

小麦植株对重金属铬吸收累积的研究

张黛静, 邵云, 柴宝玲, 姜丽娜, 李春喜

(河南师范大学生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要:为研究重金属 Cr 在小麦植株吸收、积累规律,为 Cr 污染修复与防治提供一定的依据。试验以矮抗 58 为供试品种,采用大田种植和盆栽试验,测定小麦不同生育期、不同部位的 Cr 含量,研究小麦植株中 Cr 吸收和累积的动态变化。结果表明,小麦植株中 Cr 含量较多的部位为根,而籽粒中含量较低。Cr 的吸收速率以灌浆中末期最快,其次是返青-拔节期,出苗期至分蘖期最慢。并通过测定土壤 Cr 含量、成熟期籽粒 Cr 含量等建立回归方程,以此预测籽粒中 Cr 的含量。

关键词:小麦;Cr;吸收;累积

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0311-05

Uptake and Accumulation of Chromium in Wheat

ZHANG Dai-jing, SHAO Yun, CHAI Bao-ling, JIANG Li-na, LI Chun-xi

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: It frequently occurs that the chromium (Cr) badly affects the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). Controlling Cr uptake is a critical factor for wheat and its growth in Cr polluted environment. The regulation of Cr-uptake and accumulate in wheat plants during their growing were studied. The semi-winter wheat (Aikang 58) was chosen to cultivate in the pot and in the field. The results were as follows: The roots had more Cr than any other wheat organs in the harvest stage. There was a little Cr in the seeds at the same stage. As for the Cr uptake speed, the fastest was in the middle to late filling stage. The speed at returning green stage to jointing stage was slower than that at the filling stage. The speed at seeding stage to tillering stage was the slowest. At the same time, in the pot experiment, the regression equation between the Cr content in soil and mature seeds was set up. So, the content in soil can be known before the wheat are planted, the Cr content in seeds can be figured out.

Keywords: wheat; chromium; uptake; accumulation

铬(Cr)是广泛存在于自然界中的一种重金属元素,环境中的 Cr 主要是 Cr^{3+} 和 Cr^{6+} [1]。 Cr^{3+} 是人体内不可缺少的微量元素,是平衡人类和动物饮食的重要组成部分,它的缺失会引起人类和动物体内葡萄糖和脂质的代谢紊乱 [2]。但过量的 Cr 也能引起严重的毒害,具有强致癌变、致畸变、致突变作用,并且以 Cr^{6+} 毒害最为严重 [3-4]。过量的 Cr 对植物也会造成毒害,在作物根、茎、叶和籽粒中大量累积,不仅影响作物的根和叶的生长发育,导致酶活性下降,造成作物的减产,而且会进入食物链,危及人类的健康 [5]。

小麦是世界上最主要的粮食作物之一,其栽培面积、总产量居各种作物的首位,占谷物总产量的 29.5%。

我国是世界小麦栽培面积和产量最大的国家,总产量居世界小麦总产的 15.5%,成为世界第一的小麦生产大国和消费大国,其品质和安全问题越来越受到人们的广泛关注 [6]。目前, Cr 对不同植物种子发芽及幼苗形态的影响 [7-9]、对植物幼苗生理生化指标的影响 [10-12] 研究较多,而 Cr 在小麦植株内的吸收和累积规律的研究报道较少。

本试验采取大田试验和盆栽试验相结合的模式,系统研究了 Cr 在小麦不同生育时期不同部位的累积、分布规律,建立 Cr 污染的回归方程,以期对最大限度利用土地资源,保证和预防 Cr 污染地区小麦的产量和品质有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种为矮抗 58, 试剂选用分析纯的 $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。

收稿日期: 2008-04-30

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAD02A15, 2006BAK02A25)

