

## 镉毒害对小麦生理生态效应的研究进展

程 杰, 高压军

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:** 镉是植物生长的非必须元素, 它具有很大的生物毒性, 与其它重金属相比, 更易被植物吸收积累, 即使生长在非污染土壤上的小麦, 籽粒中镉含量都在 0.002 ~ 0.207 mg/kg。在参考大量文献资料的基础上, 综述了镉(Cd)毒害对小麦植株幼苗的萌发、生长及小麦生理生化特性的反应, 提出了小麦镉毒害影响因素与防治途径。

**关键词:** 镉毒害; 小麦; 镉积累; 生理生化; 效应

**中图分类号:** S512.1; X53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2006)06-0218-04

## Progress in Studies on Cadmium Toxicity to Physiology and Ecology Effect of Wheat

CHENG Jie, GAO Ya-jun

(Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Cadmium is not essential element to plant growth and its biotic toxicity is great. Cadmium is easily absorbed and accumulated by plant compared with any other heavy metals. Even if wheat which grown in non-polluted soil the concentration of Cadmium in its seeds is 0.002 ~ 0.207 mg/kg. The effect of Cadmium toxicity to sprouting and growth of wheat seeds, and to physiological and biochemical characteristics of wheat are summarized. At the same time, effect factors and precaution about wheat Cadmium toxicity are suggested based on plentiful literature.

**Key words:** Cadmium toxicity; wheat; Cadmium accumulation; physiological and biochemical; effect

在农业生产上, 重金属污染不仅使土壤肥力下降, 而且使生产出的农产品质量不符合生态安全的要求。重金属具有很强的蓄积性、隐蔽性、不可逆性和长期性, 它性质稳定, 难以降解, 半衰期大多较长, 危害性极大, 同时重金属在土壤中移动性相对较小, 主要积累在 0 ~ 20 cm 的耕作层土壤中, 很少迁移至 40 cm 以下, 且只有很少一部分能随作物地上部分的收获而被移去, 所以土壤或植物一旦遭受重金属污染, 就会不断积累, 不易治理恢复<sup>[16]</sup>。

常被注意的重金属(汞、镉、镍、铬、砷、硒、铁、锰、铜、锌、铅)有 10 多种, 但研究较多的是镉(Cd)、铅(Pb)、铜(Cu)等<sup>[1]</sup>。其中镉对植物的毒害早已为人们所知。镉不是植物生长的必须元素, 它具有很大的生物毒性, 在土壤中具有较强的化学活性, 与其它重金属相比, 更易被植物根系吸收而向籽实迁移, 镉在作物中, 特别是在可食部位的大量积累, 然后通过食物链进入人体, 人体也有积累镉的特性, 而且镉在人体降解周期很长, 进入人体和温血动物的镉, 主要积累在肝、肾、胰腺、甲状腺和骨骼之中, 使肾脏等器官发生病变, 并引起神经痛和内分泌失调等多种病症, 镉还破坏人体的骨骼系统, 使骨质变脆易折, 造成疼痛而亡<sup>[2]</sup>, 直接威胁人类的健康。所以, 世界卫生组织(WHO, 1972)制定了人们的饮食最低日限量标准是: 成人每天最大采食上限是 60 ~ 70  $\mu\text{g}$ <sup>[14]</sup>。对美国小麦籽粒的调查发现, 即使生长在非污染土壤上的小麦, 籽粒中镉的含量变动在 0.002 ~ 0.207 mg/kg。一些试样超过世界卫生组织(WHO)提出的 0.1 mg/kg

的安全食用上限, 说明即使小麦生长在非污染土壤上, 也可能因为受到大气等镉污染源的污染而使籽粒中镉的含量超出可食用的标准<sup>[22]</sup>。

近年来, 由于工业“三废”的大量排放及不合理处置以及磷肥的大量施用是导致土壤镉污染的主要原因<sup>[8]</sup>, 造成农田和作物的重金属污染日趋严重。镉因其在土壤的高度移动性和对作物的高度毒害性和具有积累和不易消除的特点, 被视为重金属中比较突出及最具有危害性的一种污染元素<sup>[3]</sup>。我国农田重金属污染问题十分突出, 镉污染面积已达  $1.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ <sup>[4]</sup>, 急需一些经济有效、切实可行的方法来解决。

