

论城市表层土壤中重金属的可持续管理与发展

On Sustainable Management and Development of Heavy Metals in Urban Topsoil

王学松/Wang Xue-song¹, 秦 勇/QIN Yong²

1. 淮海工学院化学工程系, 江苏连云港 222005; 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州, 221008

1. Department of Chemical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, Jiangsu Province, China

2. College of Resources and Geo-Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221008, Jiangsu Province, China

[摘要] 城市表层土壤由于接纳了多种污染源(如工业污染源、交通污染源、燃煤污染源等)释放的重金属, 可以作为城市环境中重金属污染的“示踪物”。城市表层土壤中的重金属不仅可以通过大风扬尘等方式危害人类(特别是儿童)健康, 而且能够污染地表水或地下水等水生生态系统。因此, 对城市表层土壤重金属需要进行可持续管理和发展。首先探讨了城市表层土壤重金属的环境承载力的内涵和特征, 分析了土壤对重金属承载机制和约束条件, 区分了“绝对承载力”和“相对承载力”, 并且给出了城市表层土壤重金属环境相对承载力的计算模型; 其次, 探讨了城市表层土壤重金属的“临界负荷”与可持续管理和发展的关系, 在此基础上, 提出了城市土壤中重金属可持续发展的初始评估指标(F_0)和可持续发展指标(F_s); 最后, 讨论了重金属污染源释放速率的调控措施及其手段。

[关键词] 城市表层土壤, 重金属, 可持续管理, 污染, 临界负荷, 环境承载力

[中图分类号] X703

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)09-0026-05

Abstract: Heavy metals in urban topsoil have been shown to be very useful tracers of environmental pollution because urban topsoil is the “recipients” of large amounts of heavy metals from a variety of sources including industrial wastes, vehicle emissions, coal burning waste, and other activities. Dust from the ground because of wind erosion may have toxic effects as a consequence of inhalation or ingestion by humans, particularly children, which poses major health hazard. Furthermore, any contamination of urban topsoil could cause in turn surface water/groundwater contamination because metals of the polluted topsoil tend to be more mobile than those of unpolluted ones. In this paper, we firstly probe into the connotation of carrying capacity of heavy metals in urban topsoil, analyze the mechanism and inhabiting factors of heavy metals in urban topsoil, differentiate “absolute carrying capacity” and “relative carrying capacity” and put forward the computing model of relative carrying capacity for heavy metals in urban topsoil. Secondly, the preliminary assessment index (F_0) and sustainable development index (F_s) are discussed. Lastly the controlling measures on the emissions of heavy metals are discussed.

Key Words: urban topsoil, heavy metals, sustainable management, pollution, critical loading, environmental carrying capacity

CLC Number: X703

Document: A

Article ID: 1000-7857(2005)09-0026-05

土壤是一种非再生性的自然资源^[1]。土壤的退化表明, 土壤资源是有限的, 因此, 需要进行可持续的管理和发展。城市土壤作为地球生物圈的一个组成部分, 完成着一定的生态、环境和经济功能。与农业土壤相比, 城市土壤不仅具有重金属含量高、环境容量小等特征, 还由于城市土壤中微生物的种类和数量少, 导致城市土壤具有比较低的代谢和环境载荷能力^[2]; 同时, 重金属污染的城市土壤对城市居民的健康以及其它生态系统均能产生直接影响。因此, 加强重金属污染的城市土壤可持续管理和发展的研究具有极其重要的现实意义。实现重金属污染的城市土壤可持续管理和发展的流程和措施见图1。

1 环境承载力与重金属污染的城市土壤的可持续管理和发展

环境承载力是环境科学的一个重要而又区别于其它学科的

概念, 它反映了环境与人类的相互作用关系。因此, 环境承载力被广泛应用于环境决策、环境规划等方面, 并作为其理论基础、判断依据和重要的约束条件之一^[3]。目前, 对环境承载力的定义分为两种: ①是指环境对污染物的容纳能力, 即通常所说的环境容量^[4]; ②是指某种环境状态下, 某一区域环境对人类社会经济活动支持能力的阈值^[5]。无论哪一种定义, 其实质都是反映了环境对污染物消纳或对人类活动支持的“临界值”。

