

基于长江三角洲地表水典型土壤铜、锌环境容量探究

张宇峰^{1,2}, 夏 阳¹, 崔志强³, 骆永明²

(1. 南京工业大学 环境学院, 南京 210009; 2. 中国科学院 南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 南京市环境保护科学研究院, 南京 210013)

摘 要:我国水污染日益严重, I 类地表水地区较少, 目前可供饮用的 III 类水成为研究土壤地表水体系污染状况的热点。选取具有代表性的长江三角洲地区 4 种母质(河相、湖相、海相沉积物和沟沟堆积物)发育而成的土壤, 通过加入不同量的外源铜、锌金属培育污染土样, 使其分别达到国家土壤环境质量三级标准的 0.25、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 倍。在此基础上研究雨水和模拟酸雨条件下, 对模拟污染的土样进行解吸, 并对解吸曲线进行拟合, 在基于地表水 III 类水质标准的铜、锌环境容量的基础上, 计算了 4 种土壤在不同情况下的土壤环境容量, 并通过探讨国家土壤标准的吻合性, 提出针对不同母质的土壤, 对其重金属的土壤污染临界值进行适当的调整, 以达到 III 类水标准, 保障人类的安全与健康。结果表明, 在模拟雨水情况下, 基于地表水 III 类标准的 4 种土壤的环境容量分别为: SEBC-06: 铜 10 002 mg·kg⁻¹, 锌 848.1 mg·kg⁻¹; SEBC-19: 铜 1 162 mg·kg⁻¹, 锌 612.9 mg·kg⁻¹; SEBC-20: 铜 9 796 mg·kg⁻¹, 锌 1 047 mg·kg⁻¹; SEBC-25: 铜 720 mg·kg⁻¹, 锌 180.2 mg·kg⁻¹。

关键词:模拟酸雨; 母质; 铜; 锌; 地表水; 环境容量

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)12-2305-07

Critical Loads of Copper and Zinc in Typical Soils Based on the Surface Water in Yangtze River Delta

ZHANG Yu-feng^{1,2}, XIA Yang¹, CUI Zhi-qiang³, LUO Yong-ming²

(1. Environmental College, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 3. Nanjing Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210013, China)

Abstract: As increasing of serious water pollution, the class I surface water area was becoming less, so focusing on the class III surface water area was becoming more and more popular because the class III surface water could be used as drinking water. This work selected four typical soils formed from different parent materials (River sediments, Lacustrine sediments, Marine sediments and Gully deposits) in the Yangtze River Delta region, which were polluted through adding exogenous metals (Cu and Zn). The amount of exogenous metal ions (Cu and Zn) added 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 times separately of environmental quality standard for soils (GB 15818—1995). The desorption of contaminated soil samples using simulated rain and acid rain were studied. The critical loads of four kinds of soils under different conditions were calculated based on the standard critical loads of copper and zinc in the class III surface water. The critical values of heavy metal ions pollution should be adjust for appropriate numbers for different soil parent material. By this way, it would reach the standard of class III surface water, and would not be danger in people's health and security. The results showed that: under the simulated acid rain, the critical loads of four kinds of soils based on the class III surface water standard were 10 002 mg·kg⁻¹ Cu, 848.1 mg·kg⁻¹ Zn for SEBC-06; 1 162 mg·kg⁻¹ Cu, 612.9 mg·kg⁻¹ Zn for SEBC-19; 9 796 mg·kg⁻¹ Cu, 1 047 mg·kg⁻¹ Zn for SEBC-20, and 720 mg·kg⁻¹ Cu, 180.2 mg·kg⁻¹ Zn for SEBC-25.