利用生物修复技术(phytoremediation)来净化被镉污染的土壤是近年来高度提倡和需要进一步研究完善的生物工程技术。不同的植物种类和品种对镉的耐性、吸收及富集能力不同。筛选抗镉的植物品种是实现生物修复技术的关键。为了减少食粮的 Cd 积累含量, 人们采取各种农艺措施降低现有栽培品种的 Cd 吸收, 或者是选育低 Cd 积累作物品种<sup>[5]</sup>。

小麦是世界上大多数地区最重要的粮食作物之一, 在我国也是仅次于水稻的第二大类作物, 其产量和品质直接影响着人类饮食水平的提高。目前, “优质、高产、高效、生态、安全”协调发展已成为小麦生产的主要目标。生产低镉积累量的小麦对人类健康至关重要。小麦也是属于耐镉力较强的作物, 镉在小麦植株中的分布是根 > 茎 > 叶。利用小麦的强耐镉能力及镉在植株体内分布极不平衡的这些特性, 种植耐镉能力较强的小麦品种, 在小麦籽实含镉量不超过食品卫生

\* 收稿日期: 2006-08-07

作者简介: 程 杰(1980 - ), 男, 陕西蒲城人, 硕士研究生, 主要从事土壤与植物营养及农业环境保护和食品安全研究。

标准的情况下,可以利用小麦秸秆带走土壤中的镉,同时小麦秸秆用于板材、造纸等行业,既可以切断镉进入食物链,又可以达到逐步清洁污染土壤的目的<sup>[8,16]</sup>。

小麦镉积累具有品种间存在较大差异的特性,在镉污染土壤中种植地上部尤其是籽粒低镉的作物品种,是解决这一问题的新途径之一。有研究表明,植物根系分泌的低分子量有机酸可与土壤中的镉螯合形成“镉低分子量有机酸”复合物,从而促进土壤中镉的释放和植物对镉的吸收<sup>[6,7]</sup>。因此有关镉在土壤-作物系统内的迁移、富集机理及其污染土壤的治理问题引起了我国乃至全世界的高度重视。本文综述近年来小麦镉毒害的研究进展,介绍小麦镉吸收及其在各部位的积累规律和生理生化特性反应,以讨论生产低镉或无镉污染的小麦途径。

## 1 镉对小麦生理生化特性及幼苗生长影响的研究

当镉在土壤与大气等环境中含量达到或超过伤害阈值时,可引起小麦植物生理生化代谢紊乱,品质趋劣,生物量降低,生长受阻,乃至死亡。镉一方面使植物受到伤害,另一方面通过植物根系吸收后,可运输到粮食作物的籽粒、蔬菜茎叶及果实中,通过食物链的传递危害消费者的健康。镉米事件在我国几个地区相继发生<sup>[13]</sup>,由此许多学者在镉污染机理方面作了较深入的研究。

(1) 镉对小麦酶活性的影响。Cd对生物的毒害是通过损害生物体内的酶及其化学性质表现出来的<sup>[11]</sup>。镉离子对植物毒害是由于镉离子诱发高活性自由基,而自由基是导致过氧化的主要原因<sup>[12]</sup>。由于Cd对细胞膜的伤害,破坏了细胞内酶及代谢作用的原有区域性,还可能直接取代某些酶中活性的微量元素或与酶中半胱氨酸残基键结合,而使其受到破坏<sup>[17]</sup>,有关的酶活性也必然受到影响。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物适应多种逆境胁迫的重要酶类,被统称为植物保护酶系统<sup>[18]</sup>。

植物体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)是活性氧自由基清除系统中的重要保护酶之一。有研究表明,SOD和POD活性的提高是一种急性解毒措施,是使细胞免受毒害的调节反应,但其调节能力是临时和有限的,当细胞长时间受到胁迫,细胞内的活性物质包括酶亦会受到损伤而使活性下降<sup>[9]</sup>。但酶活性与Cd浓度有关,张利红等(2005)采用Cd在小麦种子萌发期直接胁迫的方法,研究认为超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性随Cd浓度的增加而增加,丙二醛(MDA)含量和细胞膜透性同样呈上升趋势<sup>[10]</sup>。过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性随着胁迫强度的增加而增强,这说明小麦体内保护酶系统发生了变化<sup>[11]</sup>,也是植物对外界不良环境的保护反应。

