.5)pH 值计测定(NY-T 1377-2007); Eh, EC 也分别使用 PHS-510 氧化还原电位测量仪、DDS-11A 电导率仪测定其数值; 有机质采用重铬酸钾外加热法进行测定.

1.4 数据处理

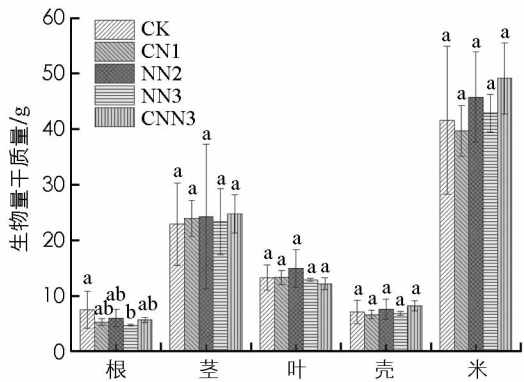
所有数据输入 Excel 2016 作预处理, 然后利用 SPSS 17.0 和 Origin9.0 进行数据统计和分析.

2 结果与分析

2.1 水稻生物量的影响

不同氮肥处理对水稻生物量的影响如图 1 所示. 在不同氮肥处理下, 其生物量干质量在 91.7~163.4 g 之间, 各处理生物量干质量范围分别是 CK: 124.49±34.82 g, CN1: 100.73±17.98 g, NN2: 127.95±26.88 g, NN3: 115.55±7.60 g 和 CNN3: 129.32±14.06 g. 各处理生物量干质量水平略有差异, 总体表现为 CNN3>NN2>CK>NN3>CN1, 但较对照 CK 组差异无统计学意义(图 1). 对于水稻果实和地上部分, 氮肥不同处理间差异无统计学意义. 对水稻根部而言, CK 处理的干质量显著高于 NN3 处理, 而其他处理间差异无统计学意义, 与其他水稻部位差异性趋势不同, 可能是水稻在收割过程中部分根被损耗而造成的.

由上可见, 氮肥添加的时期及氮肥种类对水稻植株生物量的增加无显著影响. 虽然各处理生物总量无明显变化, 但 3 种氮肥混合添加的处理组水稻的结实率略有升高, 根据水稻果实的干质量, NN2, NN3, CNN3 处理的水稻增产率分别为 3%, 2%和 9%.



同一水稻部位不同字母表示不同处理间 5%水平差异有统计学意义. CK, CN1, NN2, NN3, CNN3 分别表示对照尿素按生长期分 3 次添加、尿素作基肥 1 次性添加、尿素+硝酸钙+硫酸铵作分蘖肥 1 次性添加、尿素+硝酸钙+硫酸铵作穗粒肥 1 次性添加、尿素+硝酸钙+硫酸铵按生长期分 3 次添加

图 1 不同氮肥处理下水稻各部位干质量

2.2 水稻不同部位中 Hg 质量分数的变化

2.2.1 稻 米

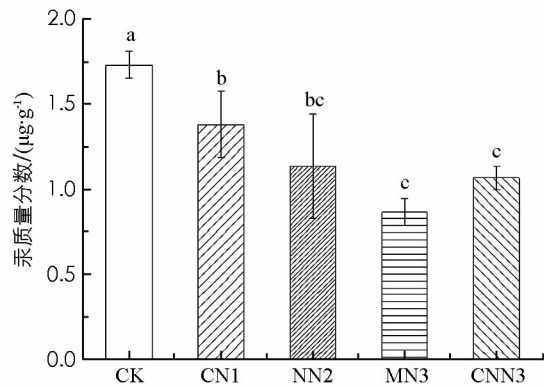
各施肥处理下稻米中 Hg 质量分数变化如图 2 所示. 在不同氮肥处理稻米的生物量无显著变化的情况下, 稻米中汞的质量分数差异有统计学意义, 总体变化范围为 0.78~1.83 $\mu\text{g/g}$. 其中最高是常规施肥 CK 组, 其平均质量分数高达 $1.14 \pm 0.08 \mu\text{g/g}$; 最低处理为 NN3 组, 平均质量分数为 $0.87 \pm 0.08 \mu\text{g/g}$. 数据结果表明, 与 CK 处理相比, 3 种氮肥混合在穗粒期添加的 NN3 处理显著降低了稻米中 Hg 的质量. 不同施肥处理之间汞的质量分数水平表现为 $\text{NN3} < \text{CNN3} < \text{NN2} < \text{CN1} < \text{CK}$, 说明 4 种施肥处理均能显著降低稻米中汞的质量和吸收量, 其中以 NN3 处理降低效果最为明显.