作者简介: 张黛静 (1974—), 女, 硕士, 讲师, 从事小麦栽培生理研究。

E-mail: zjdai@163.com

通讯作者: 李春喜 E-mail: 13703731637@sina.com

1.2 试验设计

1.2.1 大田试验

试验于 2006—2007 年在新乡市牧野区曲里村小麦试验田进行,试验地土壤为两合土,pH 7.5~8,整地后施底肥:磷酸氢二胺 $487.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米秸秆全部粉碎成 3 cm 还田。10 月 7、8 日播种,控制基本苗为 $225 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$,机械播种,行距为 16 cm 等距。整个生育期正常田间管理,2007 年 6 月 1 日收获,全生育期 235 d。

取小麦分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、扬花期、灌浆初期、灌浆中期、灌浆末期和成熟期等时期取小麦植株,并将植株分为根、茎、叶、叶鞘、穗轴、颖片、籽粒和废弃物(小麦植株上已变黄的叶片、叶鞘和心叶已死的无效蘖)等部位,测定各个部位的 Cr 含量及小麦收获后土壤中的 Cr 含量。

1.2.2 露天盆栽试验

试验于 2006—2007 年在河南师范大学网室进行,选用 $\Phi 28 \text{ cm} \times \text{h} 30 \text{ cm}$ 的塑料花盆,每盆装土 10 kg(干土),Cr 试剂设 0、50、100、200、300、400 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等 7 个浓度梯度,于播种前将一定量的 $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 与土壤充分混合均匀,同时加入适量肥料。每盆点播 50 粒种子,播深 5 cm,三叶期间苗 10 株,正常措施田间管理。测定不同浓度 Cr 处理污染下种植前土壤 Cr 含量、三叶期地上部分、成熟期根、地上部分和籽粒中重金属 Cr 含量,建立 Cr 污染的回归

方程。

1.3 植物及土壤样品 Cr 含量的测定方法

植物样品依次用自来水、蒸馏水、去离子水洗净后,于 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 烘至恒重,用 FZ102 微型植物试样粉碎机粉碎,过 40 mm 筛。采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消解法消解,消解后的溶液用原子吸收分光光度计(日本岛津公司生产,AA6800 型)测定样品中的 Cr 含量^[13], $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并计算该部位 Cr 的累积量(某部位 Cr 的累积量为该部位 Cr 含量与其干物质质量之积, $\text{ng} \cdot \text{秆}^{-1}$)。

1.4 统计分析

试验结果用 Excel 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 Cr 在小麦植株内吸收、分配和累积的动态变化

2.1.1 不同生育期小麦植株各部位 Cr 含量的动态变化

对不同生育期大田小麦植株各部位进行了检测,其结果见表 1。营养器官中,根中 Cr 含量在整个生育时期表现为“先升后降”的变化趋势。从开始生长到灌浆末期,根部的 Cr 含量逐渐升高,在灌浆末期达到最高,而后下降。分析原因,可能是由于在小麦生长初期,根系在土壤中首先接触到 Cr,进而吸附并固定之,减少 Cr 向其他部位的转移。叶中 Cr 含量在整个生育期表现出“升-降-升”的双峰曲线。在扬花期以前,叶中 Cr 含量变化较小,之后,有增加的趋势,这与

表 1 不同生育期小麦植株各部位 Cr 含量及积累比例动态变化($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Cr content in organs of wheat in different growth stages($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