Keywords: simulated acid rain; parent material; copper; zinc; surface water; environmental capacity

近年来土壤重金属污染问题受到了越来越多的关注^[1-5]。土壤重金属淋失受土壤性质(如含水率, 达西

水流量)、降水量、温度以及重金属本身性质的影响^[6-7]。而影响重金属赋存状态的土壤因子很多, 如土壤有机质和粘粒含量、粘土矿物、CaCO₃、铁锰氧化物、土壤阳离子交换量(CEC)、土壤 pH 和土壤养分状况等^[8]。进行土壤环境容量的研究可提前了解污染物在土壤中的富集^[9]、获取土壤可持续发展质量指标、了解环境的其他组成部分, 为土壤环境政策和法规制定、污染土

收稿日期: 2010-07-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2002CB410810)

作者简介: 张宇峰(1970—), 男, 江苏南京人, 博士, 副教授, 从事污染治理与资源化。E-mail: zhangyuf99@126.com

壤修复与管理提供基础,是达到污染物可持续管理的主要途径^[10-14]。随着我国工业化的发展,特别是长江三角洲地区,酸雨广泛存在并越来越严重,酸沉降加速了土壤的自然酸化过程,降低了土壤的盐基饱和度阳离子交换量,引起植物营养元素的淋失^[15-18]。有关酸雨对土壤中重金属迁移过程影响的相关研究引起了国内外学者的广泛重视^[19-20]。基于地表水体系的土壤重金属环境容量是指解吸液中的重金属浓度不导致地表水的水质超标对应的土壤中的重金属含量,由于我国水污染日益严重,Ⅰ类地表水地区较少,研究意义不大,我们仅从Ⅱ类地表水到Ⅴ类地表水进行研究,其中以饮用水水质(Ⅲ类)为研究重点。这是因为Ⅲ类地表水属于可供饮用的水,当超过Ⅲ类地表水时,就会对饮用水水源造成污染。

本文针对长三角地区典型土壤,通过模拟雨水、酸雨对模拟已污染的土样进行解吸,在基于地表水的Ⅲ类水质标准基础上,探究铜和锌两种重金属在不同程度的模拟酸雨情况下的土壤环境容量,并提出对目前国家土壤标准修订的建议。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤的理化性质见表1。所采土壤试样剔除其中的草根、石块等杂物,用陶瓷研钵研磨、混合后,过80目尼龙筛备用。

1.2 污染土样的培育

分别称取一定数量土壤试样,加入不同量的铜、锌标准溶液,间歇搅拌数天后,自然风干,使土样中铜、锌的含量分别达到国家土壤环境质量三级标准(分别为 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的0.25、0.5、1.0、

1.5、2.0、2.5倍。用陶瓷研钵研磨,过筛后备用。

1.3 解吸试验

分别称取培育的污染土样各 1.000 g 于 50 mL 塑料离心管中。按土液比1:20分别加入已经配制好的pH为3.0、4.0、5.6的模拟雨水和酸雨溶液(模拟雨水成分见表2),在电热恒温振荡水槽中恒温振荡12 h,静置一段时间后取出,离心,过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜,抽取上清液,采用火焰原子吸附法测定解吸平衡液中的铜、锌离子浓度,计算土壤对铜、锌的解吸量。

2 结果与分析

我国地表水环境质量标准(GB 3838—2002)中规定了各类地表水中铜、锌的最大浓度,如表3所示。

表3 地表水环境质量标准(GB 3838—2002)

Table 3 The standard of surface water quality

元素	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
铜/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\leq$	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0
锌/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\leq$	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0

2.1 乌黄土(SEBC-06)土壤在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

图1为不同酸雨情况下SEBC-06土壤铜、锌的解吸变化图。

从乌黄土(SEBC-06)的铜解吸图可见,随着模拟酸雨pH的升高,铜的解吸浓度下降,其中pH为3.0时,铜的最大解吸浓度为 $0.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低于地表水的Ⅱ类水质标准要求,说明此时解吸液中的铜对地表水没有污染。pH为5.6时(此为模拟雨水),铜的最大解吸浓度为 $0.138\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当土壤铜含量为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,解吸浓度为 $0.014\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,刚刚超过Ⅰ类水质标

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils for the experiment

编号	土壤采集地	土壤母质	土壤名称	OM值 $^{*}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH值	Cu/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
SEBC-06	江苏常熟	河相沉积物	乌黄土	6.20	7.39	36.86	103.7
SEBC-19	浙江嘉兴	湖相沉积物	青紫泥	18.93	6.78	30.51	96.18
SEBC-20	上海南汇	海相沉积物	滩潮土	6.33	8.30	35.19	103.9
SEBC-25	浙江湖州	沟沟堆积物	黄泥砂田	4.15	6.66	16.70	49.78

