

镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因子

崔玉静, 赵中秋, 刘文菊, 陈世宝, 朱永官*

(中国科学院生态环境研究中心中澳土壤环境研究室, 北京 100085)

摘要: 环境镉(Cd)污染对微生物、植物、动物和人体均可产生较大的危害。食物链是镉对普通人群造成健康危害的主要途径之一。污染土壤中的¹ 镉通过植物根系吸收与体内转运最终在植物可食部分中积累。Cd 通过食物链进入人体并在体内蓄积受许多因素的影响, 这些影响因素主要有 3 个方面: 土壤性质(土壤含镉量、pH、有机质、粘土矿物和土壤养分状况), 植物特性(包括基因型差异、根际过程和植物生理机制)和人体微量元素营养状况等因素。本文就镉在食物链中迁移积累及其调控机理的研究进展进行简要的综述。

关键词: 食物链; 镉(Cd); 矿物质; 影响因子

Transfer of cadmium through soil-plant-human continuum and its affecting factors

CUI Yu-Jing, ZHAO Zhong-Qiu, LIU Wen-Ju, CHEN Shi-Bao, ZHU Yong-Guan*

(Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2133~2143.

Abstract: Cadmium is a non-essential element with no known benefits to plants, animals and humans. However, due to geological processes (parent rocks) and anthropogenic sources (mining and smelting, fertilizer application and waste disposal), Cd in the environment has been increasing worldwide in the last two centuries or so. Unlike other metals, Cd is mobile in soils, and can be easily transferred from soil to plants leading to food safety problems. It has been generally recognized that food chain is a key pathway through that cadmium in the environment affects human health adversely. Accumulation of cadmium in the bodies will eventually cause renal dysfunction and other diseases, and this has been reported in many countries, such as Japan and China.

There are several steps that control the transfer of Cd from the soil to humans. The first one is plant uptake from soils, and factors such as soil total Cd, clay contents, organic matter contents, other nutrients (P, Zn), pH and plant genotypes can affect plant uptake processes. The second step is the redistribution of Cd within plants, this depends on plant genotypes and nutritional status of the plant. The third step is the bio-accessibility of Cd in foodstuffs. In this last step, the key controlling factor is the micronutrient (Fe, Ca and Zn) status of the person of concern. Marginal iron, calcium or zinc deficiency in

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20207012); 国家 973 重点基础发展规划资助项目(No. 2002BC410808)

收稿日期: 2003-01-23; **修订日期:** 2003-05-30

作者简介: 崔玉静(1959~) 女, 辽宁省人, 博士, 主要从事土壤环境与健康研究。

* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: YGZhu@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 20207012), State Key Basic Project (No. 2002BC410808)

Received date: 2003-01-23; **Accepted date:** 2003-05-30

Biography: CUI Yu-Jing, Ph. D., engaged in research on the soil environment and human health.

the diet can significantly increase the bio-accessibility of Cd in foodstuffs.

In order to mitigate the adverse effects of environmental Cd contamination, it is necessary to investigate the mechanisms involved in the transfer of Cd through food chains to human and the factors that influence Cd absorption and accumulation in both plants and humans. Therefore, the study on cadmium in soil-plant-(animal)-human continuum has been a focus in environmental science worldwide since the late 1980s. This paper attempts to provide an overview on recent advancements in studies on the factors that influence Cd transfer through food chain to human.

Key words: cadmium; food chain; human health; mineral nutrition; soil contamination

文章编号: 1000-0933(2003)10-2133-11 中图分类号: X171, X501 文献标识码: A

镉作为人体非必需元素是毒性最强的重金属元素之一。土壤环境中的镉主要来自工业废物排放、污水灌溉、大气沉降和长期施用磷肥。土壤中的镉通过植物根系吸收和体内转运最终在植物可食部分中积累。由于 Cd 在人体内的半衰期通常可达 20~40a, 人若长期摄入含有 Cd 的食物, 就会使 Cd 在体内积累进而对普通人群造成健康危害。镉在食物链中迁移并通过食物链进入人体造成健康危害的过程受许多因素的影响。研究这些影响因子的作用机制对于开发对镉低吸收积累的作物品种和控制环境镉对人体造成的健康危害具有重要的现实意义。

1 食物链中 Cd 的来源

镉通过食物链进入人体而造成人体健康损害, 因而食物链是普通人群镉暴露的主要途径。食物链中的镉主要来自土壤。当人为因素使土壤镉显著增加时, 食物链中的镉就会增加并将对人体健康产生有害影响。镉既可以通过人为作用也可以通过自然过程进入土壤。镉在土壤中的循环及从土壤到人体的迁移是一个极为复杂的动态过程, 可以简单的归纳为图 1 所示。

自然过程对土壤镉的贡献主要通过岩石风化和火山活动等地质和环境地球化学过程, 通过这种方式进入土壤中的镉在很大程度上取决于区域地理状况。人类活动对土壤镉的贡献也有很大的区域性。据报道, 在欧洲, 进入土壤的镉大约一半来自大气, 而大气中的镉主要来源于化石燃料和垃圾焚烧等人为因素造成的大气镉污染^[2]。在中国, 关于大气沉降对土壤镉污染的贡献尚没有系统的报道, 但是普遍认为工业废物和污灌可能是农田土壤镉污染的主要来源之一^[3]。

1.1 自然过程对土壤镉的贡献

虽然有关一些区域的土壤镉含量及其分布状况已经有大量文献报道, 但全球究竟有多少镉通过自然排放进入土壤还不甚明了。人们还不能确定镉从几种主要类型的母岩风化进入土壤的速率, 但很资料表明可能小于人类活动造成的土壤镉增加和积累的速率。

