

不同氮肥对小麦生长和吸收镉的影响*

赵 晶^{1,2} 冯文强¹ 秦鱼生¹ 喻 华¹ 廖明兰¹ 甲卡拉铁^{1,2}

程 瑜^{1,3} 王昌全² 涂仕华^{1**}

(¹四川省农业科学院土壤肥料研究所 成都 610066)

(²四川农业大学资源环境学院 雅安 625014)

(³西南大学资源环境学院 重庆 400716)

摘 要 为了保证镉含量处于临界值附近土壤上农产品的安全生产, 避免不合理施肥引起土壤镉的活化和增加作物吸镉量, 研究了4种主要氮肥对不同生育期小麦吸收镉的影响。研究表明, 施用硫酸铵、硝酸铵和尿素都比氯化铵促进了小麦生长, 明显提高了小麦籽粒产量。所有氮肥处理都比无肥处理增加了小麦对镉的吸收, 但不同氮肥处理之间的效果差异显著, 其中以氯化铵的促进作用最强, 硫酸铵处理的小麦吸收镉最少, 尿素处理的小麦对镉的吸收随其用量增加而增加。在小麦整个生育期中, 生育前期吸收镉较少, 中、后期明显增大; 但植株体内镉的浓度却表现为前期高、后期低, 呈现随生育期递进而逐渐降低的趋势, 只有氯化铵处理表现为拔节期体内镉含量为最高。镉在小麦体内的累积与其生物量的增加呈正相关, 从秸秆向籽粒转移的总镉量随小麦籽粒/秸秆比的增加而降低。本试验中土壤的镉含量小于土壤环境质量污染二级标准, 但籽粒含镉量均超过国家食品卫生标准允许量 (0.1 mg kg^{-1}), 表明土壤镉污染指标与作物品种密切相关。在镉污染土壤上, 应选用低富集镉的小麦品种, 避免使用氯化铵, 防止过量施用尿素或其它铵态氮肥。表4 参23

关键词 氮肥; 品种; 小麦; 镉; 吸镉量

CLC S512.106.2

Effects of Different Nitrogen Fertilizers on Wheat Growth and Cadmium Uptake*

ZHAO Jing^{1,2}, FENG Wenqiang¹, QIN Yusheng¹, YU Hua¹, LIAO Minglan¹, JIACA Latie^{1,2}, CHENG Yu^{1,3},

WANG Changquan² & TU Shihua^{1**}

(¹Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

(²College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

(³College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract In order to secure safety of agricultural produce originated from the soil that contains cadmium (Cd) close to its critical pollution level and avoid any improper fertilization that can enhance activation and uptake of soil Cd by crops, pot experiments were conducted to study the effects of four major nitrogen (N) fertilizers on Cd uptake by wheat at different growth stages. The results showed that the application of ammonium sulfate, ammonium nitrate and urea significantly improved wheat growth and obviously enhanced wheat yield compared to the ammonium chloride. All N fertilizers increased Cd uptake that differed significantly between the treatments with the highest Cd uptake by the nitrogen chloride treatment and the lowest by the ammonium sulfate treatment. The Cd contents in wheat tissues were increased with an increase in urea dosage. Total amounts of Cd uptake in wheat tissues increased with time, while the Cd concentrations decreased with time from seedling stage to maturity, except ammonium chloride that resulted in the highest Cd content in the tissues at elongation stage. The accumulation of Cd in plant was well related with an increase in wheat biomass, while the amounts of Cd transferred from straw to grains decreased with an increase in grain/straw ratio. It is worth noting that the Cd content in wheat grains surpassed the allowable safety level even when wheat grew on the soil with Cd content below the critical pollution level, indicating that the soil Cd critical values should be set up for each crop or variety rather than a fixed value for all. In order to produce pollution free wheat growing on the soil suffering from Cd pollution or marginal Cd pollution, Cd resistant wheat variety should be adopted, and the use of ammonium chloride or overdoses of urea and other ammonium N fertilizers should be avoided to effectively reduce the activity of soil Cd. Tab 4, Ref 23

Keywords Nitrogen; variety; wheat; cadmium; Cd uptake

CLC S512.106.2

收稿日期: 2009-01-16 接受日期: 2009-05-05

*四川省科技支撑计划项目 (No. 2008NG0002) 和国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAD02A05) 资助 Supported by the S & T Supporting Project of Sichuan Province, China (No. 2008NG0002) and the National S & T Pillar Program of China (No. 2006BAD02A05)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: stu@ipni.net)