部位 Organs	根 Root	叶 Leaf	叶鞘 Leaf sheath	废弃物 Aband-onment	茎 Steam	穗轴 Spike Stalk	颖壳 Glume	籽粒 Seeds	总量 Total
分蘖期 Tillering	1.93±0.11 (65.53)	1.015±0.02 (34.47)							2.945(100)
越冬期 Wintering	1.99±0.12 (37.58)	1.79±0.18 (33.80)	0.34±0.01 (6.52)	1.20±0.09 (20.10)					5.295(100)
返青期 Regreening	3.665±0.08 (37.61)	1.50±0.08 (15.39)	0.9±0.08 (9.23)	1.49±0.18 (15.30)	2.19±0.16 (22.47)				9.745(100)
拔节期 Jointing	3.75±0.14 (34.43)	1.38±0.17 (12.67)	1.33±0.14 (12.21)	2.99±0.17 (27.46)	1.44±0.06 (13.23)				10.89(100)
扬花期 Flowing	4.8±0.15 (36.73)	2.545±0.06 (19.47)	1.02±0.09 (7.80)	1.53±0.06 (11.71)	1.795±0.08 (13.74)	1.38±0.18 (10.55)			13.07(100)
灌浆初期 Early filling	4.21±0.12 (32.40)	1.41±0.07 (10.85)	1.27±0.05 (9.734)	1.385±0.03 (10.66)	1.915±0.27 (14.73)	1.3±0.17 (10.00)	1.02±0.17 (7.85)	0.49±0.11 (3.775)	12.995(100)
灌浆中期 Middle filling	5.26±0.21 (35.67)	1.82±0.06 (12.34)	1.25±0.17 (8.48)	1.12±0.11 (7.59)	1.50±0.17 (10.17)	1.485±0.13 (10.07)	1.28±0.20 (9.85)	1.03±0.08 (5.83)	14.745(100)
灌浆末期 Late filling	10.37±0.11 (45.61)	2.69±0.26 (11.83)	1.79±0.28 (7.89)	1.94±0.09 (8.53)	1.765±0.13 (7.76)	1.53±0.13 (6.73)	1.205±0.11 (9.27)	1.44±0.17 (2.38)	22.735(100)
成熟期 Harvesting	5.25±0.24 (23.01)	3.84±0.26 (16.83)	2.77±0.17 (12.14)	3.47±0.16 (15.21)	1.765±0.15 (7.73)	2.44±0.10 (10.69)	1.695±0.20 (7.43)	1.59±0.16 (6.96)	22.82(100)

注:表中第一行数值表示植株各个部位 Cr 的累积量,第二行表示估算基于给定样本的标准偏差,第三行括号中的数值表示植株 Cr 累积量占植株总累积量的百分比。

Note: Figures in the above table represent Cr content in different organs of wheat, the figures in the second row represent the stdev of the sample and figures in the bracket represent the percentage of Cr content to the final Cr content in the plant.

叶在整个生育期的生长速率一致。叶鞘中 Cr 含量变化与根和叶不同,基本上处于较为平稳的上升趋势,在成熟期达到最高峰。废弃物中 Cr 含量略低于根,且变化趋势与叶中的趋势比较相似。这是因为返青之后,无效的分蘖、叶片和叶鞘枯萎,混合成为废弃物,而其成分中枯萎的叶片占很大比重。茎部的 Cr 含量总体为由高至低,在返青期最高,而后降低。说明 Cr 通过茎迁移至叶等器官,但并未在茎中过多累积。

穗部(包括穗轴、颖壳和籽粒 3 个部位)的 Cr 含量从扬花期开始、经历整个灌浆期直到成熟期,均为上升趋势。这一时期也是干物重不断向穗部尤其是向籽粒中累积的过程,Cr 含量的增加与干物重增加同步。在灌浆初期和成熟期,3 个部位 Cr 含量大小均为穗轴>颖壳>籽粒。比较成熟期各个部位之间的 Cr 含量,其高低依次为根>叶>废弃物>叶鞘>穗轴>茎>颖壳>籽粒。根中 Cr 含量最高,而籽粒中含量最低,仅为根中的 30.29%。

2.1.2 不同生育期小麦地上部分各部位 Cr 累积量的动态变化

表 2 表明,地上部分 Cr 的总累积量不断增加,但是不同部位 Cr 的累积特点不同。叶中 Cr 的累积规律为“升-降-升-降”的模式,在灌浆末期达最大值。茎中 Cr 的累积量表现为灌浆初期最高的单峰曲线。穗轴、籽粒和颖壳 3 个部位中 Cr 的累积量的变化规律比较一致,几乎表现为上升趋势。

从拔节期到灌浆末期,茎中 Cr 的累积量最高,其次是叶中 Cr 累积量。当小麦开始灌浆后,随着干物质在籽粒中的充实,穗部的 Cr 含量急剧增加。灌浆初期,颖壳中 Cr 的累积量最高,到成熟期,籽粒中达到