可见, 稻米汞的吸收累积与氮的不同形态间存在着关联, 硝态氮和铵态氮的添加能够明显抑制稻米中汞的吸收累积. 同时, CN1 处理显著低于 CK 处理, 说明尿素作基肥施用比正常分次施肥, 也有明显抑制稻米对汞吸收累积的作用.

2.2.2 根、茎、叶、壳

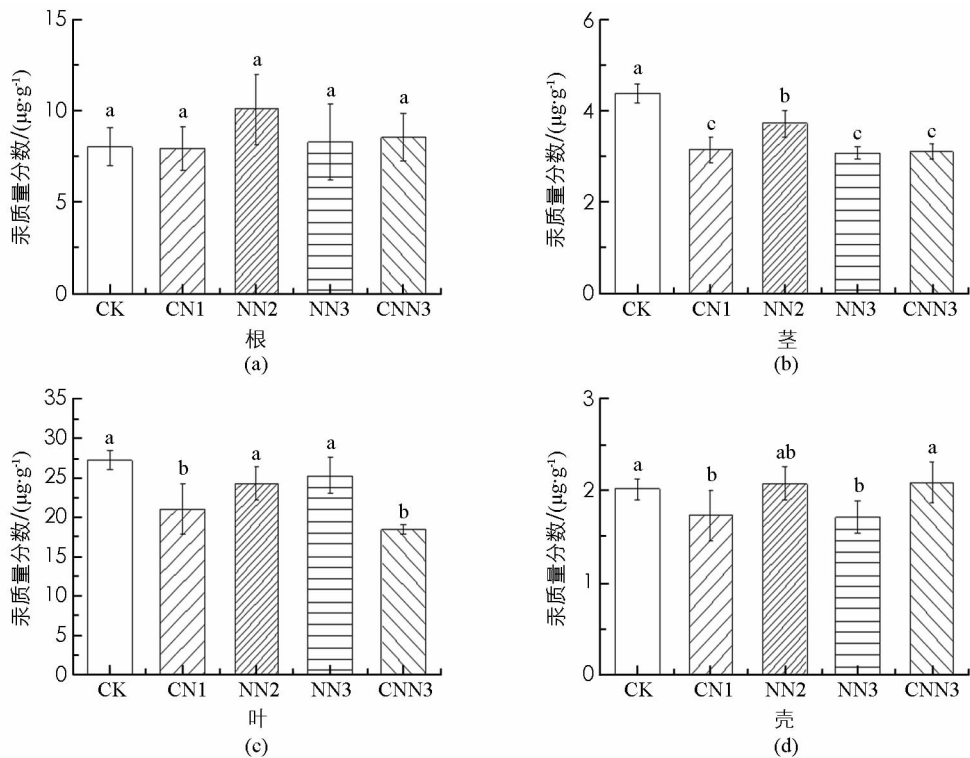
根中 Hg 质量分数变化如图 3a 所示, 5 个不同处理间差异无统计学意义. 处理 CK, CN1, NN2, NN3, CNN3 的汞质量分数分别为 (8.01 ± 1.04) , (7.92 ± 1.22) , (10.07 ± 1.93) , (10.13 ± 4.05) , $(8.52 \pm 1.32) \mu\text{g/g}$.

茎中 Hg 质量分数变化如图 3b 所示, 在不同氮肥处理下, 水稻茎中汞质量分数在 2.81~4.59 $\mu\text{g/g}$ 之间, 最高处理为 CK 组, 平均高达 $4.37 \pm 0.20 \mu\text{g/g}$; 最低处理为 NN3 组, 平均为 $3.08 \pm 0.13 \mu\text{g/g}$. 汞质量分数表现为 $\text{CK} > \text{NN2} > (\text{CN1}, \text{NN3}, \text{CNN3})$.