可持续发展是“不超过环境承载力的发展”^[6], 因此, 可持续发展是目标, 环境承载力是可持续发展的基石, 即只有建立在环境承载力基础上的发展才是可持续发展。目前, 承载力作为可持续性发展的支撑理论已逐渐得到国内外研究者的普遍认可和重视^[7]。

1.1 城市土壤重金属环境承载力的内涵和特征

承载力是系统功能的外在表现, 即系统具有依靠能流、物流和负熵流来维持自身的稳态, 有限地抵抗人类系统的干扰并重新

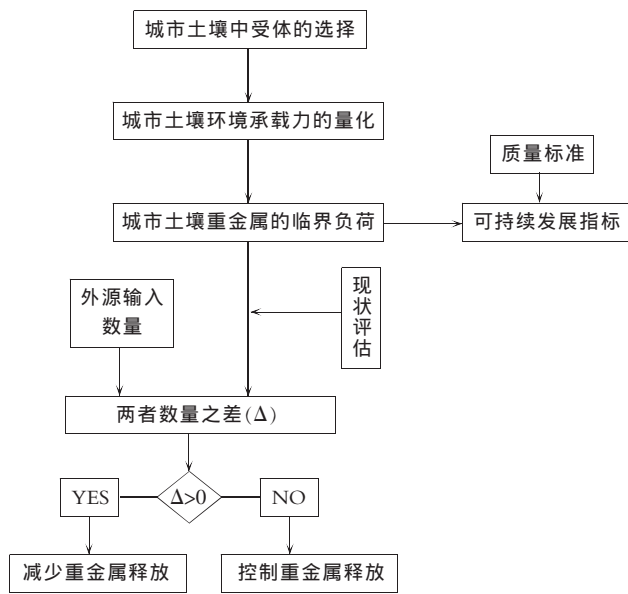


图1 重金属污染城市土壤的可持续管理流程与措施

调整自组织形式的能力。承载力是描述系统状态的重要参量之一,即某一时刻系统状态不仅与其自身的运动状态有关,还与人类对其作用有关^[3]。就城市土壤而言,城市土壤重金属的环境承载力是指在一定受体的环境质量标准规范下,土壤依靠自身结构和性质“缓冲”不断输入的外源重金属,并且使其对自身或其它生态系统(包括人)不发生环境风险的能力的阈值。也就是说,环境承载力是测度城市表层土壤抵抗外源重金属输入大小的一个指标。通过监测,由于外源重金属的输入而引发与重金属有关的一些参数振幅的变化,可以判断外源重金属的输入对城市表层土壤的压力状况。

就其定义,城市土壤重金属的环境承载力的特征包括3个方面。

1.1.1 城市土壤重金属的环境承载力是客观存在的

土壤是一个远离平衡态的高度复杂的自组织系统。一个系统在进入远离平衡的非线性区后,涨落是非平衡的触发器,是形成新的稳定有序结构的动因。耗散结构理论认为,随机涨落与系统的结构和功能的关系见图2。

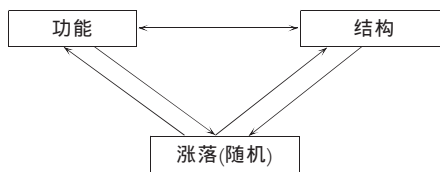


图2 土壤自组织系统的随机涨落与系统结构和功能关系图

涨落是来自系统的内部和外部的扰动。涨落在系统处于不同状态时所起的作用是不同的,如果系统处于稳定状态,涨落便是一种干扰,它引起了系统运动轨道的混乱,导致无序,这时系统具有抗干扰的能力,它迫使涨落渐渐衰弱,从而使系统再次回到原来的状态或轨道;如果系统处于不稳定的临界状态,此时某些小的涨落,不仅不被衰减,反而被放大成“巨涨落”,驱使系统从不稳定状态跃迁到一个新的有序状态。