最高,穗轴最低。在成熟期,小麦地上部分各个部位 Cr 的累积量的大小关系为:籽粒>茎>颖壳>叶鞘>叶>废弃物>穗轴。

2.1.3 小麦地上部分在不同生育阶段 Cr 吸收的动态变化

表 3 分析了小麦在不同生育阶段 Cr 吸收的动态变化。在整个生育期中,小麦的地上部分的干物质累积最快的时期集中在拔节期至开花期之间,而且在后一段时间累积速率最高,之后又逐渐下降,在灌浆中后期到成熟期干物质含量不再增加,Cr 含量增量亦减少。

不同生育阶段地上部分 Cr 的平均含量也不相同。在越冬至拔节期较高,之后降低。Cr 的吸收量在不同生育时期的大小关系为:灌浆中-末期最高,返青-拔节期次之,出苗-分蘖期最小,为灌浆中-末期的 1/5 左右。Cr 的日吸收速率与吸收量的变化有相似之处,也是在灌浆中-末期和返青-拔节期较高。其吸收速率由快到慢的次序为:在灌浆中-末期>返青-拔节期>拔节-扬花期>灌浆末期-成熟>扬花-灌浆初期>灌浆初-中期>分蘖-越冬期>出苗-分蘖期。其中,灌浆中-末期日吸收速率为出苗-分蘖期的 14.7 倍。

2.2 土壤、三叶期根和叶、成熟期籽粒中 Cr 含量及籽粒富集系数的变化

表 4 表明,随着土壤中 Cr 含量的增加,三叶期地上部分和成熟期籽粒中相应的 Cr 含量均呈现逐渐增大的趋势;但其增加的数值小于成熟期根部的 Cr 含量。当 Cr 浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤实测 Cr 含量为 $517.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在成熟期根部的 Cr 含量为 $176.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时籽粒中的 Cr 含量仅为 $2.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅

表 2 不同生育期小麦地上部分各部位 Cr 累积量($\text{ng} \cdot \text{秆}^{-1}$)
Table 2 Cr accumulation in up-ground organs of wheat in different grown stages

部位 Organs	叶 Leaf	叶鞘 Leaf sheath	废弃物 Aband-onment	茎 Steam	穗轴 Spike Stalk	颖壳 Glume	籽粒 Grains	总量 Total
分蘖期 Tillering	285.2(100)							285.2(100)
越冬期 Wintering	778.7(86.46)	119.8(13.30)	2.1(0.24)					900.6(100)
返青期 Regreening	690.0(46.61)	373.5(25.22)	329.3(22.24)	87.6(5.92)				1 480.4(100)
拔节期 Jointing	815.4(24.98)	395.0(12.10)	240.8(7.38)	1 813.3(55.55)				3 264.7(100)
扬花期 Flowing	1 379.4(34.32)	547.7(13.63)	215.7(5.37)	2 329.9(57.97)	546.5(13.61)			4 019.2(100)
灌浆初期 Early filling	466.1(10.07)	633.8(13.69)	181.4(3.92)	2 686.7(58.03)	106.6(2.30)	396.8(8.57)	158.8(3.42)	4 630.2(100)
灌浆中期 Middle filling	695.2(14.30)	637.5(13.11)	227.4(4.68)	2 245.5(46.19)	121.8(2.51)	397.7(8.18)	536.6(11.04)	4 861.7(100)
灌浆末期 Late filling	1 205.1(18.61)	567.2(8.76)	417.1(6.44)	2 133.9(32.95)	137.7(2.13)	508.2(7.85)	1 507.7(23.28)	6 476.9(100)
成熟期 Harvesting	564.5(8.23)	764.5(11.14)	340.1(4.96)	1 378.5(20.09)	236.7(3.45)	939.0(13.69)	2 637.8(38.44)	6 861.0(100)

注:表中第一行数值表示植株地上部 Cr 的积累量,表中第二行括号中的数值表示植株地上部 Cr 积累量占植株地上部分总积累量的百分比。

Note: Figures in the above table represent Cr content in over-ground of wheat, and figures in the bracket represent the percentage of Cr content to the final Cr content in the over-ground plant.