(2) 镉对小麦光合色素的影响。Cd对叶绿素含量和光合作用也有不同程度的影响,叶绿素和类胡萝卜素是影响植物叶片光合速率的重要因素。植物体内叶绿素的水平可以作为衡量光合能力强弱的一个指标,其含量的高低可用来表征植物在逆境下受伤害的程度。从张利红等人的研究中可以看出,叶绿素含量在0~0.25 mg/L Cd处理浓度时,叶绿素含量随着镉浓度的增加而提高,到0.25 mg/L Cd处理浓度时达到峰值,其后随Cd浓度的增加,含量则下降<sup>[10]</sup>;还有人研究认为低浓度的镉处理小麦幼苗,其叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b、类胡萝卜素的含量与对照差异不显著,而随着Cd浓度的进一步增大,叶绿素及类胡萝卜素的含量降低<sup>[11]</sup>,这点与前者研究也较为一致。另外,慈敦伟等(2005)选用山农483和川35050两个抗镉毒能力不同的小

麦品种,设置了0,30,50 μmol/L三个镉浓度,研究了小麦幼苗对镉毒的光合及叶绿素荧光响应特性,结果发现,在镉毒害下,小麦叶片光系统I(PSI)明显受损,气体交换参数和叶绿素荧光参数随着镉浓度的升高而显著下降,生物量也随之显著降低。气体交换参数和叶绿素荧光参数与生物量之间呈显著相关,可作为小麦幼苗镉毒鉴定的有效指标<sup>[32]</sup>。

(3) 镉对小麦丙二醛(MDA)和脯氨酸含量的影响。不同镉浓度处理小麦幼苗,各处理间叶片含水量没有显著差异。MDA是膜脂过氧化作用的主要产物之一,其含量可反映膜脂过氧化作用的程度<sup>[11]</sup>或强弱的一个重要指标<sup>[20]</sup>。Cd浓度也直接影响脯氨酸含量,洪仁远等(1991年)研究结果表明,低浓度的Cd(20 mg/L)使小麦幼苗的脯氨酸含量增加较小,高浓度的Cd(50或100 mg/L),则使脯氨酸含量急剧增加<sup>[19]</sup>。同样,随着Cd离子浓度的增加,MDA含量趋于增加,说明镉胁迫引起了膜脂过氧化作用,处理间差异显著;正常生长的小麦叶片的游离脯氨酸含量比较低,随着镉浓度的增加,叶片脯氨酸大量积累,各处理间差异极显著<sup>[11]</sup>。这是由于植物体内的游离脯氨酸与膜脂过氧化作用关系密切,镉胁迫条件下脯氨酸含量的增加,可防止体内水分过分丢失。植物对重金属离子的耐受力与植物体内保护性和适应性反应活化有关。特别是重金属离子可影响多种酶的活性,刺激了金属硫蛋白和植物螯合肽的合成,促进胁迫蛋白和游离氨基酸的积累<sup>[12]</sup>。

(4) 镉对小麦种子萌发与幼苗生长的影响。Cd是植物非必须元素,进入植物体的Cd积累到一定程度时,植物就会受到毒害,出现矮小黄植株,生长迟缓,致使产量下降。有关研究表明,镉对小麦发芽率的影响与Cd离子浓度有关,随Cd浓度升高小麦种子发芽率逐渐降低。无镉处理的小麦发芽率为91.5%,而0.5 mg/L Cd浓度的发芽率仅为55.5%。0.05~0.25 mg/L Cd浓度对小麦种子萌发产生影响,大于0.5 mg/L Cd浓度严重抑制小麦的萌发;在Cd胁迫条件下,小麦的生长受到一定程度的抑制,并随溶液中Cd浓度的增加,抑制程度逐渐加重<sup>[10]</sup>;镉对小麦种子萌发、芽和根的伸长产生抑制作用,生物量显著降低,株高分蘖减少,幼苗生长受到抑制<sup>[11]</sup>。

(5) 镉对小麦根系活力的影响。根系活力是反应根系生命活动强弱的一个生理指标。根系活力与Cd浓度密切相关,在Cd浓度较低时,小麦根系活力随Cd的浓度增加而增高,说明低浓度Cd对根系活力的增高有刺激作用,可能是与植物根系的抗逆性有关。随Cd浓度逐渐增强,毒害作用逐渐增大,根系受害加重,根系活力明显降低<sup>[10]</sup>。这是由于在重金属的胁迫下,植物根系内脱氢酶减少,而脱氢酶的多少是衡量根系活力的重要指标<sup>[13]</sup>。

