第 24 卷第 12 期
2004 年 12 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 24, No. 12
Dec., 2004

# 土壤水分变化对玉米苗期吸收积累镉的影响

黄益宗，朱永官，童依平，胡 莹，刘云霞

（中国科学院生态环境研究中心，北京 100085）

**摘要**：采用土壤盆栽试验研究不同土壤水分含量对玉米苗期吸收积累 Cd 的影响。试验结果表明，玉米生物量及其吸收 Cd 量在玉米不同的生长时期差异较大。22d 收获时，玉米地上部和地下部生物量均随着田间持水量（35%～85%）的增加而提高；而 16d 收获时，玉米生物量在田间持水量为 35%和 85%时比在其它水分时低许多。16d 和 22d 收获时，玉米地上部 Cd 含量在田间持水量 55%时分别达到最大值，55.41mg/kg 和 39.33mg/kg；而在田间持水量 85%时分别达最小值，27.97mg/kg 和 23.52mg/kg。在玉米根系的影响下，土壤溶液 Cd 含量基本上随着玉米的不断生长而降低。田间持水量为 65%时的土壤溶液 Cd 含量比田间持水量为 75%和 85%时大。玉米总吸 Cd 量与水分蒸腾量之间呈极显著的线性正相关关系。

**关键词**：土壤；镉；水分；玉米；吸收

## Absorption and accumulation of Cd in corn: effects by soil water contents

HUANG Yi-Zong, ZHU Yong-Guan, TONG Yi-Ping, HU Ying, LIU Yun-Xia (*Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100085, *China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2832～2836.**

**Abstract**: Cadmium (Cd) contamination in soil has become one of the environmental issues receiving increasing attention worldwide. Cd contamination is resulted from several human economic activities: the application of municipal sewage sludge, atmospheric deposition of Cd, mining activities, application of chemical fertilizers and pesticides. Cd can be transferred to crop plants, and is often accumulated to concentrations exceeding their levels in the soil by many times. The effects of soil water contents (35%, 45%, 55%, 65%, 75% and 85% of field moisture capacity) on uptake and accumulation of Cd by corn (*Zea mays* var. Tiandan No. 8) were investigated in greenhouse experiment. The results showed that both corn biomass (shoot and root) and Cd content varied with soil water contents at different growth stages. At 22d after emergence, the aboveground and underground biomass of corn increased with increasing soil water content, while at 16d corn biomass for field moisture capacity of 35% and 85% were lower than those for other soil water contents. At 16d and 22d, Cd concentration in the shoot reached the maximum, 55.41mg/kg and 39.33mg/kg with field moisture capacity of 55%; while the lowest Cd concentrations of 27.97mg/kg and 23.52mg/kg, were found for the treatment with field moisture capacity of 85%. Due to root activities, Cd concentration in soil solution decreased with corn growth. Soil water contents affected the availability of Cd in soil. Cd concentration in soil solution for field moisture capacity of 65% was higher than that for field moisture capacity of 75% or 85%. There was stronger positive correlation between total Cd uptake by corn and transpiration.

**Key words**: soil; cadmium; water content; corn; absorption

**文章编号**：1000-0933(2004)12-2832-05 **中图分类号**：X503.231，X53 **文献标识码**：A

土壤镉污染越来越成为人们关注的环境问题之一。土壤镉污染来源主要有：长期进行污水灌溉和污泥施用；人为活动引起的大气沉降；矿产资源的不合理开发；以及化肥、农药的大量使用等。位于沈阳市西郊的张士灌区是全国有名的污灌区，灌区土壤镉含量高达 5 mg/kg，生产的稻米含镉量可达 1 mg/kg，超过国家标准 3～5 倍[1]。王庆仁等也报道，我国其它几个典型污灌区

**基金项目**：中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-19)；科技部 973 计划资助项目(2002CB410808)

**收稿日期**：2004-05-29；**修订日期**：2004-10-05

**作者简介**：黄益宗(1970～)，广西南宁人，壮族，博士，助研，主要从事农林生态环境研究。E-mail: hyz@mail.rcees.ac.cn

**Foundation item**: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-19) and Ministry of Science and Technology of China "973" Research Program (No. 2002CB410808)