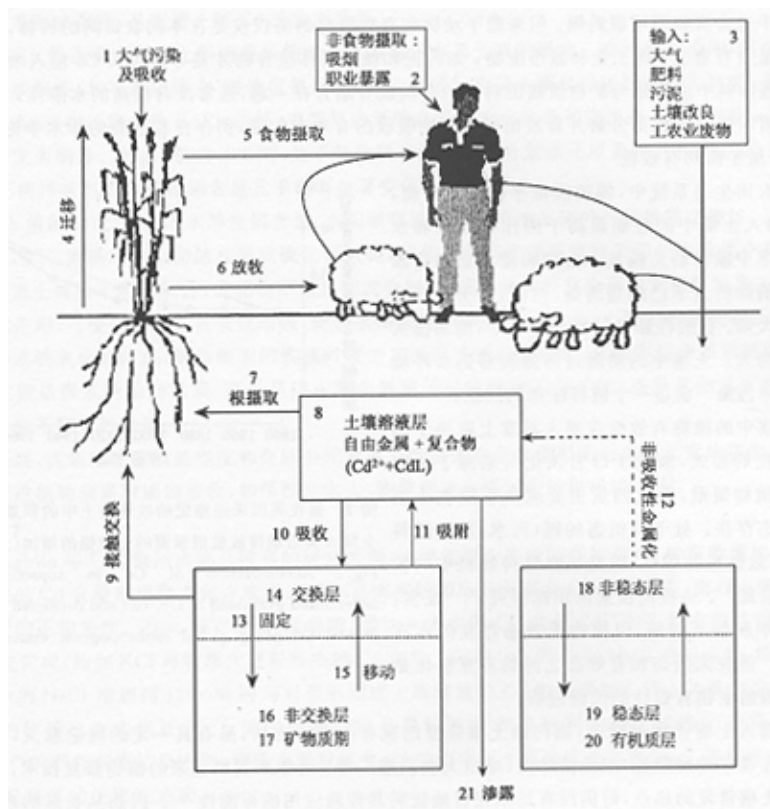
一般来说, 水成岩的含镉量高于火成岩, 而磷灰石的含镉量最高(表 1)。后者对于镉在食物链中的积累具有重要意义。这是因为在磷肥生产中, 沉积在磷灰石中的镉被混入磷肥中而被施入土壤, 然后再通过土壤-植物系统迁移到动物和人, 最终导致人类健康的危害。

通过其它渠道进入土壤的镉, 如植物残体、动物粪便等虽然也可影响土壤中镉的有效性, 但其主要影响是使土壤——植物系统中的镉重新分布, 不能列入土壤镉的实际输入量。然而, 通过自然过程排放到大气中的 Cd 却是值得注意的。据估计, 1988 年排放到大气的天然镉(如, 火山活动)已增加到 1 000t/a 左右^[4]。

表 1 几种常见岩石的含镉量(mg/kg)^[5,6]

Table 1 Cadmium concentrations (mg/kg) in some common rock types^[5,6]

岩石类型 Rock type	范围 Range	均值 Mean
火成岩 Igneous		
花岗岩 Granites	0.01~1.60	0.2
玄武岩 Basalts	0.01~1.60	0.13
变质岩 Metamorphic		
片麻岩 Gneisses	0.01~0.26	0.04
片岩 Schist	0.01~0.87	0.02
水成岩 Sedimentary		
页岩 Shale	0.02~11	0.8
斑脱土 Bentonite	0.02~11	1.4
碳酸盐岩 Carbonates	0.01~12	0.07
磷灰石 Phosphorite	0.90~980	—

图 1 镉在土壤-植物-动物-人体中的循环^[1]Fig. 1 Dynamics of cadmium in soil-plant-animal-human continuum^[1]

1. Atmospheric contamination & uptake; 2. Non-food intake: smoking, occupational exposure; 3. Input: atmosphere, fertilizer, sewage biosolid, soil amendment, industrial and agricultural waste; 4. Translocation; 5. Food intake; 6. Grazing; 7. Root uptake; 8. Soil solution pool, Free metal + complexes ($\text{Cd}^{2+} + \text{CdL}$); 9. Contact exchange; 10. Absorption; 11. Adsorption; 12. Non-assimilatory metalization; 13. Fixation; 14. Exchangeable pool; 15. Mobilization; 16. Non-Exchangeable pool; 17. Mineral phase; 18. Labile pool; 19. Non-Labile pool; 20. Organic phase; 21. Leaching

1.2 人类活动对土壤镉的贡献

人类活动对全球土壤镉的贡献已大大超过自然释放的镉对土壤的输入量^[4]。自从上个世纪以来,由于城市和工业化步伐的加快,大气沉降明显增加了土壤中镉的含量。在英国进行的草地土壤抽样分析^[7]表明,土壤中镉的积累速率与用于预报全球人类活动排放到大气中镉的数据基本一致(图2)。

此外,农业生产活动,如施用化肥,石灰,有机废物和污泥等也会增加土壤镉的输入量。与无机氮肥和钾肥相比,磷肥是对土壤镉贡献最大的肥料^[8]。磷肥中的镉主要来源于生产磷肥所用的磷灰石。磷灰石中镉浓度因世界各地的差异而有很大的变异。沉积岩含镉的浓度通常高于火成岩。在岩石中,大部分镉是以不溶态的形式存在的,在磷肥生产过程中镉可由不溶态转变成水溶态^[9],从而增加其植物有效性。Mortvetlt 和 Osborn^[10]的研究表明,磷肥中镉的植物有效性与磷酸氢镉或其混合物的植物有效性相似。镉通过施用化肥向土壤输入的速率具有地区差异性^[11]。而这种差异性取决于区域地理位置和磷肥的生产技术及其施用量。

有机肥中也含有相当可观的镉。但来源于动物和有机肥料的镉仅仅是在不同农田间的转移,对土壤镉的实际输入量没有意义,而工业和城市废物,如污泥和城市固体废弃物才是导致农田 Cd 输入增加的主要原因。在这些物料中由于镉与矿物质或肥料中的有机成分结合在一起,通常没有很高的水溶性。至于有机物质能否随着时间的推移而分解并释放出可被植物吸收的有效态的镉,仍存在着重要的学术争论^[12,13]。

1.3 镉的质量平衡和有效性

在许多农田生态系统中,镉的质量平衡是正平衡,也就是说,输入土壤中的总镉量高于因作物吸收和水土流失从土壤中输出的总镉量。土壤镉随着肥料增加并在生产中消除的速率已相当清楚,然而,关于镉的滤出量却鲜为人知。在酸性膨松结构的土壤中,滤出损失量可能会相当大。土壤中的镉通过渗滤转移到水环境进而造成水体污染^[2]也是一个值得注意的问题。

镉在土壤中的植物有效性在很大程度上取决于镉在土壤中以何种形态存在,来源于母岩风化与来源于化肥的镉均可被植物摄取,吸收的量主要取决于镉在土壤中以何种形态存在。处于有机态的镉(污水,混合肥料等)其植物有效性最初较低,但是镉在这种物料中的长期命运还不清楚^[7]。一些同位素的示踪研究^[14,15]证实:在某些土壤中所加入的镉,以植物无效态存在的占有很大的比例。镉在无效态和有效态之间的相互转化是决定土壤中镉的生物有效性的关键过程。