对于城市土壤而言,由于土壤在与外界不断地进行物质、信息和能量的交换过程中形成了自我保护“缓冲机制”,从而可以承载一定数量的重金属的输入。也就是说,当通过外源途径向城市

土壤输入少量的重金属时(即微涨落过程),土壤可以依靠自身的性质和结构将输入的重金属键合到特定的组分或将其转化为难溶性的化合物,使这些重金属“固化”。但是,随着外源向城市土壤输入重金属数量的逐渐增加,即小的随机涨落通过相干效应不断增大而形成巨涨落,最终超出了土壤的“环境承载力”而导致土壤系统的重金属污染的环境风险。环境地球化学中所谓的“化学定时炸弹(chemical timing bomb)”就是土壤重金属环境承载力客观存在的有力证据。

1.1.2 城市土壤重金属的环境承载力具有一定的弹性

尽管城市土壤的重金属环境承载力是客观存在的,但也并非固定不变。首先,土壤的内因可以影响土壤中重金属环境承载力的大小。土壤是由固体、液体和气体三相共同组成的多相复杂体系,因此,影响土壤中重金属环境承载力的因素是多方面的。土壤的结构、组成(如土壤中原生矿物、次生矿物、水分、有机质、土壤粘粒的含量等)以及土壤的性质(如土壤的酸碱性、氧化还原电位、电导率以及盐基饱和度等)都能影响土壤中重金属的环境承载力。

假设土壤中重金属的环境承载力的大小取决于 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 等 n 种因子,则重金属的环境承载力 (Soil carrying capacity, SCC) 的大小可用数学表达式表示为:

$$SCC = f(x_1, x_2, x_3, K, x_n) \quad (1)$$

若 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的相应的承载分量分别为 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$, 每个因子所占的权重分别为 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$, 则定义:

$$SCC = \sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i \quad (2)$$

由上式可见,土壤中重金属的环境承载力的大小取决于各承载分量的大小和各分量的权重。对于具有不同组成和性质的土壤,其环境承载力自然不同,这也反映了其自身的“脆弱性”。通过这种方式获得的环境承载力定义为“绝对环境承载力”。

其次,外因也可以改变土壤重金属的环境承载力。人类可以通过改变影响土壤承载力的各个因子,提高土壤自身的承载能力。例如,采用“固化”手段修复重金属污染土壤就是通过提高土壤对重金属绝对环境承载力来实现的。

1.1.3 城市土壤重金属的环境承载力与相应受体的环境质量标准有关

环境承载力可以通过相应的不同受体的环境质量标准进行量化。由于依据的不同类型受体的环境质量标准获得重金属污染土壤环境承载力的大小不同,因此,在确定土壤的重金属环境承载力时,必须以相应受体的环境质量标准为依据。一般而言,受体的环境质量标准高,系统的承载力则相对较小;受体的环境质量标准低,系统的承载力则相对较大。通过这种方式获得的环境承载力定义为“相对环境承载力”。

1.2 城市土壤重金属环境承载力的承载机制与约束条件

从理论上讲,精确地研究影响城市土壤承载力的各个因子的承载分量和承载权重,可以确定城市土壤的重金属“绝对环境承载力”。但是,由于土壤的组成复杂,加之承载分量的权重难以客观地加以定量,因此,通过这种直接的方法难以准确地量化城市土壤重金属的“绝对环境承载力”。