不同的字母表示差异在 5% 水平有统计学意义

图 2 不同氮肥处理下稻米中汞的质量分数



同一水稻部位不同字母表示差异在 5% 水平有统计学意义

图 3 不同氮肥处理下水稻根、茎、叶、壳中汞的质量分数

叶中 Hg 质量分数变化如图 3c 所示, 在不同氮肥处理下, 水稻叶中汞质量分数在 $17.47 \sim 28.54 \mu\text{g/g}$ 之间, 最高的处理为 CK 组, 其质量分数高达 $27.16 \pm 1.18 \mu\text{g/g}$, 最低处理为 CNN3 组, 平均为 $18.38 \pm 0.62 \mu\text{g/g}$. 汞质量分数表现为 $(\text{CK}, \text{NN2}, \text{NN3}) > (\text{CN1}, \text{CNN3})$.

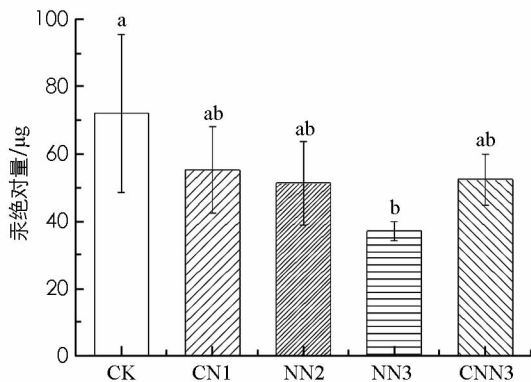
壳中 Hg 质量分数变化如图 3d 所示, 在不同氮肥处理下, 稻壳中汞质量分数在 $1.45 \sim 2.31 \mu\text{g/g}$ 之间, CNN3 为最高处理, 平均为 $2.09 \pm 0.22 \mu\text{g/g}$, NN3 为最低处理, 平均为 $1.71 \pm 0.17 \mu\text{g/g}$. 与常规施肥的 CK 处理相比, NN2 和 CNN3 处理的汞质量分数与 CK 处理差异无统计学意义, 而 CN1 和 NN3 处理其汞质量分数显著低于 CK 处理.

综上所述, 不同氮肥处理, 对水稻根汞的吸收累积无显著影响, CN1, NN3, CNN3 对茎汞的抑制效果最强, CN1 和 CNN3 处理能显著降低水稻叶对汞的吸收累积, 而 CN1 和 NN3 处理能显著降低稻壳对汞的吸收累积. 在 4 个处理组中, CN1 处理对降低水稻茎、叶、壳汞的吸收累积影响均有统计学意义 ($p < 0.05$).

2.3 水稻不同部位中 Hg 绝对含量变化

2.3.1 稻 米

如图 4 所示, 在不同氮肥处理下, 稻米中汞的绝对量在 $33.21 \sim 99.56 \mu\text{g}$ 之间, 最高为 CK 组, 平均绝对量为 $72.25 \pm 23.43 \mu\text{g}$, 最低处理为 NN3, 平均绝对量为 $37.13 \pm 2.73 \mu\text{g}$, 稻米中汞质量降低了 49%, 表明与 CK 处理相比, 3 种氮肥混合在穗粒期添加的 NN3 处理显著降低了稻米中 Hg 的吸收量. 而 CN1, NN2, CNN3 处理的汞的绝对量均低于 CK 处理的汞的绝对量, 但相互间差异并无统计学意义, 说明 CN1, NN2, CNN3 处理均能降低水稻中汞的吸收累积, 但在 4 个处理组中, NN3 处理组降低效果最为显著.



不同的字母表示差异在 5% 水平有统计学意义

图 4 不同氮肥处理下稻米中汞的绝对量

由此可见, 4 种处理均能降低稻米中汞的吸收累积, 其中 NN3 处理的效果最为显著, 从食品安全健康方面考虑, NN3 处理为农户应选择的最优处理.