镉一旦进入土壤就很难除去,镉污染土壤修复的现有技术和方法,虽有其一定的理论意义,但在实际应用上都存在着某种局限性,如价格昂贵,难以大面积推广等。近年来发展起来的植物修复技术,因其经济便宜已成为土壤修复的热点,但仍没有足以完善地证明其普遍应用的可能性^[16]。因而从长远的观点来看,减少人类活动对土壤镉的贡献从而控制土壤镉的增加具有极为重要的意义。

2 植物对 Cd 的吸收及其影响因素

有人在不同的温室和田间实验中观察到^[17~19],当施加 Cd^{2+} 使土壤 Cd 增加时,植物 Cd 的吸收即会随着土壤 Cd 的增加而成比例地增多,这种呈线性增加的趋势保持在一定的环境范围(大约 20mg/kg)。超过这个范围,就会呈曲线趋势^[20]。一般认为: Cd 的迁移系数,既植物体内 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度的比率是植物与土壤间相关直线的斜率^[21]。但这并不意味着植物 Cd 可以简单的通过土壤的 Cd 浓度进行预报,因为 Cd 的迁移系数在很大程度上受多种因素的影响。对世界不同地域进行的土壤调查表明,土壤 Cd 含量只能对作物 Cd 含量的变化作不到 20% 的解释^[22~24]。因而除了土壤 Cd 含量之外,还有一些其他因素也会影响作物对 Cd 的吸收,如土壤有机质和 pH。Chaney 等研究发现,影响植物吸收土壤 Cd 的最重要因素是来自土壤方面的 pH, Cd, Cd , Zn , Cl , 金属螯合剂及有机质^[25,26]和来自植物方面的作物种类,品种及耕作方式等^[8,27,28]。

2.1 pH, Eh

一般说来,田间作物的 Cd 含量通常与土壤 pH 呈负相关的关系,土壤 pH 值越低, Cd 被解吸的越多,其活性就越强,从而加大了土壤 Cd 向植物体内的迁移量。但这种影响通常是有限的^[22,24]。Gavi 等^[29]的试验表明,当土壤 pH 从 4.5 增加到 6.2 时,小麦子实中 Cd 的浓度下降 4 倍左右,但当 $\text{pH} > 6.2$ 或 < 4.9 时则没有任何进一步的变化趋势。通常,增加土壤的 pH,会降低自由 Cd^{2+} 的活性,使土壤 pH 从 5.6 增加到 6.9 会使其溶液中 Cd^{2+} 的活性下降 5.7 倍,但马铃薯根茎的 Cd 含量只下降 1.2 倍。这种情况可能与土壤 pH 值增高使根部吸收 Cd^{2+} 的亲合力增强从而阻碍了土壤 pH 对 Cd^{2+} 吸收的影响有关^[30]。廖敏等人^[31]的试验表明,当 $\text{pH} > 7.5$ 时,94% 以上的水溶态的 Cd 进入土壤中,这时的 Cd 主要以粘土矿物和氧化物结

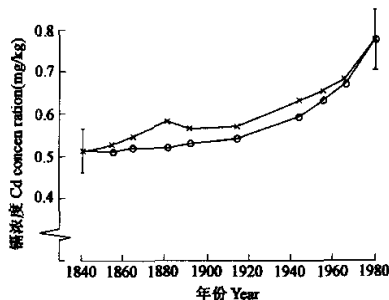


图2 镉在英国未经施肥的牧场表土中的积累(o)和用全球人类活动排放数据预测的土壤镉的增加(x)^[7]

Fig.2 Accumulation of Cd in topsoils under unfertilized grassland in UK (o) and predicted increases in soil Cd using global anthropogenic emission data (x)^[7]

合态及残留态形式存在,从而使土壤 Cd 的活度降低。

土壤的 Eh 值在很大程度上影响着植物对一些微量重金属元素的吸收。在土壤介质中,重金属元素可与硫化物形成沉淀、与有机质络合、被铁锰氧化物吸附。这些行为受土壤氧化还原状况的调节。镉在氧化条件下(Eh 值高)比在还原条件下(Eh 值低)更容易由无效态转化为水溶态和交换态。研究表明,这种转化在酸性条件下尤为明显。当 pH 值为 4.5 时,处于氧化状态的植物镉含量是还原条件下的几十倍,当 pH 值为 7.5 时,处于两种状态下的植物镉含量几乎没有显著变化。

随着 Eh 值的增大,土壤中水溶性镉含量、水稻吸收镉的总量及地上部的含镉量随之增加。这可能是因为在还原状况下,镉易与硫化物结合形成硫化镉沉淀,这是一种高度难溶性物质即使在酸性介质中其溶解量也很少。当土壤处于氧化状态,硫化物不稳定而发生氧化,从而使镉等重金属元素释放出来。因此,水稻根系的氧化作用,可使根际镉的有效性增强,促进水稻对镉的吸收^[32]。此外,土壤处于氧化状态时,水稻可在其根表形成铁氧化物胶膜,镉与根表的铁膜可发生共沉淀或被铁膜吸附,从而影响根系对镉的吸收。根表形成的铁膜是根系活动的结果,究竟是防止重金属离子过度吸收的保护层,还是营养元素吸收的阻碍层、贮存库,依不同条件而定。

研究表明,铁氧化物胶膜的厚度和介质中元素离子浓度影响着水稻根系对这些元素的吸收。一定厚度的铁膜可促进植物根系对镉的吸收,如果厚度太大,铁膜则成为镉吸收的阻碍层^[32,33]。

2.2 Cl 离子

McLaughlin 等^[23]对澳洲南部马铃薯的研究发现,土壤盐度会使田间作物对 Cd 的吸收增加。他们发现马铃薯茎块的 Cd 含量超出最大允许浓度;这种 Cd 浓度的增加与土壤全 Cd 含量无关,而与土壤中 Cl 离子浓度有显著的正相关性。Zhao 等^[34]的实验表明,增加土壤中的 Cl⁻会使 Cd²⁺的生物有效性增加。Grant 等^[35]的研究发现,施加 KCl 可增加大麦籽粒中的 Cd 含量。Smolders 等^[36]以 NaCl 进行试验,结果表明,当土壤溶液中的 NaCl 增加到 120mM 时与对照组相比土壤溶液的 Cd 浓度增加 5 倍。Cl 具有增加 Cd 的生物有效性的作用已在水培研究^[37]、美国中部的向日葵试验^[38]和奥地利的小麦试验^[39]中得到了证实。Norvell 等^[40]的野外调查结果表明,硬质小麦籽粒中 Cd 的积累与土壤盐度关系密切,尤其是与土壤中可溶性 Cl 离子呈显著的正相关关系。