注:*为表层土有机质含量。

表2 模拟雨水的成分($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 The composition of simulated rain($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

$\rho P(\text{K}_2\text{SO}_4)$	$\rho P(\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O})$	$\rho P((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$	$\rho P(\text{CaCO}_3)$	$\rho P(\text{MgSO}_4)$	$\rho P(\text{NaOH})$
3.14	16.5	10.0	3.75	5.0	6.9

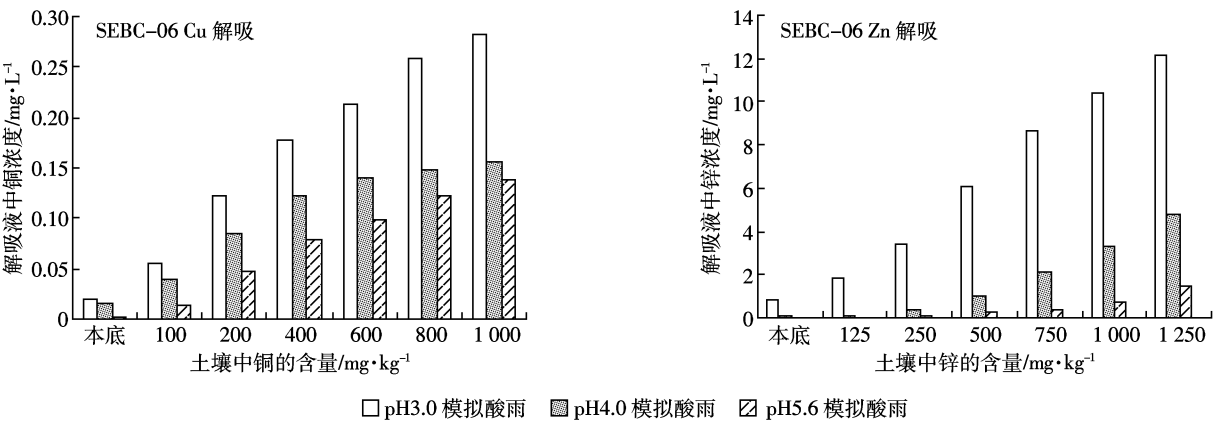


图 1 SEBC-06 解吸图

Figure 1 The desorption figure of SEBC-06

准要求的 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

从乌黄土(SEBC-06)的锌解吸图可见,锌的解吸浓度随着模拟酸雨 pH 的升高而降低,在土壤锌含量为 $250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的情况下,pH 为 3.0 时,锌的解吸浓度超过地表水 V 类水质标准要求,在 pH 为 5.6 的模拟雨水解吸中,土壤锌含量在 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时锌的解吸浓度为 $0.700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,土壤锌含量在 $1\ 250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时锌的解吸浓度为 $1.512\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,能够造成地表水 II 类、III 类水质超标。因此,在正常环境条件下,土壤中锌的环境容量在 $1\ 000\sim1\ 250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

根据图 1,对乌黄土(SEBC-06)的解吸进行曲线拟合,拟合的方程结果和相关度见表 4。

根据表 4 的解吸曲线拟合方程,结合各类地表水质量标准浓度限值,计算在不同酸雨情况下不导致各类地表水超标的土壤铜、锌环境容量,如表 5 所示。

从表 5 的数据可以看出,在 pH5.6 的模拟雨水解吸情况下,铜的最大环境容量为 $10\ 002\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而锌

的最大环境容量为 $1\ 025\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅是铜的 1/10 左右,可见土壤中的锌更容易随酸雨流失而进入地表水造成污染,土壤对铜的容纳能力更强,铜可以更好地被土壤固定。目前我国的土壤环境质量标准中规定的铜、锌三级标准分别为 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,长三角地区的地表水质量基本能满足 III 类水质标准,因此将土壤中铜、锌的三级标准和基于 III 类地表水计算的土壤铜、锌环境容量进行比较,可以发现,pH5.6 的雨水解吸时,乌黄土(SEBC-06)土壤铜的环境容量为 $10\ 002\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到土壤铜三级标准含量的 25 倍左右,锌的环境容量为 $848.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出土壤锌三级标准 69.6%。对地表水环境质量标准而言,乌黄土(SEBC-06)土壤中铜的标准限值还可以放宽,锌的标准限值也可以适当放宽。