**Received date**: 2004-05-29; **Accepted date**: 2004-10-05

**Biography**: HUANG Yi-Zong, Ph. D., mainly engaged in agriculture and forestry ecology enviroment. E-mail: hyz@mail.rcees.ac.cn

万方数据

土壤和植物镉含量分别比清洁区偏高[2]。稻田土壤分别施用 22.5、45、120hm² 和 225t/hm² 污泥 1 年后,土壤镉含量比不施用污泥的对照增加 40.74%～87.4%[3]。Anthony 报道[4],施用城市污水和污泥将使土壤的重金属 Hg、Cd、Pb 等含量明显增加。位于广西壮族自治区境内的刁江流域,由于长期不合理的矿产资源开发而导致该流域土壤镉等重金属污染比较严重。据宋书巧等报道[5],刁江流域中重金属污染最严重的金洞村,其农田土壤为 0～15cm 和 15～35cm 时,Cd 含量分别为国家土壤环境质量三级标准的 60 倍和 100 多倍。1995 年广州市约有 9.5%的菜地土壤受到重金属(Cd、Pb、As 等)污染,Cd、Pb 和 As 含量分别是广东省土壤背景值的 2.77、2.97 和 1.40 倍[6]。有人进行过综述[7],我国上海、广州、天津、沈阳、西安等城郊的菜地土壤均受到包括 Cd 在内的重金属的污染。据美国 National Priority List (NPL)显示,在所有调查的 1200 个土壤样点中,约 63%的点受到重金属的污染,其中 Cd 污染占 8%样点[8]。在日本,受 Cd 污染的农田约有 47.2 万 hm²,占重金属污染农田总面积的 82%[1]。

土壤中的镉被农作物、林木、动物吸收和富集后,可经过食物链进入人体从而危害人类健康。重金属镉进入人体后,主要累积在肝、肾、胰腺、甲状腺和骨骼中。使肾脏器官等发生病变,并影响人体的正常活动,造成贫血、高血压、神经痛、骨质松软、肾炎和分泌失调等病症。发生在日本著名的骨痛病主要是因为人们长期食用被矿山和冶炼厂排放的镉所污染的稻米和大豆引起的[9]。防治土壤镉对人体的危害,必须弄清镉从土壤向作物迁移转化的机理,研究作物吸收积累镉的机制。土壤是一个复杂的生态系统,土壤 pH 值、有机质、水分含量、其它离子含量、根分泌物以及微生物活动等因素均影响土壤 Cd 的有效性,进而影响作物对 Cd 的吸收与积累。由于我国国土辽阔,各地区土壤水分含量不一样,有的地区潮湿,有的地区干旱,因此开展不同土壤水分含量对植物吸收积累 Cd 的影响研究比较有意义。

## 1　材料与方法

### 1.1　供试土壤

供试的土壤采自北京市怀柔区 20cm 深的旱地表土,为非污染土壤。土壤采回后经风干、磨碎、过 1mm 筛、保存,以备试验分析及作物培养试验应用。土壤 pH 7.33,有机质 13.6g/kg,CEC 12.42cmol/kg,土壤颗粒组成:粘粒 10.63%、粉粒 68.34%和沙粒 21.03%。