镉 (Cd) 是重要的环境污染物, 具有致癌、致畸和致突变作用, 对人类健康危害很大。镉既可由镉污染的空气和饮水进入人体, 亦可经由镉污染的动、植物产品, 通过食物链进入人体。镉是常见的土壤有害重金属。在日本约有 31.5×10^4 hm^2 农田受到镉污染, 1955~1972 年发生在日本富山县神通川流域的“骨痛病”就是当地人们长期食用“镉米”和饮用含镉的水而引起的, 被定为日本第一号公害病^[1]。

我国的膳食结构中粮食摄入量占 50% 以上, 小麦是仅次于水稻的第二大作物。四川是我国的小麦主产区之一, 面积和总产量均居全国第 5 位, 其播种面积和总产量在省内粮食作物中居第 2 位, 仅次于水稻。小麦对镉的吸收和累积与其生长土壤中的镉含量、土壤理化性质及镉在土壤中的活性等因素密切相关^[2]。

施肥是重要的农业增产措施, 特别是氮肥。施用不同氮肥后是促进还是抑制土壤中镉活性以及植物对镉的吸收, 关系到镉污染土壤上农产品的安全生产^[3-4]。本研究旨在探讨不同氮肥对土壤镉生物有效性的影响, 揭示不同肥料或组分对小麦吸收镉的影响以及 Cd 在小麦体内转移的规律, 提出小麦优化施肥技术, 降低小麦对镉的吸收, 保证镉污染土壤上小麦的无公害生产。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与作物

试验盆栽用土采自四川省绵竹市孝德镇由灰色冲积物发育而成的潜育型水稻土的耕层土壤 (0~20 cm), 采样时间在水稻收获后。土样在盆栽场自然风干, 除去砂砾及植物残体, 粉碎过筛后混合均匀备用。取一部分土壤进行土壤基本性质、全镉、有效镉含量测定。测定设置 3 个重复, 土壤 pH 测定的水土比为 2.5 : 1, 用 pH 计 (pHS-4C⁺) 测定, 有机质采用重铬酸钾外加热法, CEC 采用醋酸铵法, 全氮采用开氏法, 碱解氮采用碱解扩散法, 有效磷采用 Olsen-NaHCO₃ 浸提钼蓝比色法, 有效钾采用 NH₄OAc 浸提火焰光度法, 全镉采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮、无焰原子吸收光谱法 (石墨炉 novAA400-德国耶拿) 测定, 有效镉采用 Tessier (1979) 五步连续提取法第一步: 1 mol L⁻¹ MgCl₂ (pH=7) 溶液浸提^[5], 无焰原子吸收光谱法 (石墨炉 novAA400-德国耶拿) 测定。

经测定, 该土壤 pH 6.8, 有机质含量为 29.5 g kg⁻¹, CEC 11.4 cmol kg⁻¹, 全氮 1.36 g kg⁻¹, 碱解氮 94.92 mg kg⁻¹, 有效磷

28.7 mg kg⁻¹, 有效钾 68.3 mg kg⁻¹。土壤全镉含量为 0.283 mg kg⁻¹, 接近国家制定的土壤镉污染临界指标 (0.3 mg kg⁻¹), 有效态镉为 0.074 mg kg⁻¹。

供试作物为川麦 42, 由四川省农业科学院作物研究所提供。

1.2 试验设计

试验设 9 个处理, 每个处理重复 7 次, 苗期和拔节期植株分析各采 2 个重复, 成熟期收获 3 个重复。这 9 个处理分别是 (1) 无肥处理 (CK), (2) 单施尿素 (只施尿素), (3) 尿素+磷、钾肥, (4) 氯化铵+磷、钾肥, (5) 硝酸铵+磷、钾肥, (6) 硫酸铵+磷、钾肥, (7) 尿素 0+磷、钾肥, (8) 尿素 0.2+磷、钾肥, (9) 尿素 0.4+磷、钾肥。所有试验用肥料均为分析纯, 尿素含 N 46%; 磷肥为磷酸二氢钙, 含 P₂O₅ 26%; 钾肥为 KCl, 含 K₂O 60%。处理 (2)~(6) 中, 尿素用量为 0.2 g (N) kg⁻¹ (土); 处理 (7)~(9) 中, 尿素用量分别为 0、0.2、0.4 g (N) kg⁻¹ (土)。处理 (2)~(9) 中, 磷、钾肥用量均为 0.15 g (P₂O₅) kg⁻¹ (土) 和 0.15 g (K₂O) kg⁻¹ (土)。试验用盆钵为陶瓷盆 ($d = 20$ cm, $h = 26$ cm), 每盆装土 8 kg。当不同处理的氮、磷、钾肥称好后, 把盆钵上层 5 cm 的土壤移走备用, 倒出剩下的土壤于另一容器, 在盆内加入至 100% 田间持水量所需的水分, 再倒回容器内的土壤, 把肥料均匀施在土表下 5 cm 处, 最后覆盖上部的 5 cm 土壤, 静置 2 d 后播种小麦。小麦种子经表面消毒后, 用去离子水冲洗数次, 恒温箱 25 °C 浸种 12 h, 吸胀后将 10 粒种子播入盆中, 三叶期定苗, 每盆 6 株, 生长期间定量浇水。