2.2 青紫泥(SEBC-19)土壤在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

图 2 为 SEBC-19 在不同酸雨情况下铜、锌的解

表 4 SEBC-06 铜、锌解吸图拟合方程

Table 4 The desorption equation of copper and zinc of SEBC-06

项目	pH3.0 模拟酸雨	pH4.0 模拟酸雨	pH5.6 模拟酸雨
Cu 解吸图拟合方程	$y=0.000\ 2x+0.015\ 1\ R^2=0.994\ 5$	$y=0.000\ 1x+0.008\ 5\ R^2=0.957\ 7$	$y=0.000\ 1x-0.000\ 2\ R^2=0.996\ 0$
Zn 解吸图拟合方程	$y=7\times10^{-5}x^{1.540\ 3}\ R^2=0.964\ 7$	$y=0.022\ 2e^{0.0004\ 1x}\ R^2=0.963\ 3$	$y=0.036\ 6e^{0.003\ 9x}\ R^2=0.941\ 4$

表 5 SEBC-06 在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

Table 5 The basic loads of copper and zinc desopted by simulated rain from SEBC-06

项目	满足各类水质要求的铜、锌的环境容量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
	II 类地表水		III 类地表水		IV 类地表水		V 类地表水	
	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
pH3.0 酸雨解吸	4 924	498.2	4 924	498.2	4 924	781.4	4 924	781.4
pH4.0 酸雨解吸	9 915	928.5	9 915	928.5	9 915	1 097	9 915	1 097
pH5.6 酸雨解吸	10 002	848.1	10 002	848.1	10 002	1 025	10 002	1 025