### 1.2　供试玉米

供试玉米由中国农业科学研究院提供,品种为甜单 8 号。种子经 10%$H_2O_2$ 溶液消毒 10min,然后用水冲洗几遍,种子经催芽后直接播种至土壤中。

### 1.3　试验方法

试验设 6 个不同水分含量的处理:土壤田间持水量的 35%、45%、55%、65%、75%和 85%。每个处理均添加 10mg/kg 的纯 Cd(以 $CdCl_2$ 水溶液形式加入),土壤和 Cd 充分混匀后,用去离子水调至不同的水分含量,土壤平衡 1 个月,然后再播种玉米(玉米催芽后直接播种)。试验用盆为特制的 PVC 盆(直径 7cm,高 15cm),每盆装土 550g,栽植 2 株玉米。在装土的过程中,把土壤溶液采样器埋入土壤中,深度约在玉米的根际区内。每盆添加尿素 0.428g/kg、硫酸钾 0.247g/kg 和磷酸氢钙 0.323g/kg 作为玉米生长所需的肥料。试验重复 8 次,共 48 盆。为了便于计算玉米的蒸腾量,试验增加了 2 盆不种植任何作物的土壤处理。每两天用去离子水给玉米补充水分。在浇水前后,称量每盆的重量,并进行记录。试验在可调节光照和温度的培养室内进行,2003 年 12 月 10 日开始移栽玉米,2003 年 12 月 31 日结束。

### 1.4　采样与分析

试验开始后,每 3d 用 10ml 医用注射器抽取土壤溶液,并放置于 4℃的冰箱中保存。试验分两次收获玉米:第 1 次于 2003 年 12 月 25 日,在每个处理中随机抽取 4 个重复来收获;第 2 次直到 2003 年 12 月 31 日收获剩余的处理。植物样品在 70℃的温度下烘干,并分别称量其茎叶及根的干重。土壤溶液样品分析前需进行过滤,而植物样品要经过消解处理。植物样品消解步骤:首先将烘干的样品剪碎,分别称取各处理样品 0.25g 置入消化管中,加入优级纯浓硝酸 5ml,然后放入消煮炉内进行消煮,先在 90℃左右预煮 1h,再调至 160℃消煮,直至植物样品完全消解为止。消化后的溶液用高纯水定容至 50ml 并过滤。用国家物质标准中心提供的污染茶叶样品(GBW 07605(GSV-4))进行方法校正,Cd 回收率为 95 %左右。土壤溶液样品和植物样品中的 Cd 均用 ICP-OES 测定。

## 2　结果与讨论

### 2.1　水分含量对 Cd 污染土壤玉米生物量变化的影响

水分是植物正常生长发育过程中最重要的决定因素之一。植物的光合作用、呼吸作用、水解作用、植物对养分的吸收和运输等重要生命过程均需在有水分的条件下进行。从图 1 可以看出,不同土壤水分含量对玉米的生长影响较大。当玉米的生长期为 16d 时,玉米的地上部干重由土壤田间持水量 35 %时的 0.39g 增加到田间持水量 55 %时的 0.70g;田间持水量在 55%～75%范围时地上部干重达到最大值;而增加到 85%时,玉米地上部干重急剧减少到 0.49g。不同土壤水分含量对玉米地上部干重变化的影响达到极显著水平($p<0.001$)。与地上部干重变化相类似,土壤水分对玉米地下部的生长也有影响($p<0.01$),但是地

万方数据

下部干重除了在土壤水分35%和85%时减少以外，其它水分处理均变化不大。

在生长期为22d时，玉米的地上部干重从水分35%时的0.80g提高到85%时的2.04g，增加1.55倍；根干重从0.46g到0.70g，增加0.52倍。经显著性检验，不同土壤水分含量对玉米茎叶($p<0.001$)和根系($p<0.05$)的生长影响均达到极显著或显著水平。玉米生长期为16d时，玉米生长速度相对较慢，对水分需求量较少，因此土壤水分含量较大时(85%)，玉米的生长将受到抑制；而生长期为22d时，玉米生长速度加快，需水量较大，土壤水分含量即使达到85%玉米生长也较好。