2.3.2 根、茎、叶、壳

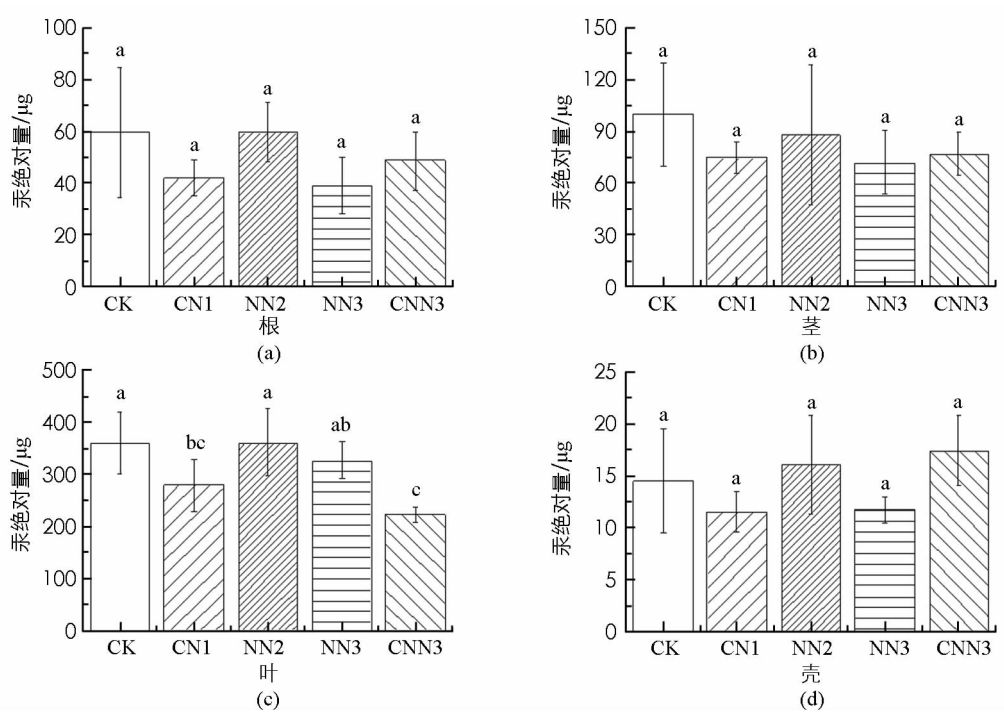
不同氮肥处理下, 处理 CK, CN1, NN2, NN3, CNN3 的汞绝对量分别为 (59.47 ± 24.78) , (41.81 ± 6.81) , (59.46 ± 11.49) , (48.18 ± 19.99) , $(48.80 \pm 11.17) \mu\text{g}$, 4 种氮肥处理的汞的绝对量均低于 CK 处理的汞的绝对量, 但差异并无统计学意义(图 5a).

不同氮肥处理下, 水稻茎中汞的绝对量在 $46.03 \sim 146.82 \mu\text{g}$ 之间, 最高处理为 CK, 其质量为 $99.49 \pm 29.86 \mu\text{g}$, 最低的处理为 NN3, 其质量为 $71.76 \pm 18.58 \mu\text{g}$, 但各处理间差异并无统计学意义(图 5b).

图 5c 中可以看出, 水稻叶中汞的绝对量在 $208.30 \sim 454.59 \mu\text{g}$ 之间, 最高处理为 CK, 其质量为 $360.93 \pm 60.14 \mu\text{g}$, 最低处理为 CNN3, 其绝对量为 $223.29 \pm 14.06 \mu\text{g}$. 与常规施肥的 CK 处理相比, NN2 和 NN3 处理的汞的绝对量与 CK 处理差异无统计学意义, 而 CN1 和 CNN3 处理的汞的绝对量显著低于 CK 处理, 且 CN1 和 CNN3 处理间差异无统计学意义.