## 2 镉对小麦镉吸收、分配及积累动态规律的研究

不同作物对镉的吸收、分配和积累效应不同,小麦属耐镉能力较强的作物,但小麦品种之间吸收镉的差异明显。

(1) 镉浓度对小麦品种镉积累及耐镉能力的影响。镉在不同小麦品种间植物体内的分配有一定的差异<sup>[14]</sup>。张国平等(2002)研究了不同镉水平下小麦植株镉含量与积累,认为地上部和根系的Cd含量和积累量随着溶液Cd浓度的上升而显著增加,且在品种间存在极显著的互作,显示出Cd处理反应的品种间差异。地上部Cd含量在低Cd水平下(0.03 mg/kg),两个小麦品种差异不大,在较高水平下,甘谷534显著高于鄂81531;根系Cd含量在(0.03 mg/kg)低水平下,甘谷534显著低于鄂81531,而在0.1 mg/kg Cd水平

下,则是甘谷 534 显著高于鄂 81531,但在 1.0 mg/kg 水平下,甘谷 534 又显著低于鄂 81531<sup>[5]</sup>。

蔡保松等(2003)试验表明,品种特性决定根部特性,根部特性是决定植株吸收镉的最关键所在。在根部积累量最多的为华北 45-4 小麦品种,但在地上部镉积累量仅排在镉积累量由大到小 16 个品种的第 8 位,其小麦的地上部、地下部镉浓度和镉积累量均达极显著水平,说明根部环境中镉浓度对植株中镉的积累起着决定性作用;对照小麦地上部镉含量变化的幅度最大,达 5 倍左右,地下部镉的含量变化幅度在 2 倍左右,说明在极低浓度镉污染下,地上部镉浓度的变化能够更敏感地反映品种间抗镉特性的差异。而在 5 μmol/L 镉处理下,镉迅速在地下部和地上部积累,地上部的镉积累达到对照的 10 倍左右,同时地下部达到 10 倍以上,说明在高镉处理下,根的抗镉机制非常重要<sup>[14]</sup>。

(2) 小麦生育阶段地上部镉吸收动态。有关文献表明,小麦地上部分干物重增加量在不同生育阶段出现 2 次高峰,即:拔节-抽穗期和灌浆中-末期较高,越冬-返青期干物重增加量最低,其他生育阶段介于它们之间。小麦地上部分  $Cd^{2+}$  含量在不同生育阶段的变化趋势:出苗-越冬期含量最高,随后开始下降,至抽穗-灌浆初期  $Cd^{2+}$  含量最低,然后又开始上升至灌浆末期;小麦地上部分在不同生育阶段  $Cd^{2+}$  吸收量的变化趋势:灌浆中-末期  $Cd^{2+}$  吸收量最高,拔节-抽穗期次之,灌浆初-中期再次之,随后依次为返青-拔节期、抽穗-灌浆初期和出苗-越冬期,而越冬-返青期  $Cd^{2+}$  吸收量最低,仅为灌浆中-末期的 1/77;从吸收速率上看,它与吸收量的变化趋势有一些差异,其速率从快到慢依次为:灌浆中-末期、灌浆初-中期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆初期、返青-拔节期、出苗-越冬期、越冬-返青期,其最高速率为最低速率的 319 倍。以上试验结果可以说明,小麦地上部分在不同生育阶段的  $Cd^{2+}$  吸收量变化规律为:生育后期大于生育前期,生长旺盛期大于生长缓慢期,生殖生长期大于营养生长期;灌浆期和拔节-抽穗期  $Cd^{2+}$  吸收量及吸收速率显著高于其它时期; $Cd^{2+}$  吸收量与其干物重增加量呈极显著的正相关( $r=0.916^{**}$ ),吸收速率与其干物重增加量也呈显著的正相关( $r=0.800^{*}$ )<sup>[15]</sup>。

(3) 镉在小麦植株不同器官的分布规律。Cd 在小麦植株的不同部位和器官的积累不同。邵云等(2005)研究了 5 种重金属在小麦腊熟期的分配规律,其中小麦不同器官 Cd 质量分数从大到小依次为:废弃物>叶>根>叶鞘>颖片>穗轴>茎>籽粒。Cd 积累量大小依次为:废弃物>叶>颖片>叶鞘>籽粒>茎>穗轴。可见,小麦植株中较易富集 Cd 的器官是根、叶及废弃物。不同器官 Pd 质量分数依次为:根>废弃物>叶>茎>叶鞘>颖片>穗轴>籽粒。Pd 积累量依次为:废弃物>茎>叶鞘>颖片>叶>籽粒>穗轴<sup>[16]</sup>。