表 3 不同生育阶段小麦地上部分吸收 Cr 的变化

Table 3 Dynamic uptake of Cr in up-ground organs of wheat in different grown stages

生育阶段 Growth stages	天数/ d	干物质增量 Added biomass/mg·stub ⁻¹	平均含量 Mean content/mg·g ⁻¹	吸收量 Uptake amount/ mg·stub ⁻¹	吸收速率 Uptake speed/ μg·stub ⁻¹ ·d ⁻¹
出苗-分蘖期 Emeranging to tillering	36	281.0	1.0	285.2	7.9
分蘖-越冬期 Tillering to wintering	42	303.1	1.5	615.4	14.7
越冬-返青期 Wintering to regreening	88	108.1	2.1	579.8	6.6
返青-拔节期 Regreening to jointing	12	636.5	2.1	1 305.0	108.7
拔节-扬花期 Jointing to flowing	12	1 601.5	1.4	1 233.7	102.8
扬花-灌浆初期 Flowing to early filling	10	246.6	1.4	611.0	61.1
灌浆初-中期 Early to middle filling	12	431.4	1.4	341.9	28.5
灌浆中-末期 Middle to late filling	12	63.0	1.7	1 394.2	116.2
灌浆末期-成熟 Late filling to heaving	6	23.0	1.9	494.7	82.4

表 4 土壤、三叶期地上部分、成熟期籽粒中 Cr 含量及根和籽粒富集系数

Table 4 Contents of Cr of soils, up-ground in three leaves stage and grains in mature stage and enrichment coefficients of Cr of roots and grains

处理 Treatment/ mg·kg ⁻¹	土壤含量 Content in soil/ mg·kg ⁻¹	植株 Cr 含量 Cr content in plant/mg·kg ⁻¹				根富集系 数/%Roots enrichment index	籽粒富集 系数/%Grains enrichment index
		三叶期地上 Upground of three-leaves	成熟期地上 Upground in mature	成熟期根 Roots in mature	成熟期籽粒 Grains in mature		
0	5.69	0.33	2.465	4.96	0.057 5	87.17	1.110
50	53.32	0.43	4.715	39.27	0.73	73.65	1.372
100	108.31	0.58	5.13	72.975	1.12	67.37	1.031
200	207.20	0.54	6.29	116.585	1.14	56.27	0.551
300	312.96	0.65	7.24	103.505	1.16	33.07	0.370
400	415.07	4.59	7.26	169.7	1.295	40.88	0.312
500	517.70	9.37	8.725	176.35	2.34	34.06	0.452

为根中 Cr 含量的 1.32%。就地上部分器官中 Cr 含量而言,在成熟期,除 400、500 mg·kg⁻¹ 的两个处理外,每个 Cr 浓度处理下,根、地上部位和籽粒中的 Cr 含量均高于三叶期地上部位的 Cr 含量。成熟期籽粒 Cr 含量远远低于同期根中 Cr 含量。

根、籽粒对 Cr 的富集系数表现出与含量不同的趋势。表现出随着 Cr 浓度增高而降低的趋势,整个生育期中根部富集系数在 33.07%~87.17%之间,根部富集系数最高值是在 Cr 浓度为 0 mg·kg⁻¹ 时,为 87.17%。籽粒的富集系数最高值为 1.372%,Cr 籽粒富集系数在 0.312%~1.372%之间。随着土壤 Cr 含量的增高,其籽粒富集系数总体呈下降趋势。在土壤 Cr 浓度为 500 mg·kg⁻¹ 时,其富集系数仅为 0 mg·kg⁻¹ 时的 4/9 左右。说明小麦在富含重金属 Cr 的土壤中,能够通过一系列自身的保护措施,主要是根部对 Cr 的吸附和固定,限制重金属 Cr 向地上各器官及籽粒的运输。