图 5d 中可以看出, 稻壳中汞的绝对量在 $8.76 \sim 21.50 \mu\text{g}$ 之间, 最高的处理为 CNN3, 其质量高达 $17.38 \pm 3.37 \mu\text{g}$; 最低处理为 CN1, 绝对量为 $11.52 \pm 1.93 \mu\text{g}$, 各处理间差异无统计学意义.

以上数据显示, 不同氮肥处理下, 根、茎、壳均呈现相同趋势, 水稻植株汞的质量差异无统计学意义, 而叶与以上部位表现不同趋势, CN1 和 CNN3 处理能对降低水稻叶中的汞质量有明显影响. 其原因可能是与水稻植株不同器官汞的来源不同有关, 除土壤中的汞之外, 大气中的汞对水稻汞的吸收累积也有一定的影响^[19-20], 而叶中汞质量较高, 受到了高质量分数大气汞的影响, 从而导致了水稻叶汞质量表现趋势与其他部位不同.



同一水稻部位不同字母表示差异在 5% 水平有统计学意义

图 5 不同氮肥处理下水稻根、茎、叶、壳中汞的绝对量

3 讨 论

本研究中,不同氮肥影响下水稻各部位的 Hg 的质量呈现不同程度的降低,稻米中 NN3 处理绝对量较 CK 组降低了 49%,而水稻叶中 CNN3 处理绝对量较 CK 组降低了 38%,其他根、茎部位亦表现出一定的降低趋势.可见,硝态氮和铵态氮的形式对于汞的吸收累积有抑制作用.研究结果显示,氮肥带入土壤中的阴、阳离子可以产生直接与重金属发生离子交换作用产生沉淀反应,以及更复杂的协同/拮抗作用来影响土壤和植物根系中重金属的行为^[21].特别是当氮肥中带有硝态氮和铵态氮时,施入土壤后会与植物根际土壤发生一系列的反应.当土壤中 NH_4^+ 增多时,会造成 pH 值下降,而土壤中 NO_3^- 增多时则相反,从而改变土壤的理化性质.同时, pH 值是影响植物吸收累积重金属的重要因素之一^[22].对于重金属而言,当 pH 值较低时,土壤中的颗粒主要以静电吸附为主,由于 H^+ 质量分数的增加,导致表面官能团被破坏,使得与重金属离子所形成的络合物被解吸,从而吸附态的重金属离子进入土壤溶液中,更易被植物吸收.随着 pH 值的增高, OH^+ 质量分数也升高,土壤中的粘土矿物、水合氧化物以及有机质表面的负电荷都会增加,对重金属离子的吸附能力也增强,且不容易发生解吸作用,当 pH 值升高到一定的程度时,会产生沉淀,导致溶解于土壤溶液中的重金属离子迅速减少,也使得植物从土壤中吸收的重金属相应减少.此外,当土壤中 OH^+ 质量分数增加时,其他阳离子质量分数减小,对重金属离子而言,其吸附竞争性减小,更有利于土壤的吸附^[23-24].另一方面, NH_4^+ 和 NO_3^- 都容易被土壤吸附,而与土壤中的重金属结合,使其重金属沉积于土壤中不被植物所吸收,从而降低植物中的重金属的质量^[25-26].从水稻生育角度而言,研究表明,水稻的施氮量与干物质累积量在拔节期和抽穗期的线性关系均有统计学意义.尽管水稻含氮量最高时为分蘖期,但此时施肥叶片生长过于旺盛反而抑制水稻果实的生长,而在水稻穗粒期时,水稻对氮素的吸收再次达到高峰,此时氮素是从营养器官向籽粒中分配,氮肥的施入有利于水稻的生长及果实的产生^[27].因此, NN3 处理中在穗粒期施不同种类的氮肥,其中的硝态氮和铵态氮既增强了土壤对汞离子的吸附能力,同时在此时期施肥更好地促进了植物的生长,减少对重金属的累积.