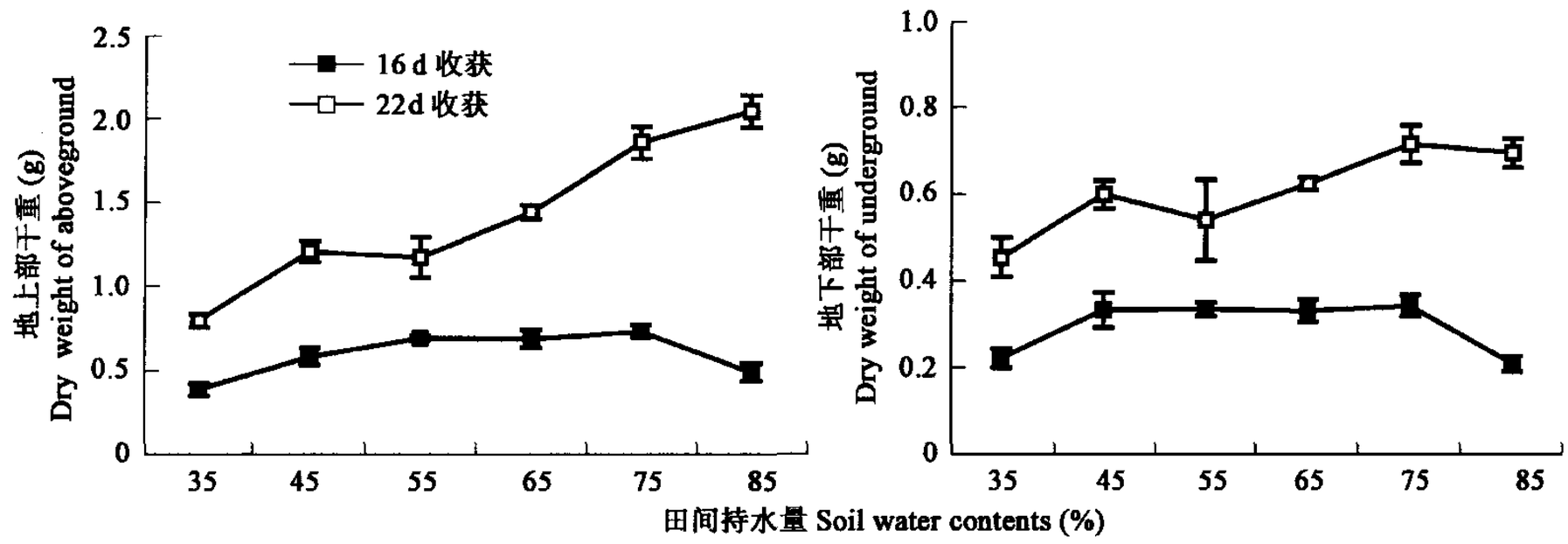


图1 不同水分含量对玉米地上部和地下部干重变化的影响

Fig. 1 Effects of soil water contents on aboveground and underground biomass of corn

## 2.2 水分含量对玉米吸收Cd的影响

不同土壤水分含量对玉米吸收Cd也产生影响。图2显示，玉米生长期为16d时，其地上部吸Cd量在不同的土壤田间持水量下差异较大($p<0.05$)。水分为55%时，地上部Cd含量达到最大值(55.41mg/kg)；而水分为85%时达最小值(27.97mg/kg)。当玉米生长到22天时，虽然其地上部Cd含量在不同的土壤水分条件下呈现出与生长16d时相同的趋势，但是Cd含量明显减少。水分为55%时玉米地上部Cd含量仅为39.33 mg/kg。这可能是因为玉米生长早期吸收Cd较多且生物量较少，导致其地上部Cd含量较高；而随着生长期的不断延长，玉米生物量增加较快，导致其地上部Cd含量降低(即“稀释效应”)。

对玉米地下部而言，生长16d时，地下部Cd含量随着土壤水分的增加而降低($p<0.01$)，由水分35%时的103.92 mg/kg降低到水分85%时的47.23 mg/kg。生长期为22d时，玉米地下部Cd含量也呈下降趋势，由水分35%时的66.15mg/kg下降到水分85%时的52.60 mg/kg。