1.3 测定项目与方法

在小麦不同生育期 (苗期、拔节期、成熟期) 对植株部分 (地上部) 及收获后的籽粒进行取样。植物样品采集后, 把地上部分用蒸馏水冲洗干净, 置于烘箱 105 °C 下杀青 0.5 h 后, 再调至 65 °C 烘干至恒重, 称取干重。把小麦秸秆、籽粒样品磨碎过 40 目尼龙筛, 然后用干法灰化消解, 无焰原子吸收光谱法测定镉含量。小麦植株吸 Cd 量 (m/g pot^{-1}) = 植株生物量 (m/g pot^{-1}) $\times$ 植株 Cd 含量 (w/mg kg^{-1}) / 1000。统计分析采用 DPS 软件, 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥品种对不同生育期小麦地上部生物量的影响

不同氮肥及尿素用量对小麦各生育期生物量的影响显著 (表 1)。在苗期, 单施尿素处理小麦地上部生物量低于无

表 1 不同氮肥处理对不同生育期小麦地上部生物量 (m/g pot^{-1}) 的影响

Table 1 Effect of N fertilizer treatments on the aboveground biomass (m/g pot^{-1}) of wheat at different stages

试验 Experiment	处理 Treatment	苗期干重 Dry weight at seedling stage (N=2)	拔节期干重 Dry weight at jointing stage(N=2)	成熟期干重 Dry weight at mature stage (N=3)
氮肥品种 N fertilizer	无肥 CK	0.99±0.0212de	2.06±0.0283f	8.60±0.1762e
	单施尿素 Urea Only	0.83±0.0283e	2.64±0.1131e	16.48±0.4508d
	尿素 Urea	1.21±0.0636c	4.88±0.1414c	24.36±0.1721b
	氯化铵 NCl	1.01±0.1061d	3.50±0.1414d	20.73±0.2805c
	硝酸铵 NN	1.55±0.0212b	5.61±0.1626b	25.14±0.7887a
尿素用量 Urea dosage	硫酸铵 NS	2.10±0.0919a	6.34±0.0566a	25.20±0.19a
	尿素 0 Urea 0	1.26±0.0778a	3.43±0.1344b	11.75±0.311c
	尿素 0.2 Urea 0.2 [0.2 g(N) kg ⁻¹ (soil)]	1.21±0.0636a	4.88±0.1414a	24.36±0.1721a
	尿素 0.4 Urea 0.4 [0.4 g(N) kg ⁻¹ (soil)]	0.50±0.0184b	1.37±0.0707c	19.06±0.4951b

统计分析采用 DPS 软件, 不同处理平均值字母不同表示处理间有显著差异 ($P < 0.05$), 字母相同表示处理间无显著差异。下同。

DPS software was used for statistical analysis. Different letters following the treatment means indicate significant difference ($P < 0.05$) between treatments and the same letters show no difference. The same below

肥处理,但二者差异不显著.磷、钾肥与尿素配合施用比单施尿素处理显著增加了小麦地上部生物产量.4种不同氮肥处理对小麦生长的影响差异显著,其中硫酸铵处理小麦地上部生物量最大,随后依次为硝酸铵、尿素、氯化铵.拔节期不同处理小麦地上部生物量的变化与苗期基本相似,但无肥处理小麦生物量明显低于单施尿素处理,说明前期单施尿素对小麦生育一定不利影响.成熟期不同处理间植株生物量差异最为明显,无肥处理植株生物量显著低于所有其他处理,其次为单施尿素处理,其植株产量显著低于除无肥处理外的其他处理.在4种不同氮肥处理中,硫酸铵和硝酸铵对小麦生物量的影响相当,显著高于尿素和氯化铵处理;氯化铵处理的小麦生物量显著低于其他3种氮肥.说明在该试验土壤上,施用硫酸铵和硝酸铵都有利于促进小麦生长,其次为尿素,氯化铵则不利于小麦生长.