2.3 Zn

Zn 缺乏会使作物对 Cd 的吸收增加。Oliver 等^[41]用低剂量 Zn (10kg/hm²) 处理近于缺 Zn 的小麦,发现施用锌肥可以使小麦中 Cd 的含量减少约 2 倍;Mench 等^[24]认为,法国未污染土壤中生长的高富积 Cd 的小麦(超过 0.1mg/kg)是由于 Zn 缺乏造成的。郭栋生等^[42]对玉米幼苗的水培实验证明,随着 Zn 浓度的增加,玉米幼苗根部和叶部的 Cd 含量逐渐减少。为了说明 Zn 在抑制植物对镉的吸收方面的作用,Chaney 等^[43]以苜蓿进行了土壤 Cd、Zn 的交互作用试验,结果表明,当 Cd、Zn 均处于较高水平时,Zn 的植物毒性造成的苜蓿减产,潜在的减轻了人类因食用苜蓿而产生的 Cd 摄入增加。相对 Zn 来说,大多数作物在其子实、果实和茎块形成期间,都会排斥 Cd 向这些可食部分迁移。然而在淹水土壤中生长的水稻却是例外。当其籽粒 Zn 含量仍处于背景水平时,Cd 的含量就已大大增加。这是因为,在淹水土壤中,Zn 与 S 合成 ZnS, Cd 与 S 形成 CdS,但 CdS 会迅速氧化从而促进 Cd 的吸收。Chaney 等^[43]的试验表明,即使是在 Zn 含量超过 6000mg/kg 的土壤中的水稻,其子实的 Zn 含量也没有超过未污染土壤中生长的水稻的 Zn 浓度。由于 Zn 的排除和低水平的 Fe 及 Ca,以水稻为主食的人极易引起 Fe、Ca、Zn 缺乏,从而增加 Cd 的摄入和体内积累量。

2.4 Fe

李花粉等^[44]采用营养液培养的方法,研究了在供 Fe 与缺 Fe 条件下小麦对不同 Cd 化合物和 Cd 污染土壤中 Cd 的吸收和迁移,结果表明,缺 Fe 培养的小麦植株含 Cd 量显著高于正常供 Fe 培养的小麦。刘文菊等^[32]的研究表明缺铁水稻根分泌物和缺铁小麦根分泌物均能活化水稻根际的难溶性镉——CdS,并促进了水稻对这部分镉的吸收和运输;但二者的活化强度不同,缺铁小麦根分泌物对镉的活化作用较缺铁水稻根分泌物强。

此外,土壤中有机的存在也会影响作物对 Cd 的吸收及传输。Nigam 等^[45,46]通过盆栽试验研究了不同有机酸对玉米和小麦吸收、运输 Cd 的影响,结果表明,玉米植株中的 Cd 随着有机酸浓度的增加而积累增多。

2.5 植物品种

某些农作物常常会含有较高的 Cd 浓度,如硬质小麦、葵花子和亚麻,即使生长在未污染的农田里这些作物的籽粒也会比大多数谷物积累更多的 Cd^[27,47]。秦世学^[48]的研究表明,在含镉量相同的土壤中生长的萝卜 Cd 含量比小麦、水稻叶片的 Cd 含量高 40 多倍。杨居荣等^[49]的研究发现,将黄瓜、菠菜插入 50mg/kg Cd 的水溶液中,黄瓜对 Cd 的吸收量明显高于菠菜。目前,与春小麦、大麦、玉米和燕麦相比,硬麦、葵花子和亚麻已被确认为高 Cd 作物^[28]。此外,作物基因型的特征也会影响 Cd 的吸收和积累。日本学者川上一郎等^[50]对 14 个不同基因型的水稻品种进行了比较研究,发现水稻品种间存在着很大的耐 Cd 差异性。王凯荣等^[51]通过水培和分段供 Cd 法对杂交水稻和常规水稻的 Cd 耐受性进行了研究,结果表明两者间有很大的差异性。

尽管在过去的 20a 中对土壤中 Cd 的植物有效性已进行了深入的研究,但仍然不能解释在某些条件下观察到的 Cd 的高迁移性。有些作物对 Cd 的吸收积累与轮作有关,Oliver 等^[52]报道,在前茬为羽扇豆的土壤上种植的小麦,其 Cd 含量比前茬种植谷类作物的土壤上种植的小麦的 Cd 含量明显增高。其影响机制还不甚明了。

3 影响人体对食物中 Cd 吸收的因素

评估土壤 Cd 通过食物链最终对人体产生的健康危害是一个极为复杂的课题。如果长时间摄入含 Cd 量超过每周暂时耐受摄入量(PTWI;7μg/kg 体重)的饮食就会增加机体对 Cd 的负荷^[53]。食物中的镉能否在人体内积累与食物中镉的生物可给性(bioaccessibility)和人体微量元素营养有关^[54]。在 Cd 的摄入量相同的情况下,以 Fe、Zn、Ca 含量较低的稻米为主食的人群比膳食营养丰富的人对 Cd 毒性更加易感^[55,56]。许多动物试验表明,被喂食高矿物质食物的动物对 Cd 的吸收减少,反之,对 Cd 的吸收增多^[57~61]。因而,饮食的矿物质构成可能是决定食物 Cd 对人类毒性危险的重要因素^[51]。

3.1 Cd-Zn 交互作用

研究表明,只要作物中的 Cd:Zn 比率<0.01,食用该种作物的大多数家畜和野生动物组织中的 Cd 含量就不会增高,即使实际上该作物的 Cd 含量已经增高。作物中的 Zn 对 Cd 在动物体内甚至到肝、肾组织的吸收和积累具有抑制作用^[62,63]。Chaney 等^[64,65]在 Cd、Zn 浓度不同的土壤上种植饲料作物糖苣和莴苣并将其喂食动物然后检测 Cd 在动物组织中的积累量,结果表明,当土壤 Cd:Zn 比率正常时,Zn、Cd 都会在作物可食部分积累,但作物中 Cd 的生物有效性并不增加;当土壤中 Cd 和 Cd:Zn 比率增高时,作物中的 Cd 含量达到足以超过 Zn 的植物毒性对 Cd 的生物有效性产生限制的水平时,则植物中 Cd 的生物有效性显著增加。因此,作物的 Cd:Zn 比率对 Cd 的吸收在一定程度上具有抑制作用。许多进食试验证明,膳食中的 Zn,特别是富 Cd 食物中的 Zn 会抑制 Cd 的吸收^[63,57]。