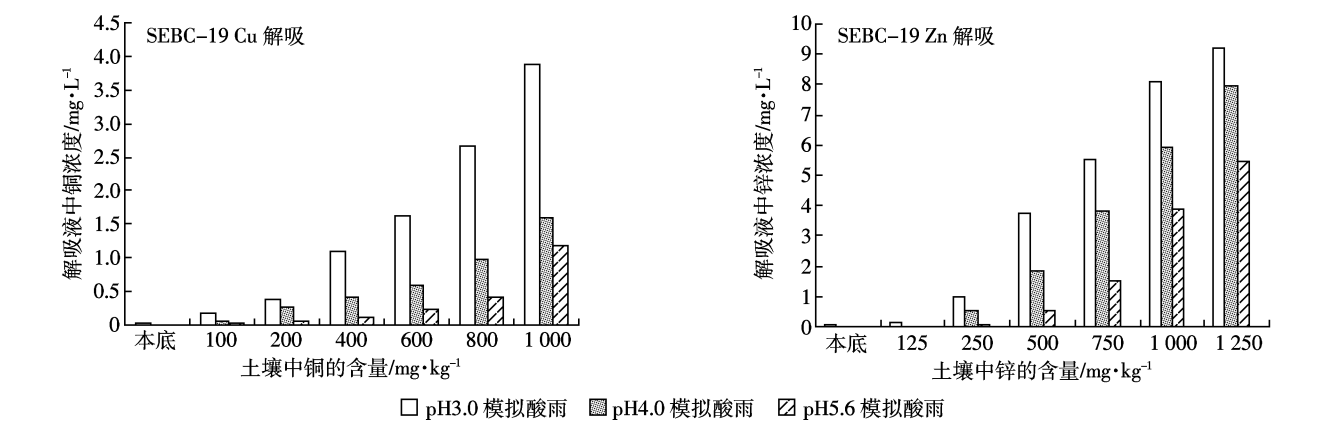


图 2 SEBC-19 解吸图

Figure 2 The desorption figure of SEBC-19

吸变化图。可以看出,铜、锌的解吸浓度都随着模拟酸雨 pH 的升高而降低。铜在 pH3.0 模拟酸雨时的最大解吸浓度为 $3.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远远超过了各类地表水的水质标准,在 pH5.6 模拟雨水解吸时的最大解吸浓度为 $1.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过 II 类地表水的水质要求,超标率为 20%。同样,锌在 pH3.0 模拟酸雨解吸时的最大解吸浓度为 $9.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,也超过各类地表水的水质标准,在 pH5.6 模拟雨水时的最大解吸浓度为 $5.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过 IV、V 类地表水的水质要求,超标率为 273%。根据图 2,对 SEBC-19 土壤的解吸曲线进行拟合,拟合的结果见表 6。

根据表 6 的拟合方程,结合各类地表水的水质标准计算,得到青紫泥(SEBC-19)土壤中铜、锌在不同酸雨情况下的环境容量见表 7。可以看出,青紫泥(SEBC-19)土壤在满足各类地表水水质要求的情况下,最大环境容量:铜在 pH5.6 模拟雨水时为 $1\ 162\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,锌在 pH4.0 模拟酸雨时为 $732.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同

样,将土壤中铜、锌的三级标准和基于 III 类地表水计算的土壤铜、锌环境容量进行比较,可以发现,pH5.6 雨水解吸时,青紫泥(SEBC-19)土壤铜、锌的环境容量都超过土壤三级标准,铜超出了 190%,锌超出了 22.58%。对地表水环境质量标准而言,青紫泥(SEBC-19)土壤中铜的三级标准还可以适当放宽,但是锌的余量已经不多,目前的标准基本适合。

2.3 滩潮土(SEBC-20)土壤在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

图 3 为滩潮土(SEBC-20)在不同酸雨解吸情况下铜、锌的解吸变化图。

滩潮土(SEBC-20)解吸图与乌黄土(SEBC-06)和青紫泥(SEBC-19)表现规律基本相似,滩潮土(SEBC-20)解吸图的拟合方程如表 8 所示。

根据表 8 拟合的方程和各类的地表水水质标准计算出的滩潮土(SEBC-20)土壤中铜、锌环境容量如表 9 所示。可以看出,滩潮土(SEBC-20)土壤在满足各

表 6 SEBC-19 铜、锌解吸图拟合方程

Table 6 The desorption equation of copper and zinc of SEBC-19

项目	pH3.0 模拟酸雨	pH4.0 模拟酸雨	pH5.6 模拟酸雨
Cu 解吸图拟合方程	$y=7\times10^{-5}x^{1.500\ 5}\quad R^2=0.952\ 9$	$y=0.012\ 5e^{0.004\ 2x}\quad R^2=0.926\ 7$	$y=1\times10^{-12}x^{3.914\ 5}\quad R^2=0.918\ 7$
Zn 解吸图拟合方程	$y=0.009\ 8x-1.205\ 1\quad R^2=0.972\ 4$	$y=8\times10^{-9}x^{2.931\ 5}\quad R^2=0.994\ 4$	$y=3\times10^{-7}x^{2.340\ 1}\quad R^2=0.961\ 2$

表 7 SEBC-19 在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

Table 7 The basic loads of copper and zinc desopted by simulated rain from SEBC-19

项目	满足各类水质要求的铜、锌的环境容量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
	II 类地表水		III 类地表水		IV 类地表水		V 类地表水	
	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
pH3.0 酸雨解吸	587.5	225.0	587.5	225.0	587.5	327.0	587.5	327.0
pH4.0 酸雨解吸	1\ 043	578.1	1\ 043	578.1	1\ 043	732.3	1\ 043	732.3
pH5.6 酸雨解吸	1\ 162	612.9	1\ 162	612.9	1\ 162	612.9	1\ 162	612.9