在不同尿素用量处理中,不施尿素和施用高量尿素都不利于小麦生长,只有适宜的用量才能充分发挥尿素的肥效,3种用量之间的小麦生物量差异显著.这种影响从小麦出苗一直持续到成熟,但无氮处理与高量尿素处理对小麦生长的影响机理各不相同.在苗期至拔节期,无氮处理基本上是促进小麦生长,到了后期生长才受到严重抑制,可能是因为后期小麦供氮不足造成的营养不良所致;而高量尿素对小麦生长的影响正好相反,从苗期至拔节期表现为严重抑制作用,后期的促进作用非常显著,说明高量尿素可能毒害了小麦幼苗生长,这种不利影响一直延续到小麦生长中期,后期才得以缓解而表现为促进作用.这一结果对小麦底肥尿素用量的确定具有积极的指导意义.

2.2 不同肥料对小麦产量构成因素的影响

不同氮肥处理不但显著影响了小麦的生物产量,也显著影响了小麦的籽粒产量和产量构成因子(表2).在所有处理中,硝酸铵和硫酸铵处理小麦的籽粒产量最高,约为每盆35 g;无肥CK最低,仅为每盆13.16 g.不同处理对小麦籽粒产量(m/g pot^{-1})的增产效果依次为:硝酸铵 $\approx$ 硫酸铵(35)>尿素(33.80)>氯化铵(31.84)>高量尿素(29.4)>单施尿素(25.9)>CK>尿素0(12.92).但硝酸铵、硫酸铵、尿素和氯化铵4个处理之间的籽粒产量差异不显著.在所有产量构成因素中,对籽粒产量影响最大的是有效穗数.因此,CK和尿素0处理的有效穗最低,为每盆6个;而硫酸铵和硝酸铵处理的有效穗最高,分别为19个和17个.影响籽粒产的第二大因素为千粒重.当有效穗相同或相当时,千粒重大的处理,其籽粒产量

也高.例如,CK和尿素0处理都有6个有效穗,CK处理的千粒重为54.84 g,而尿素0为46.94 g,因而CK处理的籽粒产量高于尿素0处理.同样,虽然硫酸铵的有效穗比硝酸铵多2个,但硝酸铵的千粒重(50.66 g t^{-1})比硫酸铵(47.16 g)高,因而籽粒产量也高.穗长和穗粒数对小麦籽粒产量的影响相对较小.

2.3 不同氮肥对小麦不同生育期植株及籽粒镉的影响

2.3.1 不同氮肥对不同生育期小麦植株和籽粒镉的影响

不同氮肥处理对小麦植株和籽粒中镉含量的动态变化如表3所示.从苗期至成熟期,各氮肥处理(氯化铵除外)小麦植株的镉含量随生育期的递进而逐渐降低.氯化铵处理植株的镉含量从苗期到拔节期升至最高,成熟期显著降低.所有处理成熟期小麦秸秆中的镉含量都降低,可能是因为镉从秸秆向籽粒转移的缘故.不同处理间对小麦植株的镉含量存在较大差异.苗期无肥CK处理由于缺肥,植株瘦小,生长较慢,吸收能力差,植株中的镉含量最低.施用尿素的处理由于尿素的硝化作用,使土壤pH降低,土壤镉的活性增加^[6],相应植株吸收的镉增多.单施尿素处理植株的镉含量显著高于无肥,增加94.8%.与磷、钾配施的尿素处理与单施尿素处理之间植株含镉量差异不显著,氯化铵处理植株镉含量最低,显著低于尿素28.09%,其它处理与尿素处理差异不显著.在拔节期,除氯化铵处理的植株镉含量显著上升外,其它处理均下降.尿素处理植株镉含量显著高于单施尿素处理,单施尿素处理植株镉含量显著高于无肥处理.配施磷、钾的处理中,氯化铵、硫酸铵和硝酸铵3个氮肥处理镉含量都显著高于尿素处理,分别高51.14%、8.67%、14.31%.成熟期秸秆中的镉含量比拔节期显著下降,下降幅度依次为无肥85.57%、单施尿素54.85%、尿素67.12%、氯化铵53.64%、硝酸铵58.61%和硫酸铵78.67%.无肥处理镉含量最低,其次为硫酸铵<单施尿素<尿素<硝酸铵<氯化铵,各处理间镉含量差异显著.籽粒中镉含量以无肥处理最低,单施尿素处理显著高于无肥35.44%.磷、钾配施处理中,氯化铵处理的小麦籽粒含镉量最高,其次为硝酸铵,二者分别显著高于尿素处理71.9%和22.93%,硫酸铵与尿素处理差异不明显.