3.2 Fe

在以往的研究中已经有越来越多的证据显示 Cd 与 Fe 之间存在着交互作用。对某些人群的研究表明血清 Fe 的浓度与 Cd 的吸收量或血清 Cd 浓度呈负相关的关系^[58,66]。Flanagan 等^[58]认为,人与动物的缺 Fe 状态会增加 Cd 的吸收,Reeves 的实验提示^[54],即使是中等程度的缺 Fe 也足以影响 Cd 的吸收及其在组织内的分布。有人以 25μg 放射性同位素 Cd 对人体进行示踪研究,结果表明,血清储铁蛋白 < 29μg/L 的个体对 Cd 的吸收比铁储量充足的个体高 4 倍^[67]。Cd 浓度随着储铁蛋白的降低而升高^[66,68],很可能与 Cd、Fe 之间存在着一种共同的吸收机制有关,如 DMT1,12 指肠内的载铁运输器^[69]。Berglund 等发现^[66],妇女体内贮存的 Fe 较低进而增加了对 Cd 的吸收性,这一点与对比比利时妇女、瑞典妊娠与非妊娠妇女及波兰儿童的研究结果相一致^[59,68,70,71]。在瑞典,有 10%~40% 的育龄妇女铁储耗竭^[72]。在妊娠期间,铁的需要量大量增加,因而铁的吸收也随着妊娠过程逐渐增加。然而通过饮食提供的铁往往不能满足这种需求而导致缺铁并伴有显著的尿 Cd 增加^[73]。一般说来,由于 Fe、Cd 的吸收机制相同,当 Fe 的吸收增加时 Cd 的吸收也会

增加。但是对于患有血色沉着病的人却是例外。血色沉着病是一种以病理性 Fe 吸收增加并导致进行性肝脏等器官铁沉着加重为特征的单基因遗传病,如果不以放血疗法进行终生治疗就会产生致命的危险,然而采用放血疗法却伴发血 Cd 水平的增加^[74]。因而缺铁与储铁量的消耗都会导致 Cd 的吸收与积累的增加。

3.3 Ca

摄入 Ca 含量低下的饮食会增加胃肠道对 Cd 的吸收和积累,进而使 Cd 的毒性作用增强。Ca 和 Cd 的交互作用可发生在不同的代谢阶段(包括吸收、分布与排泄)。一些研究表明,Ca 从小肠内膜吸收由低分子量的 Ca 结合蛋白(CaBP)完成。这种 Ca 结合蛋白不仅对 Ca 的吸收起着极为重要的作用还能与 Cd 结合对 Cd 的吸收发挥重要作用^[75]。Cd 对 CaBP 的亲和力与 Ca 相同,当 Ca 的摄入减少时,CaBP 的合成加强,使 Cd 的吸收增多;而且由于 Ca^{2+} 和 Cd^{2+} 的竞争性抑制使 Cd 在 Ca 减少的情况下更易与 CaBP 结合而吸收入血^[76]。低浓度的 Cd($0.025\sim 0.05\text{mmol CdCl}_2$)可通过竞争性抑制而取代 Ca 在小肠中的转运位点^[77],而高浓度的 Cd($0.5\sim 1\text{mmol/L CdCl}_2$)则可通过非竞争性机制抑制 Ca 的吸收^[78]。因而,当 Cd 的摄入量低时,Cd 通过与 Ca^{2+} 竞争吸收位点而抑制 Ca 的转运;当 Ca 的摄入量加大时,Ca 将通过竞争及维生素 D₃ 依赖机制降低 Cd 的影响降低 Cd 的吸收。Kello 等^[60]的研究表明¹¹⁵Cd 在生物体内的蓄积量随饮食中的 Ca 含量增加而降低。此外,Cd 对人体的毒性作用在很大程度上也取决于 Ca 的摄入量。

为了更好的理解体内矿物质状态的变化对 Cd 吸收的影响,Reeves 和 Chaney^[52]研究了 Ca、Zn、Fe 临界缺乏对葵花子中 Cd 吸收的影响,结果表明饮食中 Ca、Zn、Fe 的临界营养状态对 Cd 的吸收及其在组织内的积累具有重要意义。Reeves^[54]进一步以大白鼠对葵花子和稻米中 Cd 的吸收和积累进行了比较研究,结果发现食用稻米的白鼠体内贮留的 Cd 是食用葵花子白鼠的 2 倍;Ca 和 Fe 的临界缺乏对提高 Cd 的吸收积累有协同作用。如果再伴有 Ca 的临界缺乏,情况会变得更加严重。因而,在摄入含 Cd 量相同的饮食的情况下,摄入临界矿物质的人群要比膳食营养丰富的人群更易受到 Cd 的危害^[51]。

4 结语

许多研究表明,Cd 作为人体非必须元素一旦在人体内蓄积就会造成严重的健康危害。然而由于其本身的化学特性及其在工业生产上的广泛应用和磷肥施用的增加,要完全除去环境中的 Cd 在相当长的时期内是不可能的。由于 Cd 浓度相同的作物对人类健康产生不同的危害^[21],进行 Cd 通过食物链向人体迁移的机制及其影响因子的研究,从而开发培育能够抑制 Cd 的生物有效性进而阻碍 Cd 在人体内蓄积的作物品种具有极为重要的意义。此外,增加饮食中矿物质的摄入也是防止 Cd 在体内积累极其毒害作用从而保护人类健康的有效途径之一。

References:

- [1] McLaughlin M J and Singh B R. Cadmium in soil and Plants; A global perspective. In: McLaughlin M J and Singh B R. Eds. *Cadmium in Soils and Plants*. Dordrecht, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers, 1999. 13~21.
- [2] McLaughlin M J and Hamon R. Perspectives on Inputs of Cadmium to the Food Chain. In: Syers J K and Goldfeld M, Eds. *Environmental Cadmium in the Food Chain; Source, Pathways and Risks*. Proceeding of the SCOPE Workshop. Scientific Committee on Problems of the Environment/International Council of Scientific Unions (SCOPE/ICSU). Sep. 13~16, 2000. Brussels, Belgium. Paris: SCOPE, 2001. 60~65.
- [3] Wu Y Y, Chen T and Zhang X X. Pollution ecology of Cd in the Zhangshi area of Shenyang. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(1): 21~26.
- [4] Nriagu J O and Pacyna J, M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by reactive metals. *Nature*, 1988, 333: 134~139.
- [5] Brewer J M, Barry B J and Macgregor J D. Distribution and cycling of cadmium in the environment. In: Nriagu J O and Sprague J B, Eds. *Cadmium in the Aquatic Environment*. New York: John Wiley, 1987. 1~18.
- [6] Kabata-Pendias A and Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Baton Raton: CRC Press, 1992. 365.
- [7] Jones K C, Symon C J and Johnston A E. Retrospective analysis of an archived soil collection II. Cadmium. *Sci. Tot. Environ.*, 1987, 67: 75~89.
- [8] McLaughlin M J, Tiller K G, Naidu R, et al. Review: The behaviour and environmental impact of contaminants