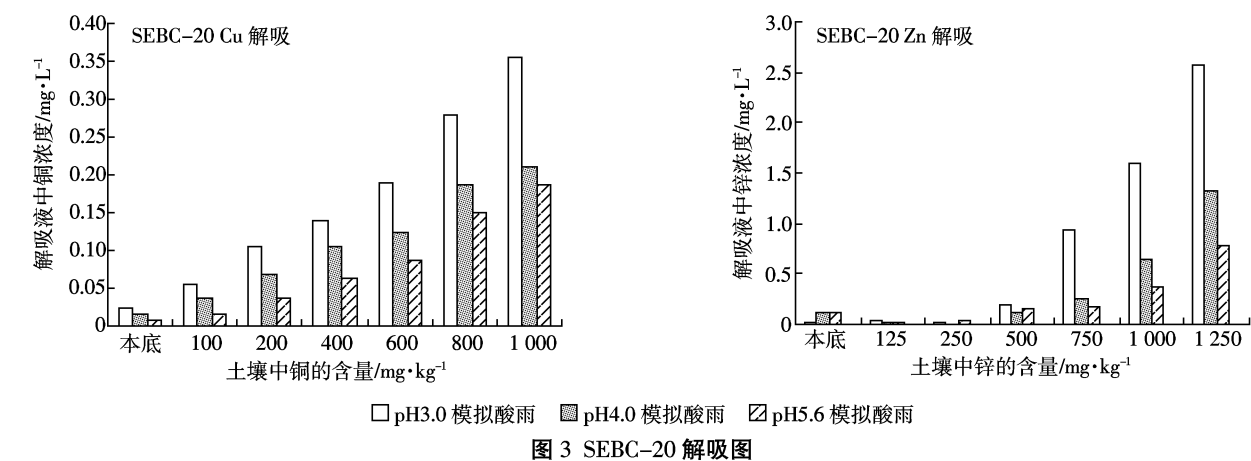


Figure 3 The desorption figure of SEBC-20

表 8 SEBC-20 铜、锌解吸图拟合方程

Table 8 The desorption equation of copper and zinc of SEBC-20

项目	pH3.0 模拟酸雨	pH4.0 模拟酸雨	pH5.6 模拟酸雨
Cu 解吸图拟合方程	$y=0.000\ 1x+0.049\ 2\ R^2=0.943$	$y=0.000\ 1x+0.031\ 8\ R^2=0.990\ 8$	$y=0.000\ 1x+0.020\ 4\ R^2=0.995\ 4$
Zn 解吸图拟合方程	$y=0.011\ 3e^{0.005x}\ R^2=0.905\ 2$	$y=0.003\ 8e^{0.005x}\ R^2=0.964\ 4$	$y=0.018\ 7e^{0.0038x}\ R^2=0.997\ 9$

表 9 SEBC-20 在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

Table 9 The basic loads of copper and zinc desopted by simulated rain from SEBC-20

项目	满足各类水质要求的铜、锌的环境容量/mg·kg ⁻¹							
	Ⅱ类地表水		Ⅲ类地表水		Ⅳ类地表水		Ⅴ类地表水	
	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
pH3.0 酸雨解吸	9 508	896.6	9 508	896.6	9 508	1 035	9 508	1 035
pH4.0 酸雨解吸	9 682	960.8	9 682	960.8	9 682	1 080	9 682	1 080
pH5.6 酸雨解吸	9 796	1 047	9 796	1 047	9 796	1 229	9 796	1 229

类地表水水质要求的情况下，最大环境容量：铜在 pH5.6 模拟雨水时为 9 796 mg·kg⁻¹，锌为 1 229 mg·kg⁻¹。将土壤中铜、锌的三级标准和基于Ⅲ类地表水计算的土壤铜、锌环境容量进行比较，可以看出，pH5.6 雨水解吸时，滩潮土(SEBC-20)土壤铜、锌的环境容量都超过土壤三级标准，铜达到了三级标准的 24.5 倍，锌达到三级标准的 2.0 倍。对地表水环境质量标准而言，SEBC-20 土壤中铜、锌的三级标准还可以适当放宽。