在尿素不同用量处理中,从苗期到成熟期,不同尿素用量均呈现出随小麦生育期的递进而植株镉含量逐渐降低的趋势.苗期低量(0.2)和高量(0.4)尿素处理植株的镉含量比尿素0(无氮)处理显著低9.66%和22.95%.这可能与它们对小麦的生长影响有关,苗期低量(0.2)和高量(0.4)尿素处理

表2 不同氮肥处理对小麦产量构成因素的影响($N=3$)

Table 2 Effect of N fertilizer application on yield component factors of wheat ($N=3$)

试验 Experiment	处理 Treatment	穗长 Ear length (l/cm)	有效穗数 Effective ears	穗粒数 Grains/ear	千粒重 Weight/1000-grain (m/g)	籽粒产量 Grain yield (m/g pot ⁻¹)
氮肥品种 N fertilizer	无肥 CK	10.22 $\pm$ 0.2203b	6 $\pm$ 0d	40.33 $\pm$ 0.165c	54.84 $\pm$ 0.2516a	13.16 $\pm$ 1.3291c
	单施尿素 Urea Only	10.35 $\pm$ 0.3166b	15 $\pm$ 0.5774c	34.30 $\pm$ 0.052e	51.72 $\pm$ 0.225b	25.90 $\pm$ 1.6607b
	尿素 Urea	11.46 $\pm$ 0.2784a	16 $\pm$ 1bc	42.64 $\pm$ 0.3296a	49.96 $\pm$ 0.4407cd	33.80 $\pm$ 0.5572a
	氯化铵 NCl	10.39 $\pm$ 0.3166b	16 $\pm$ 0.5774bc	41.50 $\pm$ 0.3258b	49.00 $\pm$ 1.0626d	31.84 $\pm$ 3.4793a
	硝酸铵 NN	11.36 $\pm$ 0.1498a	17 $\pm$ 1b	40.81 $\pm$ 0.5781c	50.66 $\pm$ 0.6437bc	35.09 $\pm$ 2.5543a
	硫酸铵 NS	11.20 $\pm$ 0.2146a	19 $\pm$ 1a	39.02 $\pm$ 0.462d	47.16 $\pm$ 0.6018 e	34.91 $\pm$ 1.9676a
尿素用量 Urea dosage	尿素0 Urea 0	10.65 $\pm$ 0.193b	6 $\pm$ 0.5774b	43.63 $\pm$ 0.6506a	46.94 $\pm$ 0.2875c	12.92 $\pm$ 0.1758c
	尿素0.2 Urea 0.2 [0.2 g(N) kg ⁻¹ (soil)]	11.46 $\pm$ 0.2784a	16 $\pm$ 1a	42.64 $\pm$ 0.3296a	49.96 $\pm$ 0.4407b	33.80 $\pm$ 0.5572a
	尿素0.4 Urea 0.4 [0.4 g(N) kg ⁻¹ (soil)]	9.08 $\pm$ 0.2801c	14 $\pm$ 1a	37.53 $\pm$ 0.5456b	57.98 $\pm$ 0.551a	29.40 $\pm$ 2.5723b

表3 不同氮肥品种对不同生育期小麦植株和籽粒含镉量 (w/mg kg^{-1}) 的影响
Table 3 Effect of different N fertilizers on Cd contents (w/mg kg^{-1}) in grains and straw of wheat at different growth stages

试验 Experiment	处理 Treatment	苗期植株 Shoot at seedling stage (N=2)	拔节期植株 Shoot at jointing stage (N=2)	成熟期植株 Shoot at mature stage (N=3)	籽粒 Grain (N=3)
氮肥品种 N fertilizer	无肥 CK	0.46±0.0297d	0.30±0.0059e	0.04±0.002e	0.14±0.0201e
	单施尿素 Urea Only	0.90±0.0478b	0.46±0.0199d	0.21±0.0375d	0.19±0.0125d
	尿素 Urea	0.97±0.0068ab	0.82±0.0163c	0.27±0.0187c	0.29±0.0143c
	氯化铵 NCl	0.70±0.0082c	1.24±0.0347a	0.57±0.0208a	0.50±0.0411a
	硝酸铵 NN	1.00±0.0257a	0.89±0.0238b	0.37±0.0061b	0.36±0.0111b
尿素用量 Urea dosage	硫酸铵 NS	0.99±0.0413a	0.94±0.0177b	0.20±0.0112b	0.30±0.0129c
	尿素0 Urea 0	1.07±0.0238a	0.80±0.0288a	0.04±0.0036c	0.17±0.0208c
	尿素0.2 Urea 0.2 [0.2 g(N) kg^{-1} (soil)]	0.97±0.0068b	0.82±0.0163a	0.27±0.0187b	0.29±0.0143b
	尿素0.4 Urea 0.4 [0.4 g(N) kg^{-1} (soil)]	0.83±0.005c	0.56±0.0293b	0.44±0.0311a	0.34±0.0215a