- in fertilizers. *Aust. J. Soil Res.*, 1996, **34**: 1~54.
- [9] Williams C H and David D J. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants. *Soil Sci.*, 1976, **121**: 86~93.
- [10] Mortvedt J J and Osborn G. Study on the chemical form of cadmium contaminants in phosphate fertilizers. *Soil Sci.*, 1982, **134**: 185~192.
- [11] Van Kauwenbergh S J. Natural and Agricultural (Fertilizer) Inputs of Cadmium. In: Syers J K and Goldfeld M, Eds. *Environmental Cadmium in the Food Chain: Source, Pathways and Risks*. Proceeding of the SCOPE Workshop. Scientific Committee on Problems of the Environment/International Council of Scientific Unions (SCOPE/ICSU). Sep. 13~16, 2000. Brussels, Belgium. Paris: SCOPE, 2001. 40~53.
- [12] Chang A C, Hyun H and Page A L. Cadmium uptake for Swiss chard grown on composted sewage sludge treated field plots: plateau or time bomb? *J. Environ. Qual.*, 1997, **26**: 11~19.
- [13] Stacey S, Merrington G and McLaughlin M J. The effects of aging biosolids on the availability of Cd and Zn. *Europ. J. Soil Res.*, 2000.
- [14] Hamon R, Wunke J, McLaughlin M J, et al. Availability of zinc and cadmium to different plant species. *Aust. J. Soil Res.*, 1997, **35**: 1267~1277.
- [15] Hamon R, McLaughlin M J, Naidu R, et al. Long-term changes in cadmium bioavailability in soil. *Environ. Sci. Technol.*, 1998, **32**: 3699~3703.
- [16] McLaughlin M J, Hamon R E, Maier N A, et al. Screening of phytoremediation and *in-situ* immobilisation techniques to remediate cadmium-contaminated agricultural soils. In: proceedings National Soils Conference-Environmental Benefits of Soil Management, Brisbane, Australia, April 1998. Sydney: Aust. Soil Sci. soc. Inc., 1998. 229~236.
- [17] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, et al. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**: 1~8.
- [18] Kádár I. Effect of heavy metal load on soil and crop. *Acta Agronomica Hungarica*, 1995, **43**: 3~9.
- [19] Reber H H. Threshold levels of cadmium for soil respiration and growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.), and difficulties with their determination. *Biol. Fertil. Soils*, 1989, **7**: 152~157.
- [20] Haghiri F. Cadmium uptake by plants. *J. Environ. Qual.*, 1973, **2**: 93~95.
- [21] Smolders E. Cadmium uptake by plants. *Inter. J. Occup. Medic. Environ. Health*, 2001, **14**(2): 177~183.
- [22] Eriksson J, Oborn I, Jansson G. Factors influencing Cd-content in crops. Results from Swedish field investigations. *Swed. J. Agric. Res.*, 1996, **26**: 125~133.
- [23] McLaughlin M J, Palmer L T, Tiller K G, et al. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *J. Environ. Qual.*, 1994, **23**: 1013~1018.
- [24] Mench M, Baize D and Mocquot B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France. *Environ. Pollut.*, 1997, **95**: 93~103.
- [25] Chaney R L and Ryan J A. Risk Based Standard for arsenic, lead and Cadmium in Urban Soils. Frankfurt, DEHEMA, 1994. 130.
- [26] Chaney R L, Ryan J A, Li Y M, et al. Soil cadmium as a threat to human health. In: McLaughlin M J and Singh B R. ed. *Cadmium in Soils and Plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ, 1999. 219~256.
- [27] Li Y M, Chaney R L and Schneiter A A. Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. *Euphytica*, 1997, **94**: 23~30.
- [28] Grant C A, Bailey L D, McLaughlin M J, et al. Managing factors which influence cadmium concentrations in crops. In: McLaughlin M J and Singh B R, eds. *Cadmium in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 151~198.
- [29] Gavi F, Basta N T and Raun W R. Wheat grain Cs as affected by long-term fertilization and soil acidity. *J. Environ. Qual.*, 1997, **26**: 265~271.
- [30] Smolders E, Brans K, Foldi A, et al. Cadmium fixation in soils measured by isotopic dilution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, **63**: 78~85.
- [31] Liao M, Huang C Y. Effect of pH on transfer of Cd through soil to water. *Acta Environ. Sci.*, 1999, **19**(1): 81~86.
- [32] Liu W J, Zhang X K. Effect of ferric hydroxide on root surface and iron-deficient root excretion in rice on Cd uptake. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(4): 463~468.
- [33] Liu W J, Zhang X K and Zhang F S. The mobilization of root exudates on CdS in rice rhizosphere and their effect on Cd uptake and transport. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(3): 448~451.