2.4 黄泥砂田(SEBC-25)土壤在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量

图 4 为黄泥砂田(SEBC-25)土壤在不同酸雨解吸情况下铜、锌的解吸变化图。

黄泥砂田(SEBC-25)土壤解吸图与前三种土壤表现规律基本相似，对黄泥砂田(SEBC-25)解吸图的拟合方程如表 10 所示。

根据表 10 的拟合方程和各类地表水水质要求计算出的黄泥砂田(SEBC-25)土壤的铜、锌环境容量如

表 11。

从表 11 可以看出，黄泥砂田(SEBC-25)土壤在满足各类地表水水质要求的情况下，在 pH5.6 的酸雨解吸下，铜最大环境容量为 720 mg·kg⁻¹，锌为 277.3 mg·kg⁻¹。把土壤中铜、锌的三级标准和基于Ⅲ类地表水计算的土壤铜、锌环境容量进行比较，可以发现，pH5.6 雨水解吸时，黄泥砂田(SEBC-25)土壤铜的环境容量达到了土壤铜三级标准的 1.8 倍，锌却只达到了土壤锌三级标准的 36%，说明在目前情况下，铜的三级标准还能符合要求，但是锌的三级标准应从严控制。对于黄泥砂田(SEBC-25)土壤应该制定更加严密的标准。

在制定土壤标准时，应考虑土壤母质的影响，通过基于地表水情况下的环境容量，研究铜和锌的基准值，可以使国家标准按母质类型进行细化。

2.5 4 种土壤铜、锌环境容量与标准的比较

通过对模拟雨水、酸雨解吸模拟污染土壤的解吸

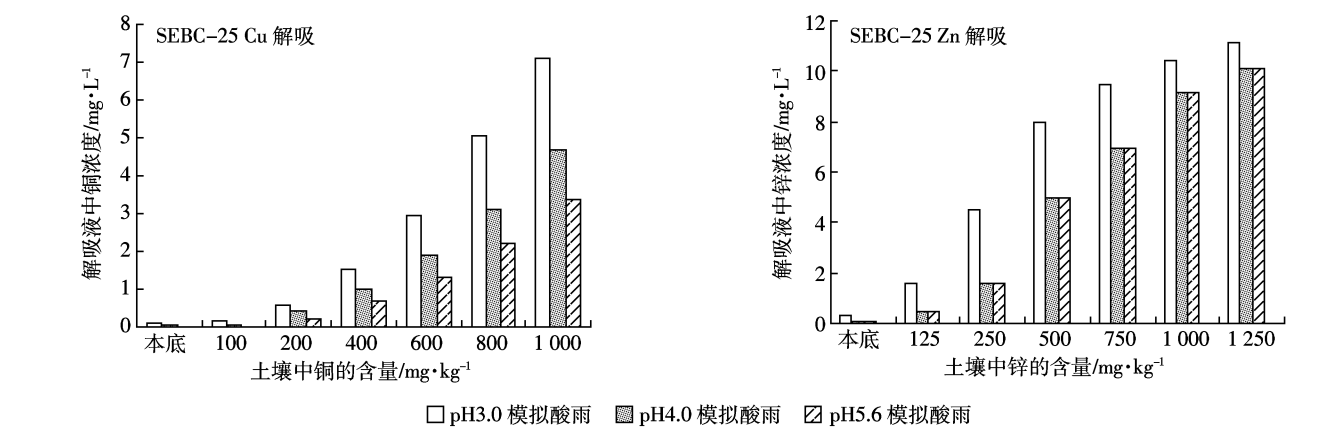


图 4 SEBC-25 解吸图

Figure 4 The desorption figure of SEBC-25

表 10 SEBC-25 铜、锌解吸图拟合方程					
Table 10 The desorption equation of copper and zinc of SEBC-25					
项目	pH3.0 模拟酸雨		pH4.0 模拟酸雨		pH5.6 模拟酸雨
Cu 解吸图拟合方程	$y=4\times10^{-5}x^{1.7098}$ $R^2=0.985\ 2$		$y=0.003\ 2x-0.325\ 3$ $R^2=0.984\ 3$		$y=3\times10^{-7}x^{2.2829}$ $R^2=0.997\ 3$
Zn 解吸图拟合方程	$y=3.791\ 4\ln x-15.669$ $R^2=0.968\ 2$		$y=0.010\ 3x-0.664$ $R^2=0.974\ 3$		$y=0.010\ 3x-0.856$ $R^2=0.968\ 3$