地上部植株生物量比尿素0处理显著低6.0%和61.32%。拔节期各处理镉含量都比苗期有所降低,其中高量尿素比无氮处理显著低29.48%,其余二处理间差异不显著。成熟期,低量和高量尿素处理植株的镉含量比尿素0处理显著高630.08%和1078.83%,籽粒镉含量显著高67.8%和94.9%。

在土壤含镉量低于国家允许安全限量指标 ($\text{Cd} \leq 0.3 \text{ mg kg}^{-1}$) 的情况下,各处理籽粒镉含量均超过国家食品卫生标准允许量 (0.1 mg kg^{-1}),这与一些其它报道不同^[7-12],可能是因为本试验使用的小麦品种为镉富集型(作者开展的小麦品种筛选试验表明了这一点,本文未给出资料),导致了试验结果的差异,同时也说明土壤镉的限量指标不能仅仅依据土壤pH,而应与作物/品种相关联,才具有广泛的指导意义和实用价值。

从总体来看,无肥,单施尿素,与磷、钾配施的尿素,硝酸铵和硫酸铵处理,不同尿素用量处理植株的含镉量都随着生育期的递进而降低,唯有氯化铵处理植株的镉含量呈现先增加再降低的趋势。在拔节期后,植株生长加快,生物量增加多,相应的镉含量下降迅速。无肥处理和单施尿素处理对照可看出,尿素对植株秸秆和籽粒含镉量影响较大,在一定程度上促进了植株对镉的吸收。虽然随着小麦生长,植株体内的镉含量降低,但在养分充足的条件下,作物生长越好,植株体内的镉含量仍然很高。氯化铵处理镉含量均显著高于其它处理,可能是因为Cl⁻能与镉形成络合物,大大提高了土壤溶液中镉的浓度,镉的迁移能力大大增强,植物就更易吸收土壤中的有效镉^[13-19]。

2.3.2 不同氮肥对不同生育期小麦植株和籽粒吸收镉的影响

不同氮肥品种处理下小麦不同生育期植株和籽粒对镉吸收量各不相同(表4)。从苗期到成熟期,不同氮肥处理(无

肥、硫酸铵除外)小麦植株吸收镉量随着生育期的递进而逐渐增加,无肥和硫酸铵处理植株在拔节期时吸收的镉达最高,随后降低。不同处理对小麦吸收镉的影响存在着很大差异。在整个小麦生育期中,无肥CK处理吸收的镉最低,其次为单施尿素处理;氯化铵处理为最高,其次为硝酸铵、硫酸铵和尿素处理。小麦吸收镉总量的差异,与对不同生育期的植株生物产量和籽粒产量的影响相吻合。这反映了植株生物量的增加与对镉的吸收量呈正相关。氯化铵处理吸收的镉量偏高,显著高于所有处理,可能是因为氯化铵所含Cl⁻对土壤镉的络合作用,提高了镉的有效性和促进了小麦吸收^[15]。氯化铵处理苗期对镉的吸收量很低,拔节期显著增加,成熟期增加最高,也说明了在小麦生育期中,氯化铵处理对镉的吸收也与小麦不同生育期生物量呈正相关。从成熟期小麦地上部吸收镉总量来看,氯化铵>硝酸铵>尿素>硫酸铵>单施尿素>无肥。

不同尿素用量对小麦吸收镉量影响也很大。从苗期到成熟期,各用量处理(尿素0除外)都随小麦生育进程的推移而吸镉量不断增加,仅有尿素0处理在拔节期吸收镉量最多。苗期高量(0.4)尿素处理植株吸收的镉量显著低于其它两个处理,其它两处理间的吸镉量差异不明显。拔节期以尿素0.2处理吸收的镉为最高,显著高于其它两个处理,为尿素0.4处理的5倍,尿素0处理的148%。成熟期秸秆吸收镉量明显发生根本性变化,尿素高量处理吸收的镉比低量处理显著高26.34%,比不施尿素处理高21倍。两个施用尿素处理转移到小麦籽粒中的镉数量相当,分别为不施氮肥的4.5倍。土壤镉的生物有效性随氮肥用量增加的情况在文献中也有类似报道^[6, 20-23],说明控制氮肥用量对减少作物从土壤中吸收镉的重要作用。秸秆和籽粒吸收镉分配比分别为:尿素0处理16:

表4 不同氮肥对不同生育期小麦植株和籽粒吸收镉 (m/mg pot^{-1}) 的影响
Table 4 Effect of different N fertilizers on Cd uptake (m/mg pot^{-1}) by wheat at different growth stage