然而,所有系统都在其系统环境中发展。系统通过其边界同外界环境的信息沟通及进行物质交换;外界的物质及信息通过系统边界进入系统,经过系统处理过的物质及信息,同样通过系统边界输出到外界环境中。通过这种循环往复的过程,整个系统得以维持自身的生存与发展(见图3)^[8]。因此,一个系统能够生存并可持续发展,必须同其所处的环境以及环境特性保持和谐。也就是说,系统环境的特性可以看作是对系统施加的一定的要求和限制,并成为系统本身发展的引导力量。

城市表层土壤及其所含的重金属可以作为一个系统,而与城

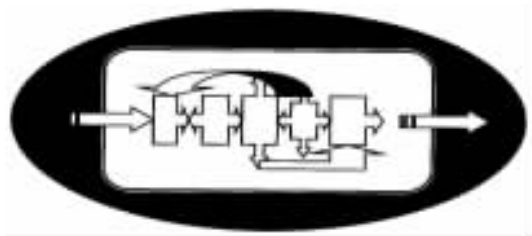


图3 可持续发展系统的示意图

(注:双线框的四边形区域表示所研究的可持续发展系统;小四方形成形以及与它们相连的箭头表示系统要素及其错综复杂的关系;椭圆形的灰色背景表示可持续发展系统的系统环境;椭圆形与四边形之间的箭头表示环境对系统的输入与输出变量。)

市表层土壤及其重金属相关的其它系统,如大气、地表水、地下水以及土壤自身的生态系统等,可以作为系统的环境。这样,可以通过系统环境的“导向”来量化城市表层土壤重金属的“相对环境承载力”,即将研究的表层土壤本身看作一个“黑箱”,通过系统环境的约束机制间接地获得城市土壤中重金属的相对环境承载力。对于城市表层土壤中的重金属而言,其系统环境的约束机制就是城市土壤中重金属的环境缓冲效应的有限性与生态效应的制约性(见图4)。

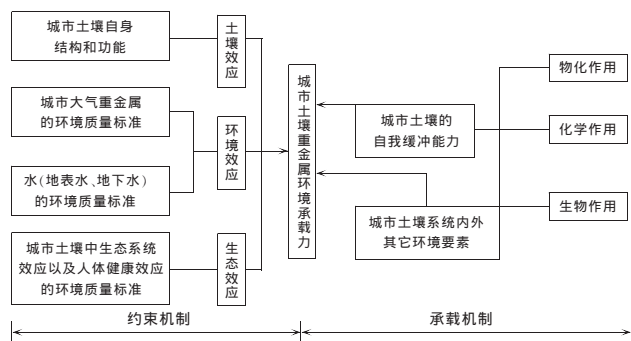


图4 城市土壤中重金属承载力的约束与承载机制

1.2.1 生态效应约束机制

生态效应约束机制是指土壤中重金属积累到一定程度后便对土壤中生物(动物特别是无脊椎动物,植物,微生物和真菌等)产生生态毒理效应(Eco-toxicological effect)。

土壤生态系统中,土壤和生物组分之间以及各生物组分之间相互依存和相互制约,构成一个完整的统一体。在正常情况下,系统的结构完整、功能健全,结构与功能之间相互适应并具有一定的内在自我调节能力。在人为活动的影响下,进入生态系统的重金属,其性质和数量一旦超过了土壤生态系统所能承受的阈值时,系统就受到干扰和破坏。现有研究表明,重金属污染不仅降低了有机物质的微生物转化效率,从而使微生物在逆境条件下维持其正常生命活动需消耗更多的能量,而且可以导致微生物群落的结构和功能多样性的改变。土壤中重金属污染也会导致土壤中的动物数量、物种的多样性和生物量的减少。

1.2.2 环境效应的约束机制

城市土壤环境承载力的环境效应约束机制是指土壤中的重金属在达到一定数量后,通过地表径流、淋溶、大风扬尘等途径,对地表水、地下水和大气环境产生危害。一般情况下,由于土壤是有机复合体,具有客观存在的环境承载力,因此,当外界输入的重金属的数量较小时,通过土壤的物理、化学吸附作用和生物作用,重金属转移释放到大气或水环境中的数量也相应较少,导致产生的环境风险很小;但当输入数量超过土壤的环境承载力,则会通