有人通过大田试验,研究 Cd 在小麦植株中的吸收、分配和累积的动态变化规律。结果表明,小麦植株中较易富集  $Cd^{2+}$  的部位是叶、根及废弃物,而籽粒中  $Cd^{2+}$  水平较低; $Cd^{2+}$  是一种不可移动的元素,在衰老部位累积较多,不能被其他未衰老的器官重新利用; $Cd^{2+}$  吸收量与植株干物重增加量呈极显著的正相关( $r=0.916$ ),吸收速率与植株干物重增加量呈显著的正相关( $r=0.800$ );灌浆期和拔节-抽穗期是镉污染控制的关键时期,且  $Cd^{2+}$  吸收量最高, $Cd^{2+}$  吸收速率也最大<sup>[15]</sup>。

(4) 镉浓度对小麦品种矿质养分吸收的影响。低浓度 Cd(0.03 mg/kg)对甘谷 534 和鄂 81531 两小麦品种的生长有促进作用,而高浓度 Cd(>0.3 mg/kg)则显著抑制生长,

且受抑制程度与品种有关,甘谷 534 的耐性相对较强;Cd 处理水平下,地上部和根系的 Cd 含量与品种之间存在显著的互作,低 Cd 水平下(<0.1 mg/kg)甘谷 534 的 Cd 含量较高,而高 Cd 水平下,则以鄂 81531 的 Cd 含量较高;Cd 处理显著影响矿质养分的吸收,鄂 81531 小麦品种在 0.1 mg/kg Cd 水平下,几种大量元素(K、P、Ca、Mg)含量明显低于对照,而甘谷 534 变化相对较小。这也于两品种生长和分蘖对 Cd 处理的反映一致<sup>[5]</sup>。

(5) 小麦籽粒中镉的积累机理。蔡保松和张国平(2002 年)经综合研究指出,同位素标记研究发现,在低浓度下(0.1 ~ 10 μmol/L),镉主要通过韧皮部进入籽粒;在高浓度下(100 ~ 1 000 μmol/L),标记的镉主要停留在标记部位<sup>[23]</sup>。Herren 和 Feller E<sup>[24]</sup>研究表明,镉转移到正在发育的小麦籽粒首先通过穗部韧皮部,再由穗部韧皮部运输到籽粒。虽然硬粒小麦木质部液中镉浓度小于面包小麦木质部液中镉的浓度,但由于硬粒小麦木质部液中的镉通过穗部韧皮部向籽粒中的再运输能力大于面包小麦,最后硬粒小麦成熟籽粒中镉含量反而大于面包小麦籽粒中镉的含量。因此,小麦籽粒中镉的浓度并不决定于木质部液中镉的浓度,而是主要决定于镉从木质部液中再运输到穗部韧皮部的能力。Cakmak 和 Welch<sup>[25,26]</sup>研究发现,土壤的镉可以从叶片运输到韧皮部的其它库器官,如新叶等。

缺锌时,硬粒小麦比面包小麦有更多的镉积累在籽粒中,这可能是硬粒小麦对缺锌比面包小麦更敏感所致。Neil 等应用高积累型和低积累型硬粒小麦,发现籽粒中镉含量与旗叶及其第二、第三叶中镉浓度关系密切,与第三节以下叶片关系不明显。镉在籽粒中积累主要是通过旗叶韧皮部运入籽粒,籽粒中镉的积累是植物体内镉重新分配的结果。叶和茎中的镉可以重新分配运至籽粒中,而籽粒中的镉几乎不再向其他部分运输。由此可以推测,镉的运输可能与光合产物的运输相关联。镉的再运输进入籽粒也与其它金属离子有关,如锌抑制镉的韧皮部装入和运输。因此,可以减少韧皮部运输中镉向籽粒的转移<sup>[27]</sup>。

### 3 镉毒害小麦的防治途径

基于以上小麦受镉毒害的生理反应和对小麦镉吸收、分配及积累规律的分析研究,通常为减少 Cd 进入食物链的可能途径之一是调节土壤中 Cd 的有效性;二是利用或培育吸收 Cd 量少或 Cd 优先吸收保留在根中的优良抗逆小麦品种。但要作好无公害或不超标小麦就应从全方位着手。