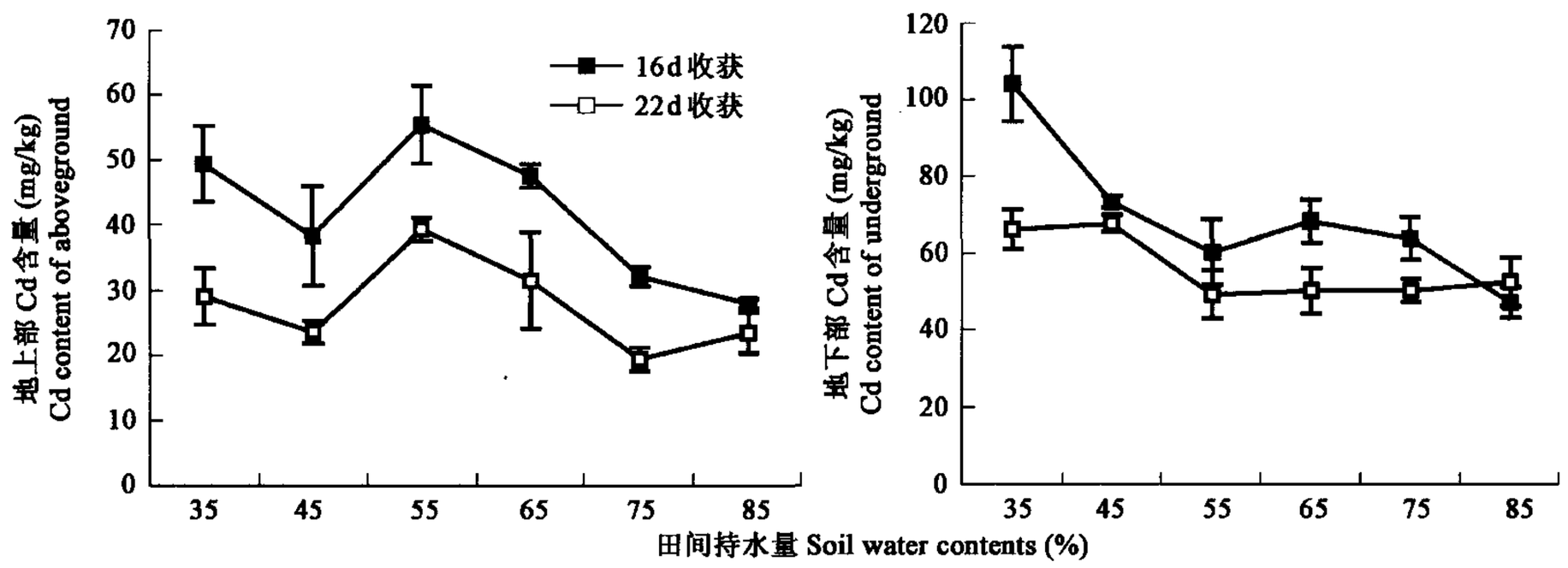


图2 不同土壤水分含量对玉米地上部和地下部Cd含量的影响

Fig. 2 Effects of soil water contents on Cd concentrations in the aboveground and underground of corn

## 2.3 水分变化对土壤水溶性Cd含量的影响

不同土壤水分含量也影响土壤中的水溶性Cd含量。本试验中，由于土壤田间持水量少于65%以下时抽不出足够多的土壤溶液来进行分析，因此只对水分65%、75%和85%时进行讨论。土壤溶液Cd浓度在不同的玉米生长期中随土壤水分变化的大小顺序基本为：65%>75%>85%。其中，土壤水分75%和85%时的Cd浓度大小和趋势变化不大。在这3个不同的土壤水分中，土壤溶液Cd浓度均随着玉米的生长而呈相类似的趋势：刚栽植玉米时，土壤溶液Cd浓度均略有提高，这是因为刚栽植玉米时由于玉米根系的作用(如分泌有机酸等)，导致玉米根际微环境发生变化，提高土壤中Cd的有效性，从而提高土壤溶液中

万方数据

Cd 的浓度;当玉米不断生长时,其吸收 Cd 的量不断增加,导致土壤溶液中 Cd 浓度逐渐降低。许多研究表明,低分子有机酸等根分泌物可影响土壤根际有机结合态镉的形成,从而影响土壤中镉的移动性和生物有效性[10,11]。