过径流、淋滤或扬尘等途径转移到周围环境中去,影响到其它生态系统中生物(包括人)的生命活动(见图5)。

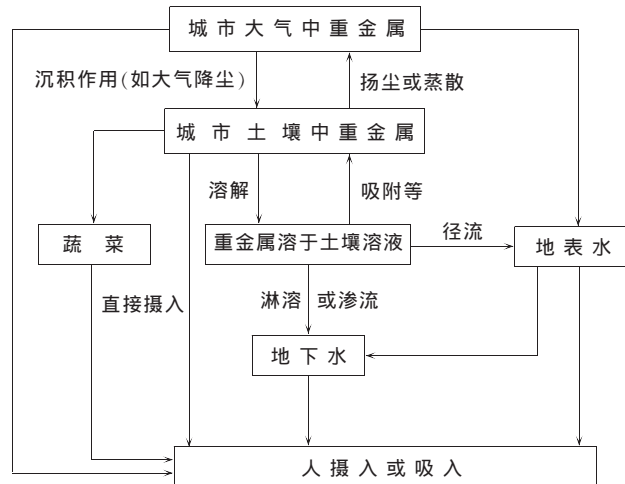


图5 城市土壤中重金属的环境转化

1.2.3 土壤效应的约束机制

土壤效应的约束机制是指当城市土壤中的重金属积累到一定程度后,导致土壤组分结构破坏与土壤功能的下降。土壤中物质和能量向外界输出,必然引起环境系统的变化,这就是土壤系统的环境效应;反过来,物质和能量由环境向土壤系统输入,也必然会引起土壤系统的结构和功能变化,当输入物质超过土壤系统的稳态,土壤结构和功能就会遭到破坏^[7]。土壤中重金属的累积对土壤自身的呼吸功能具有一定的影响作用,因此,土壤可接纳外界物质和能量的输入是有限的,这就是土壤系统的土壤效应约束机制。

1.3 城市土壤重金属“相对环境承载力”的量化模型和量化方法

要将环境承载力运用于实际工作中,需要将其量化。从前面对土壤重金属环境承载力的定义和内涵可以看出,若将城市土壤重金属的环境承载力(SCC)看成一个函数,那么它至少包含4个自变量:时间参量(T)、空间参量(S)、土壤自身结构和性质的状态参量(SS) (由于它对土壤环境承载力起了决定作用,所以又可以称为“决定参量”)、相应受体的重金属环境质量标准参量(EQ) (由于环境质量标准主要起评判和约束作用,所以又可以称此变量称为约束参量)。写成数学表达式为:

$$SCC=f(T, S, SS, EQ) \quad (3)$$

在一定时间和一定区域范围内,可以将环境系统自身的固有特征视为定值,那么城市土壤环境承载力的大小主要依赖于约束参量,即环境质量标准的高低(见图6)。

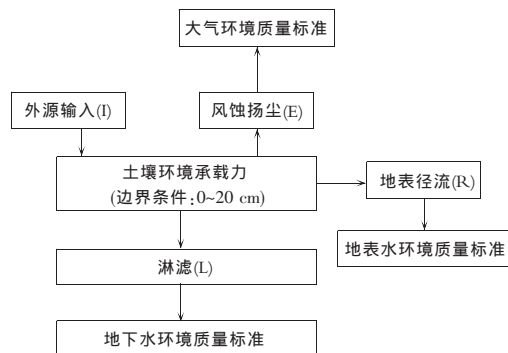


图6 城市表层土壤中主要的输入与输出以及相应的受体

这样,可依据目前的大气、地表水以及地下水的重金属含量的环境质量标准以及土壤生态效应的约束条件,量化城市土壤的重金属环境承载力。

以城市大气气溶胶中重金属的质量标准量化土壤中重金属的环境承载力为例:①确定大气中重金属的质量标准(Atmospheric Quality Standard, AQS);②找出城市表层土壤中重金属含量与大气气溶胶中重金属含量的定量的转移函数(Transfer Function, TF)。例如,乌克兰国家水文气象委员会曾对乌克兰 23 座城市表层土壤(0~2 cm)酸溶解形式重金属含量与这些重金属在空气气溶胶中多年平均含量之间的依赖关系进行研究,建立了相应的数学模型(见表 1)^[9]。我国在这方面未见文献相关报道。