(1) 利用腐植酸钠改良土壤。利用改良剂对土壤重金属的沉淀作用、吸附作用和拮抗作用,来降低重金属的扩散性和生物有效性<sup>[21]</sup>是改良土壤的首选措施。因为腐植酸盐在农业及畜牧业生产中已得到广泛应用,对农作物的生长发育及抗逆性具有良好的促进作用,有关研究表明,腐植酸钠处理对小麦幼苗吸收和累积 Cd 产生一定影响,且不同施肥方式在不同程度 Cd 污染土壤中表现出不同的抑制效果。在背景值土壤中,其抑制能力大小表现为:灌施>混施>浸种。但随土壤 Cd 污染程度增加,其抑制效果呈递减趋势。但腐植酸钠不同处理方式在不同程度 Cd 污染土壤中对小麦幼苗生长均表现促进作用。由此可以看出,腐植酸钠是一种性能良好的土壤改良剂<sup>[21]</sup>。

(2) 施用有机肥缓解镉污染的危害。有机质是良好的还原剂,可以促进土壤中的镉形成硫化镉。通过施用有机肥(堆肥、厩肥、尤其猪厩肥、植物秸秆等有机肥),增加土壤有机质,有利于改良土壤结构,增加土壤胶体对重金属的吸附

能力,为土壤提供络合、螯合剂。有关研究表明,有机肥的施用可以明显地降低土壤中有效态镉的含量,其中猪粪的效果优于秸秆类。与此同时还应控制常用化肥的施用,因为化肥中的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}^+$  可以活化土壤中的镉,提高土壤中的交换态镉的含量<sup>[28]</sup>。

(3) 提高土壤的 pH 值。土壤 pH 值对 Cd 毒性有明显影响,Szteke 等<sup>[29]</sup>报道,土壤 pH 对草莓果实中 Cd 的积累有显著影响,在低 Cd 土壤上,土壤的 pH 值越低,果实中 Cd 含量越高,但在高 pH 土壤上,即使土壤中 Cd 含量高,果中的 Cd 含量却很低,通常可以通过在 Cd 污染的土壤上施石灰或过磷酸钙等碱性物质来提高土壤的 pH 值,降低 Cd 的毒害<sup>[29]</sup>,这也是小麦防镉害的一种可取方法。

(4) 培育和选种抗镉或镉吸收低的小麦品种。因为不同小麦品种的根系对镉吸收的保持能力差异很大,所以,应首先选择种植对镉吸收低的或能将镉固定在小麦根茎部(有关试验显示,根部吸收镉量是茎部的 10 倍左右)的品种,因为小麦根部镉吸收量大而籽粒中含镉量少的品种类型是人们所希望的小麦品种;同时,通过对不同品种的生理指标检测,有意识地选择低的镉钝化起始浓度和大的液泡对镉钝化产物的贮藏能力品种,是培育抗镉小麦品种的一条途径<sup>[28]</sup>。

(5) 适当施用降低小麦籽粒镉含量的化学物质。有研究表明,锌可以降低籽粒中镉的含量;还可利用某些有机酸(如柠檬酸)、小分子化合物(如低分子量的二羧酸)进行调节镉在小麦籽粒中的积累<sup>[28]</sup>。叶亚新等(2005)在土壤加入一定剂量(10 mg/kg)的稀土镧后,对镉污染下的小麦萌发及幼苗的生长与代谢有一定的缓解效应,可减轻镉对小麦的伤害