### 2.4　蒸腾作用与玉米吸收 Cd 的关系

玉米在生长发育过程中需要吸收和消耗大量的水分,其对水分的需要可用蒸腾强度来表示。图 4 为不同土壤水分含量下玉米在整个生长期内的蒸腾量动态变化状况,由图中可以看出,玉米刚刚移栽至 1 周之内由于玉米植株矮小、生长缓慢,其对水分的消耗较少,蒸腾作用相对较弱,不同土壤水分含量对玉米的蒸腾作用影响不大。但是,随着玉米的不断生长,其需水量急剧增加,不同土壤水分含量对玉米蒸腾作用的影响也明显体现出来。总体来说,土壤水分含量越少,玉米吸收水分就越少,水分蒸腾量相应也较少;相反,土壤水分含量越大,玉米吸收水分就越多,水分蒸腾量也较大。但是,当土壤田间持水量大于 85%时,也不利于玉米水分蒸腾量的增加。

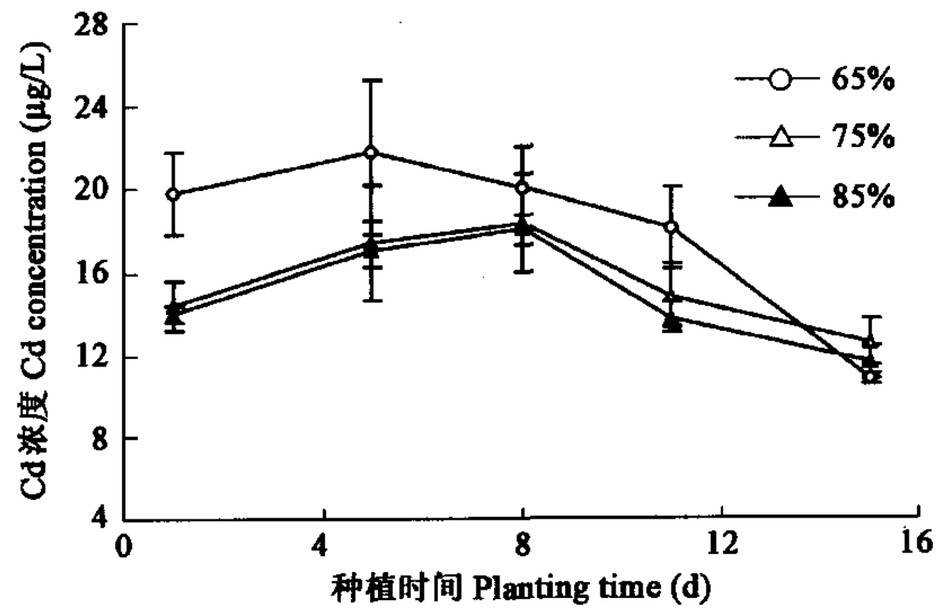


图 3　水分含量对土壤溶液 Cd 含量的影响

Fig. 3　Effects of soil water contents on Cd concentration in soil solution

对玉米的水分蒸腾量与玉米植株吸 Cd 总量关系进行数学回归模拟统计,发现玉米总吸 Cd 量与水分蒸腾量之间呈极显著的线性正相关关系,即玉米植株内 Cd 含量随着水分蒸腾量的增加而提高(图 5)。本文研究结果与大多数研究者的看法一致:植物蒸腾作用是植物吸收 Cd 的主要动力过程,蒸腾作用越强植物吸收 Cd 量就越多[12~14]。