试验 Experiment	处理 Treatment	苗期植株 Shoot at seedling stage (N=2)	拔节期植株 Shoot at jointing stage (N=2)	成熟期秸秆 Shoot at mature stage (N=3)	籽粒 Grain (N=3)	成熟期吸Cd总量 Total Cd uptake at maturity (N=3)
氮肥品种 N fertilizer	无肥 CK	0.0005±0e	0.0006 ±0f	0.0004±0f	0.0019±0.0001e	0.0022±0.0001e
	单施尿素 Urea Only	0.0007±0.0001d	0.0012±0e	0.0034±0.0007e	0.0050±0d	0.0084±0.0006d
	尿素 Urea	0.0012 ±0.0001c	0.0040±0d	0.0066±0.0004c	0.0098±0.0006c	0.0164±0.0009c
	氯化铵 NCl	0.0007±0.0001d	0.0043±0.0001c	0.0119±0.0003a	0.0159±0.0025a	0.0278±0.0023a
	硝酸铵 NN	0.0015±0b	0.0050±0b	0.0093±0.0002b	0.0125±0.0009b	0.0218±0.0008b
尿素用量 Urea dosage	硫酸铵 NS	0.0021±0.0002a	0.0059±0.0002a	0.0051±0.0003d	0.0106±0.0006bc	0.0157±0.0007c
	尿素0 Urea 0	0.0013±0.0001a	0.0027±0.0002b	0.0004±0c	0.0022±0.0002b	0.0027±0.0002c
	尿素0.2 Urea 0.2 [0.2 g(N) kg^{-1} (soil)]	0.0012±0.0001a	0.0040±0a	0.0066±0.0004b	0.0098±0.0006a	0.0164±0.0009b
	尿素0.4 Urea 0.4 [0.4 g(N) kg^{-1} (soil)]	0.0004±0b	0.0008±0c	0.0083±0.0005a	0.0099±0.0003a	0.0182±0.0004a

84, 尿素0.2处理40:60和尿素0.4处理46:54, 表明小麦吸收的镉在秸秆和籽粒中的分配比例随其生物产量和籽粒产量的变化而变化, 即随小麦籽粒: 秆比的增加而减小。地上部吸收镉总量大小表现为高量尿素>低量尿素>不施尿素, 这仍然与其植株产量和籽粒产量呈一一对应的正相关。

试验结果表明, 在镉污染土壤上应施用硫酸铵或适量尿素, 避免施用氯化铵, 应尽量控制尿素的用量, 做到平衡施肥, 以达到减少作物对镉的吸收, 减少农产品受镉污染的风险。

3 结论

在4种氮肥中, 硝酸铵和硫酸铵能明显提高小麦的籽粒产量, 其次为尿素, 氯化铵处理的小麦产量最低。在产量构成因素中, 有效穗对产量影响最大, 其次为千粒重, 穗粒数和穗长的影响相对较小。不同氮肥处理对小麦吸收镉存在显著差异。所有氮肥都比无肥处理增加小麦对镉的吸收, 其中以氯化铵的促进作用最强, 其次为硝酸铵和高量尿素处理, 低量尿素和硫酸铵处理小麦吸收镉最少。在小麦整个生育期中, 生育前期吸收的总镉量较少, 中、后期明显增大; 但植株体内的镉浓度却表现为前期高、后期低, 呈现随生育期递进而逐渐降低的趋势, 只有氯化铵处理表现为拔节期体内镉含量为最高。小麦秸秆和籽粒吸收镉的总量均表现为籽粒>秸秆。镉在小麦体内的累积与其生物量的增加呈正相关, 镉从秸秆向籽粒转移的总镉量随着小麦籽粒: 秆比的增加而降低。

本试验土壤镉并未达到土壤环境质量污染二级标准 ($Cd \geq 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$), 但籽粒含镉量均超过国家食品卫生标准允许量 (0.1 mg kg^{-1}), 表明该供试小麦品种可能为镉富集品种, 同时也说明土壤镉污染指标与品种有关, 而不是一个对所有作物种类或品种一成不变的固定值。

在土壤镉含量处于污染临界值附近或已受镉污染的土壤上, 应选用低富集镉的小麦品种, 避免使用氯化铵, 防止过量施用尿素或其它氮肥, 同时配施一定的碱性物质 (如石灰), 以降低土壤镉的活性, 保证小麦的无公害生产。