表 1 城市表层土壤重金属酸溶解形式的含量(Y, mg/g)与空气气溶胶中多年平均含量(x, mg/m³)的关系

金属	回归方程	显著性水平 5%-M 下 *
Mn	$Y=1465x^{0.233}$	14.27
Zn	$Y=95.2+62.25x$	32.55
Cu	$Y=18.72+5.45x$	26.68
Pb	$Y=10.14+200.1x$	45.98

注: * 在 35 个监测管理网中随机选择 33 个。

最后,根据质量标准和转移函数反推出环境承载力。计算流程如图 7。

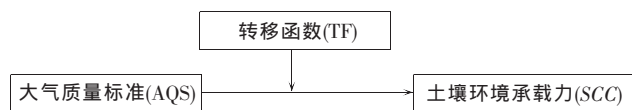


图 7 土壤环境承载力计算流程图

需要指出的是,由于选择的受体不同,执行不同的环境质量标准,导致通过不同受体环境质量标准获得的土壤重金属的环境承载力大小可能不同。因此,为了确保城市土壤的可持续管理和可持续发展,应该选择其最小的数值作为环境承载力的标准。例如,城市土壤可依据 n 种不同环境质量标准获得环境承载力的数值分别为 $SCC_1, SCC_2, \dots, SCC_n$, 那么,城市土壤可持续的环境承载力 SCC 应当取其最小值,即:

$$SCC = \min(SCC_1, SCC_2, \dots, SCC_n) \quad (4)$$

2 临界负荷(Critical Load, CL)与重金属污染的城市土壤的可持续管理和可持续发展

从图 1 可以看出,城市土壤重金属的环境承载力的大小决定了城市土壤中重金属的临界负荷,而临界负荷的大小是实现重金属污染的城市土壤可持续管理的充分条件。因此,城市土壤重金属临界负荷在城市土壤的环境承载力与城市土壤的可持续发展中起着“承上启下”的重要作用。

城市土壤重金属的临界负荷定义为:外源向城市表层土壤输入重金属的最大速率。从长期生态效应的角度看,以此速率向城市表层土壤输入的重金属不会对城市居民的健康以及自身和其它生态系统的结构与功能产生危害。

城市土壤重金属的临界负荷可以通过环境承载力进行量化。假设城市表层土壤某种重金属的含量为 $G(g/m^3)$,淋滤速率、风蚀扬尘速率、地表径流速率以及输入速率分别为 $L, E, R, I(g/m^3 \cdot year)$ (图 6),那么,土壤中重金属随时间的变化量为:

$$\frac{dG}{dt} = I - E - R - L \quad (5)$$

写成临界负荷的形式,即为:

$$\frac{dG}{dt} = CL - E_{CR} - R_{CR} - L_{CR} \quad (6)$$

式(6)中 L_{CR}, E_{CR}, R_{CR} 表示土壤中重金属在达到环境承载力的临界状态下(critical)的淋滤速率、风蚀扬尘速率、地表径流速率。