土壤 Cr 含量、成熟期籽粒 Cr 含量和成熟期根部 Cr 含量之间符合一次线性函数关系,三叶期地上部分与籽粒 Cr 含量之间符合乘幂方程,其方程列于表 5。土壤 Cr 含量、成熟期籽粒 Cr 含量之间回归方程的

r 值均达到 0.99 以上(表 5)。

3 讨论

3.1 Cr 在成熟小麦植株内的分配

本研究结果表明,小麦在成熟时,植株 8 个部位的 Cr 含量由大到小依次为:根>叶>废弃物>叶鞘>穗轴>茎>颖壳>籽粒,这与 Cr 在水稻中的累积规律一致^[14]。成熟期,不同浓度的 Cr 在根和籽粒的富集系数也说明小麦的根能够有效地固定重金属 Cr,从而减少 Cr 在籽粒中的含量。说明小麦根部对重金属 Cr 的富集能力大于其茎叶和籽粒部分,此结果与 Pb、Zn、Cd 等重金属在小麦中的富集规律结论相似^[15-16]。大田试验中,土壤实际 Cr 含量为 395 mg·kg⁻¹,是国家土壤环境质量的 1.975 倍(GB 15618—1995),而籽粒中 Cr 含量为 1.59 mg·kg⁻¹,略高于国家食品安全标准(GB 14961—1994)。而且,在收获时应将植株连根拔起,可以有效地避免根和其他部位的 Cr 残留土壤,而且茎秆也不宜再用作饲料或沤肥,避免其重新进入食物链。

3.2 小麦植株对 Cr 的吸收

小麦的地上部分的干物质累积增量集中在从拔

表 5 土壤、三叶期地上、成熟期根和籽粒 Cr 含量回归分析

Table 5 Regression analysis of contents of Cr of soils and up-ground in three leaves stage and roots and grains in mature stage

变量 Variable	回归方程 Regression equations	r
x(土壤含量)- y(籽粒含量)	$\hat{y}=9E-08x^3-7E-05x^2+0.016\ 3x+0.001\ 7$	0.997 3
x(土壤含量)- y(成熟期根含量)	$\hat{y}=2E-06x^3-0.002x^2+0.822\ 2x+1.773\ 3$	0.974 9
x(三叶期地上)- y(籽粒含量)	$\hat{y}=0.015\ 7x^{0.937\ 1}$	0.972 2

节至扬花开始快速增加。而按照本试验结果,Cr 的吸收量在灌浆中-末期最高,返青-拔节期次之。在黄淮海地区小麦种植中,拔节和开花期正是春季灌溉的关键时期^[7]。因此,实际生产中,在关键时期灌溉时引入清水,或重点在这两个时期进行修复,能否进一步有效降低籽粒 Cr 含量,我们将在以后的试验中进一步加以研究。

3.3 小麦植株和籽粒 Cr 含量的预测

本试验建立了土壤 Cr 含量、成熟期籽粒 Cr 含量和成熟期根部 Cr 含量之间的回归方程和三叶期地上部分与籽粒 Cr 含量之间的乘幂回归方程。通过该方程,可以根据国家食品卫生标准确定土壤 Cr 含量的最高限量,也可以根据土壤、三叶期含量预测出籽粒中 Cr 含量是否超标,从而及早地进行防治和采取相应的措施。例如:我国食品卫生标准规定粮食中 Cr 的最高限量为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,代入回归方程可以得到种植小麦土壤 Cr 含量的最高限量。反之,如果测得土壤中 Cr 含量或小麦三叶期地上部分 Cr 含量,由公式计算也可以推知成熟期籽粒中 Cr 含量值以及其超过食品卫生标准的比例。例如:当测得三叶期地上部分的 Cr 含量为 0.33 和 $0.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可根据公式预测成熟期籽粒中 Cr 含量为 $0.057\ 5$ 和 $0.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,没有超出国家食品卫生标准的要求。

参考文献:

- [1] 李天然. 土壤环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1996: 176.
LI Tian-ran. Soil environmental chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996: 176.
- [2] Adel M Zayed, Norman Terry. Chromium in the environment; factors affecting biological remediation[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 139-156.
- [3] Kleiman L D, Cogliatti D H. Chromium removal from aqueous solutions by different plant species[J]. *Environmental Technology*, 1998, 19(11): 1121-1127.
- [4] Singh A K. Effect of trivalent and hexavalent chromium on spinach (*Spinacea oleracea* L.) [J]. *Environment and Ecology*, 2001, 19(4): 807-810.