References

- Chen HM (陈怀满), Zheng CR (郑春荣). Heavy Metal Pollution in the System Between Soil and Plant. Beijing, China (北京): Science Press, 1996. 71~72
- Cabrera D, Yong SD, Rowell DL. The toxicity of cadmium to barley plants as affected by complex formation with humic acid. *Plant Soil*, 1988, **105**: 195~204
- Wu YY (吴燕玉). 张士灌区镉污染综合防止技术的研究. *Environ Sci China* (中国环境科学), 1985, **5** (3): 2~6
- Bingham FT, Sposito G, Strong JE. The effect of chloride on the availability of cadmium. *J Environ Qual*, 1984, **13**: 71~74
- Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal Chem*, 1979, **51**: 844~851
- Zhao J (赵晶). Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on availability of soil cadmium and cadmium uptake by wheat: [Master's Degree Thesis]. Ya'an, Sichuan, China (雅安): Agricultural University, 2009. 20~23
- Wei LL (韦柳兰), Wang KX (王开曦), Li DY (栗德永). 小麦、玉米对不同类型污水中镉与铬的吸收与积累. *Shaanxi J Agric Sci* (陕西农业科学), 1994, **5**: 27~28
- Cao LJ (曹利军), Wang HD (王华东). Study on cadmium-pollution of soil-crop system and its control. *Environ Pollut & Contr* (环境污染与防治), 1996, **18** (5): 8~11
- Nan ZR (南忠仁), Cheng GD (程国栋). Behaviors of heavy metals (Cd and Pb) in crops grown in land of arid regions irrigated by wastewater. *Agro-environ Prot* (农业环境保护), 2001, **20** (4): 210~213
- Feng ZY (冯绍元), Shao HB (邵洪波), Huang GH (黄冠华). Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop. *Trans Chin Soc Agric Engin* (农业工程学报), 2002, **18** (4): 113~115
- Jiang LN (姜丽娜), Shao Y (邵云), Li CX (李春喜), Li XL (李向力), Lu XY (鲁旭阳), Ma SC (马守臣). Studies on uptake, distribution and accumulation of Cd in wheat plant. *J Henan Agric Sci* (河南农业科学), 2004, **18** (7): 13~17
- Shao Y (邵云), Jiang LN (姜丽娜), Li XL (李向力), Lu XY (鲁旭阳), Li CX (李春喜). Distribution of five heavy metals in different organs of wheat. *Ecol & Environ Sci* (生态环境学报), 2005, **14** (2): 204~207
- Zeng QR (曾清如), Zhou XH (周细红), Mao XY (毛小云). 不同氮肥对铅锌矿尾矿污染土壤中重金属的溶出及水稻苗吸收的影响. *Soil & Fertil* (土壤肥料), 1997, **3**: 26~32
- Yang M (杨锚), Wang HY (王火焰), Zhou JM (周健民), Hu CX (胡承孝), Du CW (杜昌文). Effects of applying nitrogen fertilizers on transformation of external cadmium in the paddy soil with different soil moisture. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), 2006, **5** (5): 1202~1207
- Smolders E, Lambregts RM, McLaughlin MJ, Tiller KG. Effect of soil solution chloride on cadmium availability to Swiss chard. *J Environ Qual*, 1998, **27** (2): 426~431
- Chen SB (陈世宝), Zhu YG (朱永官), Yang JC (杨俊诚). Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil-plant systems. *Tech & Equipment Environ Pollut Contr* (环境污染治理技术与设备), 2003, **4** (8): 1~7
- Chen S (陈苏), Sun LN (孙丽娜), Sun TH (孙铁珩), Chao L (晁雷), Yang CL (杨春璐). Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium. *Environ Sci* (环境科学), 2007, **28** (1): 182~188
- McLaughlin MJ, Andrew SJ, Smart MK, Smolders E. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: I. Effects of complexation and calcium competition in nutrient solutions. *Plant Soil*, 1998, **20**: 211~216
- McLaughlin MJ, Lambrechts RM, Smolders E, Smart MK. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: II. Effects due to sulfate addition to soil. *Plant Soil*, 1998, **202**: 217~222
- Mitchell LG, Grant CA, Racz GJ. Effect of nitrogen application on concentration of cadmium and nutrient ions in soil solution and in durum wheat. *Can J Soil Sci*, 2000, **80** (1): 107~115
- Gray CW, Moot DJ, McLaren RG, Redcliffe T. Effect of nitrogen fertilizer applications on cadmium concentrations in durum wheat (*Triticum turgidum*) grain. *New Zealand J Crop Hort Sci*, 2002, **30** (4): 291~299
- Erikson JE. Effects of nitrogen-containing fertilizers on solubility and plant uptake of cadmium. *Water, Air & Soil Pollut*, 1990, **49** (3): 355~368
- Fabing G, Dezsi DM. Ecophysiological studies of the relationship between heavy metal toxicity and nitrogen nutrition in the early development stage of winter wheat. *Acta Bot Hungarica*, 1987, **33** (3): 219~234