为了实现土壤的可持续发展(即达到土壤系统自身的稳态, $\frac{dG}{dt} = 0$),所以,土壤重金属的临界负荷 CL 的数值等于各项输出速率的总和,即:

$$CL = E_{CR} + R_{CR} + L_{CR} \quad (7)$$

如果以 $(E_Q + L_Q + R_Q)$ 来替代上式的 $(E_{CR} + R_{CR} + L_{CR})$,引入判别因子(F_D):

$$F_D = \frac{CL}{E_Q + R_Q + L_Q} \quad (8)$$

式中 E_Q, L_Q, R_Q 分别表示基于现存的城市大气、地下水和地表水质量标准的获得城市土壤中重金属的最大可接受的输出速率。

那么,根据 F_D 的数值大于 1 或小于 1,可以初步判断城市土壤中重金属的累积对于其它生态系统的环境风险的大小。如果 $F_D > 1$,则表明输入速率大于输出速率的总和,也就是说,土壤中重金属的累积可能会导致环境风险的发生;如果 $F_D < 1$,则表明其潜在的环境风险较小。

这样,通过比较城市土壤中不同重金属元素的 F_D 数值的大小,可以初步筛选出哪一种重金属元素最终超出环境质量标准的最大允许范围,即可能会导致最大的环境风险。

当然,由于 F_D 是利用输入速率与所有输出速率的对比后作出的判断,没有考虑到每一个被影响受体的特殊性,这样利用 F_D 数值就有可能低估了因为重金属的输入和最大输出之间的差异而使某些敏感的受体具有潜在的环境风险。所以, F_D 通常可以作为评价向城市表层土壤中输入重金属是否存在潜在环境风险的初始评估指标。

实际上,土壤中重金属元素是以多种赋存形态存在于多种不同的地球化学相中,因此,不同存在形态的重金属元素对不同受体产生的环境风险的大小具有很大差异。例如,土壤中微生物环境风险大小主要与土壤溶液中自由移动的离子活度大小有关;土壤淋滤的数量则决定于吸附态与土壤溶液中重金属元素的数量总和。因此,为了更好地维护土壤生态系统本身的结构和功能以及与其它生态系统的友好,必须统筹考虑到被研究的每一个受体并使之存在的潜在风险降到最小。也就是说,可持续发展的指标(F_S)必须满足以下条件:

$$F_S = \max(F_1, F_2, \dots) = \max\left(\frac{G_{ss}}{G_e}, \dots\right) \quad (9)$$

$$F_i = \frac{G_{ss}}{G_e} \quad (10)$$

其中 $F_1, F_2, \dots$ 等是相对应受体环境风险指标; G_{ss} 表示了土壤溶液中某种重金属的含量; G_e 表示维持土壤生态系统功能的质量标准。

如果进一步考虑每一种受体环境风险指标被超出的时间,可以引入临界的可持续时间(t_c):

$$t_c = \min(t_1, t_2, \dots) \quad (11)$$

t_1, t_2 等分别对应不同受体环境风险指标的临界时间。

可持续发展的指标(F_S)是准确评价重金属污染的城市土壤能否可持续发展的重要条件。

3 重金属输入速率的监控与城市土壤的可持续管理和可持续发展

为了能够从根本上实现重金属污染的城市土壤的可持续发展,不仅要研究城市土壤重金属的环境承载力和临界负荷,而且必须对当前城市土壤的外源重金属输入速率现状进行评估和管理。

现状评估和管理的基本步骤见图 1。首先,获取外源向城市表层土壤中输入速率(I_P)(这个数值通常可以通过测量一定时间范围内地衣或苔藓中含量来获得);其次,计算临界负荷与目前输

融通仓与物流金融服务创新

Finance, Transportation and Warehouse: Innovative Service Integrating Logistics and Finance

陈祥锋/CHEN Xiang-feng, 石代伦/SHI Dai-lun, 朱道立/ZHU Dao-li

复旦大学管理学院, 上海 200433

School of Management, Fudan University, Shanghai 200433, China

[摘要] 融通仓是一种物流和金融的集成式服务。首先给出融通仓的定义并阐述其系统结构;其次结合企业运营周期特点总结了融通仓的运作模式;最后探讨了融通仓的一个理论框架和风险管理系统。

[关键词] 融通仓, 物流, 供应链管理, 金融服务创新

[中图分类号] F253.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857-(2005)09-0030-04

Abstract : Finance, Transportation and Warehouse (FTW) is a new term for innovative service integrating logistics and finance. FTW was defined and its system structure was presented. Based on the cash-flow characteristics during different stages of a firm's operating cycle, three operational modes for FTW were summarized. Finally, a theoretical framework for the analysis of FTW was proposed.