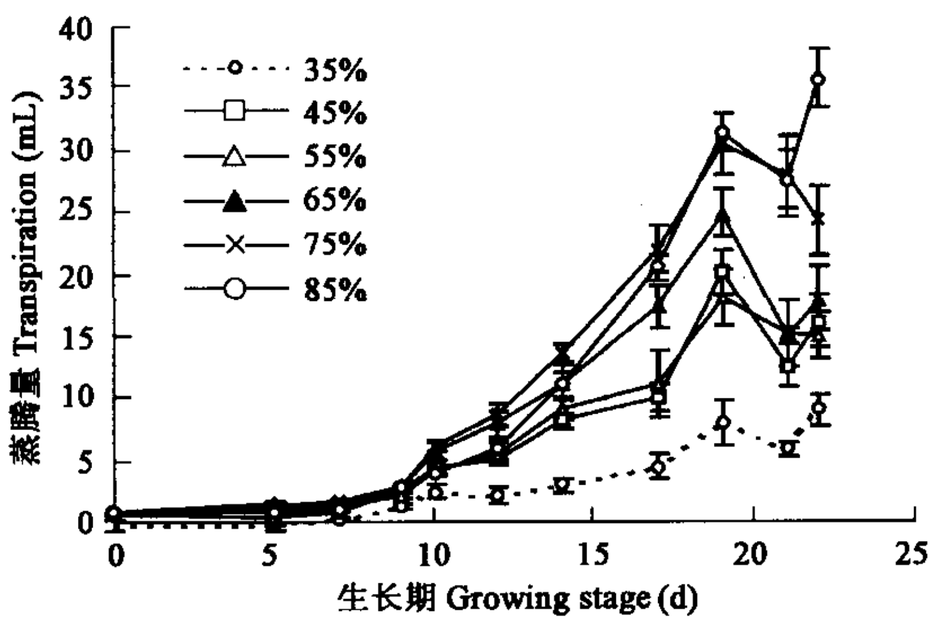


图 4　土壤水分含量对玉米蒸腾量变化的影响

Fig. 4　Effects of soil water contents on transpiration of corn

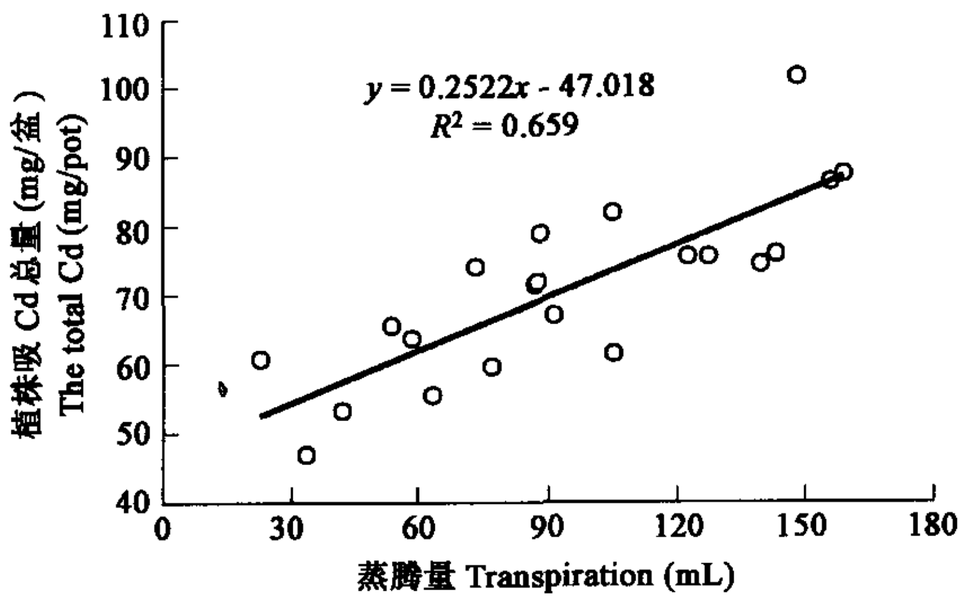


图 5　玉米吸 Cd 总量与水分蒸腾量的线性回归模拟($n=21$)

Fig. 5　The correlation between total Cd uptake by corn and transpiration

## 3　结论

(1)水分变化对 Cd 污染土壤生长的玉米地上部和地下部生物量影响较大,田间持水量 35～85%的各处理间对生物量影响达到显著或极显著水平。不同生长期的玉米对土壤水分含量变化反应有差异。生长 16d 的玉米在田间持水量 85%时地上部和地下部干重均比其它水分处理降低,而生长 22d 的玉米在此水分条件下其地上部和地下部干重却比其它水分处理提高。