#### 参考文献:

- [1] 利锋. 镉污染土壤的植物修复[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(8): 23 - 26.
- [2] 熊治延. 植物抗污染进化及其遗传生态学代价[J]. 生态学杂志, 1997, 16(1): 53 - 57.
- [3] Costa G, Morel JL. Efficiency of  $\text{H}^+$  - ATPase activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuce[J]. J Plant Nutr, 1994, 17, (4): 627 - 637.
- [4] Cen H - M(陈怀满). Situation, trend and solving strategy about soil pollution of China[J]. Adv pedol(土壤学进展), 1990, 18: 53 - 56.
- [5] 张国平, 深见元弘, 关本根. 不同镉水平下小麦对镉及矿质养分吸收和积累的品种间差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 454 - 458.
- [6] Jones D L, Darrah P R, Doehlan L V. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in the rhizosphere and its potential role in root iron uptake [J]. Plant Soil, 1996, 180: 57 - 66.
- [7] Krishna murti G S R, Cieslinski G, Huang P M, et al. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids - implication in cadmium availability [J]. J. Environ. Qual., 1997, 26: 271 - 277.
- [8] 李惠英, 田魁祥, 赵欣胜. 不同小麦品系耐镉能力对比研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 279 - 282.
- [9] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd, Fe 及其复合污染对烟草生理的影响[J]. 环境科学学报, 1990, 10(4): 499 - 502.
- [10] 张利红, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 458 - 460.
- [11] 李子芳, 刘惠芬, 熊肖霞, 等. 镉胁迫对小麦种子萌发幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 17 - 20.
- [12] Talanova V V, Titov A F, Boeva N P. Effect of Increasing Concentration of Heavy Metals on the Growth of Barley and Wheat Seedlings[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2001, 48(1): 119 - 123.
- [13] 叶亚新, 金进, 王金虎. 稀土镧对镉胁迫小麦的防护效应[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(5): 761 - 763.
- [14] 蔡保松, 曹林奎. 镉对小麦生长发育的影响及其基因型间差异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 62 - 66.
- [15] 姜丽娜, 邵云, 李春喜, 等. 镉在小麦植株体内的吸收、分配和累积规律[J]. 研究河南农业科学, 2004, (7): 13 - 17.
- [16] 邵云, 姜丽娜, 李向力, 等. 五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 204 - 207.
- [17] 杨居荣, 贺建群, 等. Cd 污染对植物生理生化的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193 - 197.
- [18] Fridovich I. The biology of oxygen radical[J]. Science, 1978, 201: 875 - 880.
- [19] 洪仁远, 蒲长辉. 镉对小麦幼苗的生长和生理生化反应的影响[J]. 华北农学报, 1991, 6(3): 70 - 75.
- [20] Mi G R, L G, P J O'Brien. Mechanisms of membrane lipid peroxidation[J]. Recent Advances in Biol Membrane Studies, 1985, 3: 19 - 344.