- [5] Rena Mfrian T Barbosa, Alex-Alan F de Almeida, Marcelo S Mielke, et al. A physiological analysis of *Genipa americana* L.: a potential phytoremediator tree for chromium polluted watersheds[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007(61): 264-271.
- [6] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 7-8.
CAO Wei-xing. General cultivation of crops[M]. Beijing: Science Press, 2004: 7-8.
- [7] 杨和连, 车灵艳, 卢二乔. 重金属铬对西葫芦种子发芽及出苗的影响[J]. 种子, 2004, 23(6): 60-62.
YANG He-lian, CHE Ling-yan, LU Er-qiao. Effect of Cr on germination of vegetable marrow[J]. *Seed*, 2004, 23(6): 60-62.
- [8] 张义贤. 三价铬和六价铬对大麦毒害效应的比较[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 152-155.
ZHANG Yi-xian. A comparative study of the toxic effects of the trivalent and hexavalent chromium in *Hordeum vulgare* [J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(6): 152-155.
- [9] 石贵玉. 重金属 Cr⁶⁺对水稻幼苗的毒害效应[J]. 广西科学, 2004, 11(2): 154-156.
SHI Gui-yu. The toxic effect of heavy metal Cr⁶⁺ on rice seedling[J]. *Guangxi Sciences*, 2004, 11(2): 154-156.
- [10] 史吉平, 董永华, 韩建民. 铬对小麦幼苗脯氨酸含量的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4): 182-184.
SHI Ji-ping, DONG Yong-hua, HAN Jian-min. Effect of Cr stress on proline content of leaves of wheat[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4): 182-184.
- [11] Panda S K, Chaudhury L, Khan M H. Heavy metals induced lipid peroxidation and affect antioxidants in wheat leaves[J]. *Biologia Plantarum*, 2003, 46(2): 289-294.
- [12] 郭建林, 代西梅, 李欢庆. Cr³⁺对玉米萌发的影响[J]. 河南科学, 2004, 22(1): 140-142.
GUO Jian-lin, DAI Xi-mei, LI Huan-qing. Effect of Cr³⁺ on seed germination of *Zea mays* L[J]. *Henan Sciences*, 2004, 22(1): 140-142.
- [13] 简慧兰, 殷小琴, 张健夫. 微波消解-原子吸收光谱法测定沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr[J]. 光谱实验室, 2007, 24(2): 138-141.
JIAN Hui-lan, YIN Xiao-qin, ZHANG Jian-fu. Determination of Cu, Zn, Pb, Cd and Cr in sediment by AAS under microwave digestion[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2007, 24(2): 138-141.
- [14] Zeng Fanrong, Chen Song, Miao Ying, et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 155(2): 284-289.
- [15] 李晓晨, 马海涛, 冯士龙, 等. 污泥中重金属的形态及在小麦幼苗中的富集[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(3): 1-6.
LI Xiao-chen, MA Hai-tao, FENG Shi-long, et al. Fraction distribution of heavy metals in sludge and their enrichment in wheat seedling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(3): 1-6.
- [16] 邵云, 姜丽娜, 李春喜, 等. Zn 在小麦植株中吸收、分配和累积的动态变化规律[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(1): 82-85.
SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Chun-xi, et al. Study on uptake, distribution and accumulation of Zn in wheat [J]. *Journal of Ruticeae Crops*, 2005, 25(1): 82-85.
- [17] 薛绪掌, 王志敏. 全量基肥不同灌溉制度对小麦生长发育和耗水的影响[J]. 干旱地区资源与环境, 2004, 18(2): 141-146.
XUE Xu-zhang, WANG Zhi-min. Influence of irrigation on growth and evapotranspiration of wheat under whole fertilization before sowing[J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2004, 18(2): 141-146.