Key Words : finance-transportation and warehouse, logistics, supply chain management, financial service innovation

CLC Number : F253.9

Document Code : A

Article ID : 1000-7857(2005)09-0030-04

1 前言

供应链管理是当前管理科学中一个非常活跃的领域,引起了学者和实践工作者的极大关注。供应链管理包括对物流、资金流和信息流的计划、控制和管理(图1)。但是,物流和资金流的管理往往是分开的:采购、生产、销售等部门负责物流;而资金流管理则是财会和出纳等部门的职能。这种物流和资金流的分离管理

丧失了一些供应链整合和协调的宝贵机会^[1]。物流和资金流的集成既能实现物流、资金流和信息流的统一管理与协调,又可成为企业的一个重要的利润源泉,从而进一步提高供应链效率并能够增强其竞争力。例如:Dell公司2003年的销售额为450亿美元,平均每天销售额为1.23亿美元,而其现金周期为5天,HP和IBM为30~90天。这使得Dell的现金周期至少比竞争对手少35

收稿日期:2005-01-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(70432001)、国家自然科学基金面上项目(70271033)资助

作者简介:陈祥锋,男,上海市邯郸路220号复旦大学管理学院,讲师,主要研究方向为金融供应链和供应链合同管理等;E-mail: chenxf@fudan.edu.cn

入速率之差($\Delta = I_p - CL$);最后,根据 $\Delta > 0$ 或 $\Delta < 0$ 来采取相应的管理措施和策略,即如果 $\Delta > 0$,表明目前的输入速率大于临界负荷,应该对重金属的输入加以控制,减少其输入速率和输入数量;如果 $\Delta < 0$,表明目前的输入速率没有超过临界负荷,即以目前的输入速率不会产生环境风险,所以应该严格控制目前的释放速率,确保不再增加外源重金属的输入速率。

4 结论

城市表层土壤由于接纳了多种污染源释放的重金属,所以其可以作为指示城市重金属环境污染的“示踪剂”。城市土壤中的重金属不仅能够污染地表水或地下水等水生生态系统,而且能够危害人类的健康。因此,研究城市土壤重金属的污染效应和环境风险、确保城市土壤中重金属的可持续管理和发展具有十分重要的现实意义。

参考文献(References)

[1] Moolemaar S W, Th M. Lexmond. Heavy-metal balance. I: General aspects of cadmium, copper, zinc and lead balance

studies in agro-ecosystems [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 1999, 2(4): 45~60

[2] 章家恩,徐琪.城市土壤形成特征及其保护[J].土壤,1997,(4):189~193

[3] 唐剑武,叶文虎.环境承载力的本质及其定量化初步研究[M].面向21世纪的环境科学与可持续发展.北京:科学出版社,2000.117~120

[4] 邓春郎.区域可持续发展环境规划原理与方法[D].北京:北京师范大学博士学位论文,1997

[5] 彭再德,杨凯,王云.区域环境承载力研究方法初探[J].中国环境科学,1996,16(1):6~10

[6] 陈述彭.环境保护与资源可持续发展[J].中国人口、资源与环境,1995b,5(3):11~17

[7] 高吉喜.可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2001

[8] 宋旭光.可持续发展测度方法的系统分析[M].大连:东北财经大学出版社,2003

[9] 孙丙彦.都市土壤中重金属含量对城市大气污染水平的依赖性[J].环境科学动态,1999,2:29~30

(责任编辑 李慧政)