(2)玉米地上部和地下部 Cd 含量也受土壤水分含量变化影响。玉米地上部 Cd 含量在田间持水量 55%～85%之间随着土壤水分的增加而降低,其地下部 Cd 含量也表现出相同的趋势。不同收获时间对玉米植株 Cd 含量影响也较大。

(3)土壤溶液 Cd 浓度在玉米生长过程中随土壤水分变化的大小顺序为:65%>75%>85%。玉米的水分蒸腾量随着玉米的不断长大而增加,土壤水分含量越大,玉米吸收水分就越多,水分蒸腾量也越大。玉米总吸 Cd 量与水分蒸腾量之间呈极显著的线性正相关关系。

**References:**

[1] Liao Z J. *Environmental Chemistry of Microelements and Their Biology Effects*. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1993. 299～303.

[2] Wang Q R, Liu X M, Cui Y S, *et al*. Soil contamination and sources of heavy metals at individual sites of industry and mining associate with wastewater irrigation in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(3): 354～358.

万方数据

[3] Wang X, Chen T, Liang R L, *et al.* Effects of land utilization of sewage sludge on crops and soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(2): 163～166.

[4] Anthony C. Methyl mercury contamination and emission to the atmosphere from soil amended with municipal sewage sludge. *J. Environ. Qual*, 1997, **26**(6): 1650～1654.

[5] Song S Q, Liang L F, Zhou Y Z, *et al.* The situation and remedial measures of the cropland polluted by heavy metals from mining along the Dianjiang River. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, **22**(2): 152～155.

[6] Dai J, Liu T H. Contaminated characteristic of vegetable field in Guangzhou, China. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, **26**(3): 102～104.

[7] Zhou J L, Chen T B. Situation and prospect of research on heavy metal pollution in vegetables and soils for vegetable cultivation in urban areas of China. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2002, **22**(5): 476～480.

[8] Hazardous Waste Consultant. Remediating Soil and Sediment Contaminated with Heavy Metals Nov/Dec. Elsevier Science, Netherlands. 1996.

[9] Yamagata N, Shigematsu I. Cadmium pollution in perspective. *Bull Inst Public Health*, 1970, **19**: 1～27.

[10] Krishnamurti 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. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26** (1): 271～277.

[11] Onyatta J O, Huang P M. Kinetics of cadmium release from selected tropical soils from Kenya by low-molecular-weight organic acids. *Soil Science*, 2003, **168** (4): 234～252.

[12] Zhang G H. Relation between biological harmfulness of cadmium and water variation. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1997, **19** (3): 61～66.

[13] Hardiman R T, Jacoby B. Absorption and translocation of Cd in bush beans (Phaseolus vulgaris). *Physiol Plant*, 1984, **61**: 470～474.

[14] Hagemeyer J, Kahle H, Breckle S-W, *et al.* Cadmium in *Fagus sylvatica* L. trees and seedlings: leaching, uptake and interconnection with transpiration. *Water Air and Soil Pollution*, 1986, **29**: 347～359.

**参考文献:**

[1] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 299～302.

[2] 王庆仁, 刘秀梅, 崔岩山, 等. 我国几个工矿与污灌区土壤重金属污染状况及原因探讨. 环境科学学报, 2002, **22**(3): 354～358.

[3] 王新, 陈涛, 梁仁禄, 等. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究. 应用生态学报, 2002, **13**(2): 163～166.

[5] 宋书巧, 梁利芳, 周永章, 等. 广西刁江沿岸农田受矿山重金属污染现状与治理对策. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(2): 152～155.

[6] 戴军, 刘腾辉. 广州菜地生态环境的污染特征. 土壤通报, 1995, **26**(3): 102～104.

[7] 周建利, 陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与展望. 湖北农学院学报, 2002, **22**(5): 476～480.

[12] 张光辉. 镉的生物危害效应与水分变化的关系. 西安地质学院学报, 1997, **19**(3): 61～66.

万方数据