另外,水稻各部位 Hg 质量分数由大到小顺序为:叶、根、茎、壳、米的趋势,而汞绝对量由大到小顺序为:叶、茎、米、根、壳,绝对量与汞的质量分数变化趋势不同是由于各部位生物量的不同而造成的.但从中仍可见 Hg 在植物中的分布是不均匀的, Hg 在植物各部位中的相对含量存在一定的差异.研究结果

显示,植物体内 Hg 的质量与分布受到植物的类型、土壤和大气中 Hg 的质量的影响。此外,植物年龄对其 Hg 的质量也有一定的影响。一般来说,生长的时间越长,植物组织部分中 Hg 的质量越高^[28-32]。

本研究中,添加了硝态氮和铵态氮的 NN2,NN3,CNN3 处理相对常规施肥的 CK 处理结实率较高,以 CNN3 处理为最高。可见,不同种类氮肥的混合施用在促进水稻生长上有着重要的作用。研究表明,在水稻的营养生长阶段,氧化过程在体内物质代谢占主导地位,铵态氮为还原性物质,在这个阶段添加能够促进植物体内的氧化代谢过程,加强碳水化合物水解,在使还原糖增多的同时,氨基酸与蛋白质也更易形成。而在水稻的生殖生长阶段,体内的物质代谢以还原过程为主导,施用氧化态的硝态氮,能够促进物质代谢的还原过程,使淀粉的贮藏增加,有利于幼穗发育与开花结实^[33]。

4 结 论

本试验以贵州万山汞矿区为研究区域,通过露天水稻盆栽试验,探讨不同氮肥种类及处理方式对水稻不同部位中汞的吸收和累积的影响,研究结论如下:

1) 在相同施肥量条件下,其他氮肥处理与常规施肥(CK)处理生物量无显著变化,但不同种类氮肥混合施用的处理组其结实率更高,最高可增加 9.0%。

2) 与常规施肥(CK)相比,其他氮肥处理均能降低水稻对汞的吸收累积,但对水稻各部位的降低效果不同,NN3 处理下稻米中汞质量较 CK 组降低 49%,为最优处理。

参考文献:

- [1] JIANG G B, SHI J B, FENG X B. Mercury Pollution in China [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(12): 3672-3678.
- [2] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考 [J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194.
- [3] 仇广乐,冯新斌,王少锋,等. 贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(3): 550-555.
- [4] 胡国成,张丽娟,齐剑英,等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 879-885.
- [5] 孟其义,钱晓莉,陈 森,等. 稻田生态系统汞的生物地球化学研究进展 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1556-1573.
- [6] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等. 汞的环境地球化学研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 503-530.
- [7] 朱金山,廖敦秀,王定勇,等. 沼灌条件下水稻植株中汞及甲基汞的含量及食用风险研究 [J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(1): 75-81.
- [8] 郑顺安,韩允奎,李晓华,等. 天津污灌区盐分累积对土壤汞赋存形态的影响 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1858-1865.
- [9] 甲卡拉铁,喻 华,冯文强,等. 氮肥品种和用量对水稻产量和镉吸收的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 281-285.
- [10] 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.
- [11] 薛欣欣,吴小平,张永发,等. 控失尿素对稻田氨挥发、氮素转运及利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 133-140.
- [12] 滕 斌,李之林,肖立中,等. 施氮水平对优质稻产量、品质及稻米 Hg、As、Cd 含量的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 30-33.
- [13] 谢运河,纪雄辉,田发祥,等. 氮肥减量配施土壤调理剂对水稻产量及 Cd 含量的影响 [J]. 华北农学报, 2016, 31(S1): 415-420.
- [14] 贺京哲,孙慧敏,姜延吉,等. 不同种类化肥对壤土吸附解吸铅、镉行为的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 146-152.
- [15] 孙 磊,郝秀珍,周东美,等. 不同氮肥对污染土壤玉米生长和重金属 Cu、Cd 吸收的影响 [J]. 玉米科学, 2014, 22(3): 137-141, 147.
- [16] 林兴军. 不同肥水管理对水稻生理生态的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [17] 杜显章,高 磊,张 婧. 不同氮肥调控对水稻产量和品质的影响 [J]. 现代化农业, 2017(8): 18-19.
- [18] 郑 伟,冯新斌,李广辉,等. 硝酸水浴消解-冷原子荧光光谱法测定植物中的总汞 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 26(3): 285-287.
- [19] MENG B, FENG X B, QIU G L, et al. Distribution Patterns of Inorganic Mercury and Methylmercury in Tissues of Rice (*Oryza Sativa* L.) Plants and Possible Bioaccumulation Pathways [J]. Journal of Agricultural Food and Chemistry, 2010, 58(8): 4951-4958.