- [34] Zhao Z Q, Zhu Y G, Li H Y, *et al.* Effects of forms and rates of potassium fertilizer on cadmium uptake by two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum*, L.). *Environmental International*, 2003.
- [35] Grant C A, Bailly L D, Therrien M C. Effect of N, P, and KCl fertilizers on grain yield and Cd concentration of malting barley. *Fert. Res.*, 1996, **45**: 153~161.
- [36] Smolders E, Lambregts R M, McLaughlin M J, *et al.* Effect of soil chloride on a cadmium availability to Swiss chard. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**: 426~431.
- [37] Smolders E and McLaughlin M J. Chloride increases cadmium uptake in Swiss Chard in a resin-buffered nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, **60**: 1443~1447.
- [38] Li Y M, Chaney R L and Schneiter A A. Effect of soil chloride level on cadmium concentration in sunflower kernels. *Plant Soil*, 1994, **167**: 275~280.
- [39] Wenzel W W. Effects of soil properties and cultivar on cadmium accumulation in wheat grain. *Z. Pflanzenern. Bodenk.*, 1996, **159**: 609~614.
- [40] Norvell W A, Wu J, Hopkins D G, *et al.* Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, **64**: 2162~2168.
- [41] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, *et al.* The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain. *J. Environ. Qual.*, 1994, **23**: 705~711.
- [42] Guo D S, Xi Y Y, Ding X C, *et al.* Effect of La and Zn on content of Cd and Pb in Maize seedlings. *Agro-environmental Protection*, 1994, 135~136.
- [43] Chaney R L, Ryan J A, Li Y M, *et al.* Transfer of cadmium through plants to the food chain. In: Syers J K and Goldfeld M, Eds. *Environmental Cadmium in the Food Chain: Source, Pathways and Risks*. Proceeding of the SCOPE Workshop. Scientific Committee on Problems of the Environment/International Council of Scientific Unions (SCOPE/ICSU). Sep. 13~16, 2000. Brussels, Belgium. Paris: SCOPE, 2001. 76~81.
- [44] Li H F, Zheng Z Y, Zhang F S, *et al.* Effect of iron on uptake of different forms of Cd by wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 170~173.
- [45] Nigam R, Srivastava S, Prakash S, *et al.* Effect of organic acids on the availability of cadmium in wheat. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2000, **12**(4): 125~132.
- [46] Nigam R, Srivastava S, Prakash S, *et al.* Cadmium mobilization and plant availability-the impact of organic acids commonly exuded from root. *Plant and Soil*, 2001, **230**(1): 107~113.
- [47] Hammond J J, Miller F, Green C E, *et al.* Screening the USDA flax collection for seed cadmium. *Agron. Abstr.*, 1999, 77~78.
- [48] Qin S X. Effect of Cd-contaminated soil on crops and Cd uptake by crops. *Series of Environmental Sciences*, 1984, **4**(10): 8~19.
- [49] Yang J R and He J Q. Differences within and between crop species for Cd tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, **5**(2): 192~196.
- [50] Guo X X. Effect of heavy metals on rice. *Agricultural Technology Overseas*, 1982, **8**: 263~268.
- [51] Wang K R and Gong H Q. Comparative studies on the difference in the uptake and redistribution of Cd by two rice genotypes. *Agro-Environmental Protection*, 1996, **15**(4): 145~149.
- [52] Oliver D P, Schultz, J E, Tiller K G, *et al.* The effect of crop rotations and tillage practices on Cd concentrations in wheat grain. *Aust. J. Soil Res.*, 1993, **44**: 1221~1234.
- [53] WHO. Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants. Report # 837, World Health Organization, Geneva, 1993, 28~31.
- [54] Reeves P G. Mineral nutrient status and the bioavailability of cadmium from natural food sources. In: Syers J K and Goldfeld M, Eds. *Environmental Cadmium in the Food Chain: Source, Pathways and Risks*. Proceeding of the SCOPE Workshop. Scientific Committee on Problems of the Environment/International Council of Scientific Unions (SCOPE/ICSU). Sep. 13~16 2000. Brussels, Belgium. Paris: SCOPE, 2001. 82~86.
- [55] McKenzie-Parnell J M, Kjellström T E, Sharma R P, *et al.* Unusually high intake and fecal output of cadmium, and fecal output of other trace elements in New Zealand adults consuming drege oysters. *Environ. Res.*, 1988, **46**: 1~14.
- [56] Tachechi Z. Cadmium vs. nutrition in Itai-itai disease. In: Tsuchiya K, ed. *Cadmium Studies in Japan*. Tokyo: Elsevier, 1978. 283~286.
- [57] Fox M R S, Tao S H, Stone C L, *et al.* Effects of zinc, iron, and copper deficiencies on cadmium in tissues of Japanese quail. *Environ. Health Perspect.*, 1984, **54**: 57~65.
- [58] Flanagan P R, McLellan J S, *et al.* Increased dietary cadmium absorption in mice and human subjects with iron

- deficiency. *Gastroenterol.*, 1978, **74**: 841~846.
- [59] Brzóska M M and Moniuszko-Jakoniuk J. The influence of calcium content in diet on the accumulation and toxicity of cadmium in organism. *Arch. Toxicol.*, 1998, **72**: 63~73.
- [60] Kello D, Dekanic D, *et al.* Influence of sex and dietary calcium on intestinal cadmium absorption in rats. *Arch. Environ. Health*, 1979, **34**: 30~33.
- [61] Koo S I, Fullmer C S. Intestinal absorption and retention of ^{109}Cd , effects of cholecalciferol, calcium status and other variables. *J. Nutr.*, 1978, **108**: 1812~1822.
- [62] Reeves P G and Chaney R L. Mineral nutrients status of female rats affects the absorption and organ distribution of cadmium from sunflower kernels (*Helianthus annuus* L.). *Environ. Res.*, 2001, **85**: 215~225.
- [63] McKenna I M, Chaney R L, Tao S H, *et al.* Interactions of plant zinc and plant species on the bioavailability of plant cadmium to Japanese quail fed lettuce and spinach. *Environ. Res.*, 1992, **57**: 73~87.
- [64] Chaney R L, Stoewsand G S, Bache C A, *et al.* Cadmium deposition and hepatic microsomal induction in mice fed lettuce grown on municipal sludge-amended soil. *J. Agr. Food Chem.*, 1978, **26**: 992~994.
- [65] Chaney R L, Stoewsand G S, Furr A K, *et al.* Elemental content of tissues Guinea pigs fed Swiss chard grown on municipal sludge-amended soil. *J. Agri. Food Chem.*, 1978b, **26**: 944~947.
- [66] Berglund M, Åkesson A, Nermell B, *et al.* Intestinal absorption of dietary cadmium in women depends on body iron stores and fiber intake. *Environ. Health Perspect.*, 1994, **102**: 1058~1066.
- [67] Vahter M, and Åkesson A. Factors influencing cadmium absorption, distribution, and excretion. In: Syers J K and Goldfeld M. Ed. *Environmental Cadmium in the Food Chain: Source, Pathways and Risks*. Proceeding of the SCOPE Workshop. Scientific Committee on Problems of the Environment/International Council of Scientific Unions (SCOPE/ICSU). Sep. 13~16 2000. Brussels, Belgium. Paris: SCOPE, 2001. 134~139.
- [68] Staessen J A, Vyncke G and Lauwerys R R, *et al.* Transfer of cadmium from a sandy acidic soil to man; a population study. *Environ. Res.*, 1992, **58**: 25~34.
- [69] Åkesson A, Berglund M and Schütz A, *et al.* Cadmium exposure in pregnancy and lactation in relation to iron status. *Am. J. Publ. Health*, 2000.
- [70] Osman K, Schütz A and Åkesson B, *et al.* Interaction between essential and toxic elements in lead exposed children in Katowice, Poland. *Clin. Biochem.*, 1998, **31**: 657~665.
- [71] Åkesson A, Bjellerrup P and Berglund M, *et al.* Serum transferrin receptor; a specific marker of iron deficiency in pregnancy. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1998, **68**: 1241~1246.
- [72] WHO. cadmium-Environmental aspects. IPCS Environmental health Criteria 135. World Health Organization, 1992. Geneva.
- [73] Letsky E A. The haematological system. In: Chamberlain G, Broughton Pipkin F, eds. *Clinical Physiology in Obstetrics*. Oxford: Blackwell Science, 1998. 71~110.
- [74] Åkesson A, Stål P and Vahter M. Phlebotomy increases cadmium uptake in hemochromatosis. *Environ. Health Perspect.*, 2000, **108**: 289~291.
- [75] Bredderman P J and Wasserman R H. Chemical composition, affinity for calcium, and some related properties of the vitamin D dependent calcium-binding protein. *Biochemistry*, 1974, **13**: 1687~1694.
- [76] Washko P W and Cousins R. Role of dietary calcium and calcium binding protein in cadmium toxicity in rats. *J. Nutr.*, 1977, **107**: 920~928.
- [77] Tsuruki F, Otawara Y, Wung H L, *et al.* Inhibitory effect of cadmium on vitamin D-stimulated calcium transport in rat duodenum in vitro. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 1978, **24**: 237~242.
- [78] Hamilton D L, Smith M W. Inhibition of intestinal calcium uptake by cadmium and the effect of a low calcium diet on cadmium retention. *Environ. Res.*, 1978, **15**: 175~184.