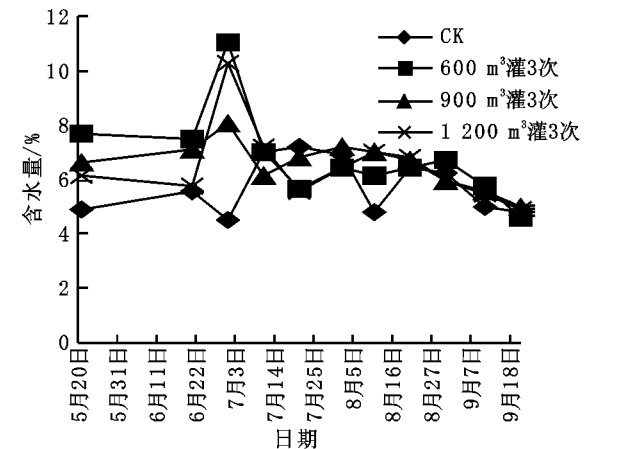


图 27 同一灌水次数不同灌溉次数土壤 60 ~ 100 cm 含水量

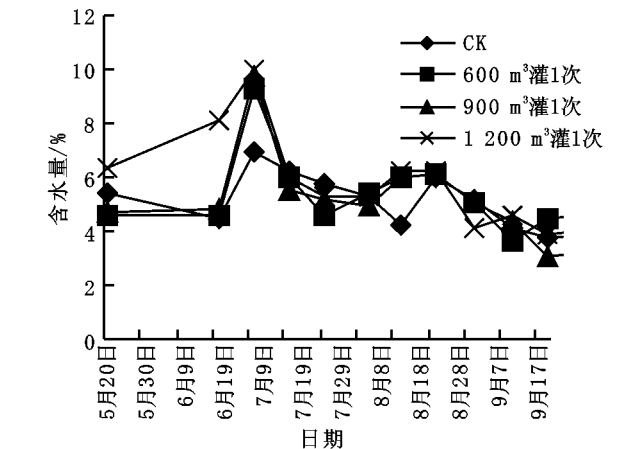


图 28 同一灌水次数不同灌溉次数土壤 0 ~ 100 cm 含水量

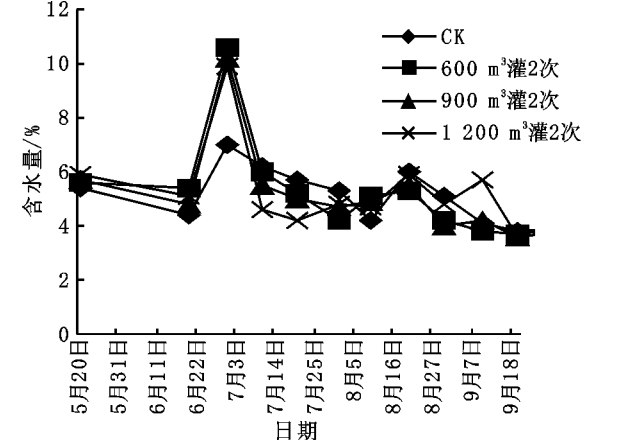


图 29 同一灌水次数不同灌溉次数土壤 0 ~ 100 cm 含水量  
3.2.5 同一灌水次数不同灌水定额对土壤 0 ~ 100 cm 含水量影响

图 28,29,30 分别为同一灌水定额不同灌水次数的土壤 0 ~ 100 cm 含水量的变化情况。水分变化特征曲线显示,灌水处理土壤含水量高于未灌水的对照处理,特别是在干旱期土壤水处于最低峰值时,灌溉处理的土壤最低含水量亦均高于未灌溉土壤最低含水量。进一步说明了适当增加灌水定

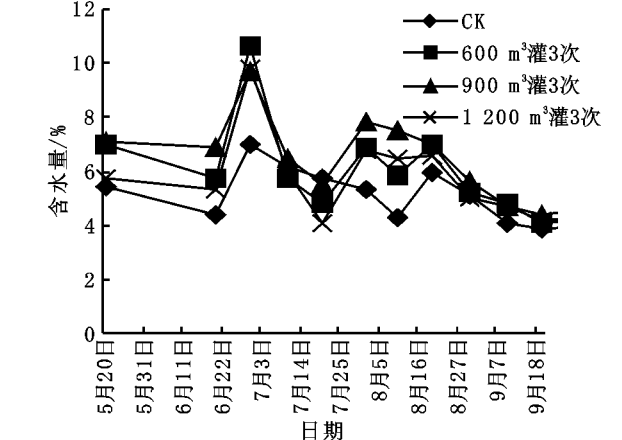


图 30 同一灌水次数不同灌溉次数土壤 0 ~ 100 cm 含水量  
额有利于干旱期整个根系层土壤,即土壤 0 ~ 100 cm 的水含量的保持和蓄积。

4 小 结

适当的增加灌水次数、灌水定额,有利于干旱期整个根系层 0 ~ 100 cm 土壤水含量的保持和蓄积,有利于干旱逆境中植物的生长和发育。

(上接第 221 页)

[21] 马建军. 腐植酸钠对小麦幼苗生长及镉吸收和累积的影响(简报)[J]. 河北职业技术师范学院学报,2001,15(4):58-61.

[22] Guoping Zhang, Motohiro Fukami and Hitoshi Sekimoto. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat[J]. Journal of Plant Nutrition,2000,23(9):1337-1350.

[23] 蔡保松,张国平. 大、小麦对镉的吸收、运输及在籽粒中的积累[J]. 麦类作物学报,2002,22(3):82-86.

[24] Herren T, Feller U. Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat[J]. Journal of Plant Nutrition,1994,17:1587-1598.

[25] Cakmak I, Welch R M, Erenoglu B, et al. Influence of varied zinc supply on retranslocation of cadmium and rubidium applied on mature leaf of durum wheat seedling[J]. Plant and Soil,2000,219:279-284.

[26] Cakmak I, Welch R M, Hart J, et al. Uptake retranslocation of leaf applied cadmium in diploid tetraploid and hexaploid wheat[J]. Journal of Experimental Botany,2000,51:221-226.

[27] Nell S, Harris, Gregory J. Taylor Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation[J]. Journal of Experimental Botany,2001,52:1473-1481.

[28] 王凯荣. 我国农田镉污染现状及其治理利用对策[J]. 农业环境保护,1997,16(6):274-278.

[29] Szeke B, Jedrzejczak R, et al. Influence of the environmental factors on cadmium content in strawberry fruit[J]. Fruit Science Reports,1989,16(1):1-6.

[30] 赵博生,莫华. 镉对蒜根生长的毒害及抗坏血酸、铁盐的解毒效应[J]. 武汉植物学研究,1997,15(2):167-172.

[31] 张金彪,黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报,2000,20(3):514-523.

[32] 慈敦伟,姜东,戴廷波,等. 曹卫星镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 麦类作物学报,2005,25(5):88-91.