[20] 钟顺清, 仇广乐, 孟 博. 万山汞矿区水稻吸收无机汞及甲基汞影响因素探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 1946-1952.

[21] 李 波, 青长乐, 周正宾, 等. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在土壤治污中的应用 [J]. 农业环境科学学报, 2000, 19(6): 375-377.

[22] 王艳红, 唐明灯, 李盟军, 等. 外加氮源在 Cd 超标菜地上的应用效果 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 218-225.

[23] 杨亚提, 张一平. 恒电荷土壤胶体对 Cu~(2+)、Pb~(2+)的静电吸附与专性吸附特征 [J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 102-109.

[24] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 生物炭对土壤重金属形态特征及迁移转化影响研究进展 [J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(6): 82-90.

[25] 邵明艳. 土壤中铵态氮与重金属共存时的运移实验与模拟研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2010.

[26] 吴建富, 张美良, 刘经荣, 等. 不同肥料结构对红壤稻田氮素迁移的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 368-373.

[27] 孙永健, 孙园园, 徐 徽, 等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响 [J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1639-1649.

[28] ERICKSEN J A, GUSTIN M S, SCHORRAN D E, et al. Accumulation of Atmospheric Mercury in Forest Foliage [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(12): 1613-1622.

[29] FLECK J A, GRIGAL D F, NATER E A. Mercury Uptake by Trees: An Observational Experiment [J]. Water Air and Soil Pollution, 1999, 115(1): 513-523.

[30] ST LOUIS V L, RUDD J W, KELLY C A, et al. Importance of the Forest Canopy to Fluxes of Methyl Mercury and Total Mercury to Boreal Ecosystems [J]. Environmental Science and Technology, 2001, 35(15): 3089-3098.

[31] 刘玉荣. 不同农田生态系统土壤汞的初步研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.

[32] RAMÍÍREZ L M, CLAASSEN N, UBIERA A A, et al. Effect of Phosphorus, Potassium and Zinc Fertilizers on Iron Toxicity in Wetland Rice (Oryza Sativa, L.) [J]. Plant and Soil, 2002, 239(2): 197-206.

[33] 姜孝礼. 关于硝态氮肥在水稻田里的施用问题 [J]. 耕作与肥料, 1966(3): 53-54.

Effect of Nitrogen Fertilizer on Mercury Accumulated and Distribution in Rice

ZHOU Hong-yun¹, XU Xiao-hang², YANG Chen-dong¹,
HAN Jia-liang¹, XU Zhi-dong², QIAN Xiao-li¹, QIU Guang-le²

1. School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: Five nitrogen-treated groups of conventional urea fertilization: 3 times per generation period adding(CK), urea as base fertilizer with1 time adding (CN1), urea + calcium nitrate + ammonium sulfate as tiller fertilizer with 1 time adding (NN2), urea + calcium nitrate + ammonium sulfate as ear fertilizer with 1 time adding (NN3), and urea + calcium nitrate + ammonium sulphate with 3 times adding (CNN3) were applied in heavily Hg-contaminated soils from Wanshan Hg mining area to investigate the effect on Hg accumulation in rice plants. The results show that there is no significant change in rice biomass in five nitrogen-treated groups under the same fertilizer application conditions, but NN2, NN3 and CNN3 could increase the rice seed yielding with the maximum increase of 9% being recorded in CNN3 group. Compared with CK, other nitrogen fertilizer treatments can all reduce the accumulation of Hg in rice, with the maximum decrease of 49% in grain recorded in NN3, and 39% in leaf in CNN3. The NN3 treatment exhibited the best cumulative effect on the decrease of Hg accumulation in rice and can be considered as an agronomic controlling measurement for Hg-contaminated soils.

Key words: nitrogen treatment; rice; total mercury; effect

责任编辑 包 颖