参考文献:

- [3] 吴燕玉, 陈涛, 张学南. 沈阳张士灌区镉污染生态的研究. *生态学报*, 1989, **9**(1): 21~26.
- [31] 廖敏, 黄昌勇. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响. *环境科学学报*, 1999, **19**(1): 81~86.
- [32] 刘文菊, 张西科. 根表铁氧化物和缺铁根分泌物对水稻吸收镉的影响. *土壤学报*, 1999, **36**(4): 463~468.
- [33] 刘文菊, 张西科. 根分泌物对根际难溶性镉的活化作用及对水稻吸收、运输镉的影响. *生态学报*, 2000, **20**(3): 448~451.
- [42] 郭栋生, 席玉英, 丁香串, 等. 铜、锌对玉米幼苗中镉、铅含量的影响. *农业环境保护*, 1994, **13**(3): 135~136.
- [44] 李花粉, 郑志宇, 张福锁, 等. 铁对小麦吸收不同形态镉的影响. *生态学报*, 1999, **19**(2): 170~173.
- [48] 秦世学. 土壤镉污染对作物的影响及作物对土壤镉的吸收. *环境科学丛刊*, 1984, **4**(10): 8~19.

- [49] 杨居荣,贺建群. 农作物 Cd 耐性的种内和种间差异 I. 种间差. 应用生态学报, 1994, 5(2): 192~196.
- [50] 郭学兴. 重金属对水稻的影响(译). 国外农业科技, 1982, (8): 263~268.
- [51] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究. 农业环境保护, 1996, 15(4): 145~149.

资源与环境研究的“模型工具箱”

评介《资源环境数学模型手册》

E

刘纪远

(中国科学院地理学与资源研究所, 北京 100101)

中国科学院地理科学与资源研究所、资源与环境信息系统国家重点实验室创新基地研究员岳天祥博士主编的《资源环境数学模型手册》, 由科学出版社 2003 年 9 月出版。中国科学院院士、欧亚科学院院士陈述彭先生为此书作序, 并对此书的理论与实用价值给予了高度评价。本书系具有深厚数学造诣的作者经过多年积累, 是继查询、清理“地理学报”有关地学数学模型试点工作之后, 对近百年来有关应用于资源环境领域的数学模型进行逐一的精选、查证、汇编而形成的资源环境研究领域的一部重要工具书。

全书分 4 篇 28 章, 涵盖资源环境各个研究领域的数学模型 3055 组, 共约 220 万字; (1) 第一篇为地球信息科学, 包括数学模型 771 组。其中, 遥感成像与信息传输机理(第一章)的数学模型 143 组、地物波谱与频谱特征(第二章)的数学模型 134 组、遥感信息处理与分析(第三章)的数学模型 219 组、地图(第四章)的数学模型 219 组、地理信息系统(第四章)的数学模型 46 组、地球信息的其他综合模型(第五章)的数学模型 195 组; (2) 第二篇为自然地理学, 包括数学模型 674 组。其中, 气候(第七章)的数学模型 158 组、地貌(第八章)的数学模型 68 组、土壤(第九章)的数学模型 111 组、水文(第十章)的数学模型 234 组、植被(第十一章)的数学模型 103 组; (3) 第三篇为人文地理学, 包括数学模型 415 组。其中, 工业地理(第十二章)的数学模型 29 组、农业地理(第十三章)的数学模型 258 组、交通地理(第十四章)的数学模型 8 组、城市地理(第十五章)的数学模型 47 组、旅游地理(第十六章)的数学模型 13 组、区域地理(第十七章)的数学模型 60 组; (4) 第四篇为生态学, 包括数学模型 1195 组。其中, 生态学一般理论与方法(第十八章)的数学模型 82 组、个体与生理生态学(第十九章)的数学模型 195 组、种群生态学(第二十章)的数学模型 190 组、群落与生态系统生态学(第二十一章)的数学模型 201 组、行为生态学与进化生态学(第二十二章)的数学模型 97 组、景观生态学(第二十三章)的数学模型 29 组、全球变化(第二十四章)的数学模型 46 组、生物多样性(第二十五章)的数学模型 63 组、毒理生态学(第二十六章)的数学模型 51 组、生态管理与恢复生态学(第二十七章)的数学模型 115 组、其它生态学及环境问题(第二十八章)的数学模型 51 组。除以上四篇外, 在书的附录部分还精选了目前理论比较成熟且具有较大实用价值的 11 种国际综合模型。

本书具有以下突出特点: 第一, 该书的出版可减少不必要的模型重复构建所造成的时间和财力浪费, 可明确模型研究领域需填补的空白, 使模型构建人员有的放矢, 并有利于对具有同一资源环境内涵、而有不同数学表达的模型的比较选择和模型一般模式的识别; 第二, 该书的出版为进一步构建资源环境模型库系统奠定了扎实的理论与实践基础; 第三, 该书体系完整、内容丰富, 是资源环境研究领域一部重要的数学工具书, 各个相应研究领域的读者都能从手册中检索到适合与自己研究领域、研究对象的相关数学模型; 第四, 该书为既具有理论价值又具有实践价值的国际模型本土化奠定了坚实基础。

总之, 《资源环境数学模型手册》具有很高的理论价值和实用价值。该书的出版将会推动资源环境数学模型研究进一步发展。它不仅可作为地理学、生态学、应用数学、气象学、地质学、经济学等资源环境领域的相关专业和计算机软件等专业科研工作者的工具书, 而且可作为高校有关专业教学的课外辅导书和博士生、硕士生、大学生撰写学位论文的参考书。