表 11 SEBC-25 在不同酸雨情况下的铜、锌环境容量								
Table 11 The basic loads of copper and zinc desorbed by simulated rain from SEBC-25								
项目	满足各类水质要求的铜、锌的环境容量/mg·kg ⁻¹							
	Ⅱ类地表水		Ⅲ类地表水		Ⅳ类地表水		Ⅴ类地表水	
	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
pH3.0 酸雨解吸	373.4	81.10	373.4	81.10	373.4	105.6	373.4	105.6
pH4.0 酸雨解吸	414.1	161.6	414.1	161.6	414.1	258.6	414.1	258.6
pH5.6 酸雨解吸	720.0	180.2	720.0	180.2	720.0	277.3	720.0	277.3

图进行曲线拟合,结合地表水的各类水质标准,计算了在雨水、酸雨情况下满足Ⅲ类地表水质要求的土壤中铜、锌的环境容量。并将模拟雨水情况下铜、锌的环境容量和土壤铜、锌三级标准进行比较,探讨了4种土壤与目前土壤环境质量的吻合性,具体结论如表 12。

3 结论

(1)在不同 pH 模拟雨水、酸雨的解吸情况下,基于地表水水质标准的铜、锌环境容量随着模拟酸雨 pH 的增加而增加。

表 12 4 种土壤铜、锌环境容量与标准的比较					
Table 12 The comparison between basic loads and standard of copper and zinc					
项目	满足Ⅲ类地表水标准的环境容量 B/mg·kg ⁻¹		土壤三级标准量 S/mg·kg ⁻¹	B/S	标准修改建议
SEBC-06	Cu	10 002	400	25.0	可以较大程度放宽
	Zn	848.1	500	1.70	适当放宽
SEBC-19	Cu	1 162	400	2.90	适当放宽
	Zn	612.9	500	1.22	适当放宽
SEBC-20	Cu	9 796	400	24.5	可以较大程度放宽
	Zn	1 047	500	2.09	适当放宽
SEBC-25	Cu	720	400	1.80	适当放宽
	Zn	180.2	500	0.360	较大幅度减少

(2)根据拟合曲线,计算了4种土壤在不同情况下的土壤环境容量。在pH5.6雨水解吸下,基于地表水Ⅲ类水质标准的4种土壤的环境容量分别为:SE-BC-06:铜 $10\,002\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,锌 $848.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;SEBC-19:铜 $1\,162\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,锌 $612.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;SEBC-20:铜 $9\,796\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,锌 $1\,047\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;SEBC-25:铜 $720\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,锌 $180.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(3)通过与土壤三级标准进行对比,除SEBC-25土壤中锌的环境容量小于三级标准外,其余均大于三级标准,可以考虑适当放宽标准。

(4)通过基于地表水的铜、锌环境容量的研究可知,土壤母质是决定土壤重金属环境容量的一个重要影响因素,需要在今后的环境容量研究中予以重视。

参考文献:

- [1] Shrivastav R, Mathur S K, Srivastava M M. Bricks reveal recent history of heavy metal pollution in soil around a North Indian City[J]. *The Science of the Total Environment*, 1998, 209:41-46.
- [2] Susan T, Karin B, Roland M, et al. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(3):937-944.
- [3] Ke Xin, Li Pei-jun, Zhou Qi-xing, et al. Removal of heavy metals from a contaminated soil using tartaric acid[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006(4):727-733.
- [4] Sun B, Zhao F J, Lombi E, et al. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 113:111-120.
- [5] 曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 等. 3种萃取剂对土壤重金属的去除及其对重金属有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4):979-982.
ZENG Min, LIAO Bo-han, ZENG Qing-ru, et al. Effects of three extractants on removal and availabilities of heavy metals in the contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):979-982.
- [6] Kelleer A, von Steiger B, van der Zee S E A T M, et al. A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems[J]. *Environ Qual*, 2001, 30:1976-1989.
- [7] De Vries W, Bakker D J. Manual for calculation critical loads of heavy metals for terrestrial ecosystems[R]. Guidelines for critical, calculation methods and input data. DLO166, Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, 1998.
- [8] Bertach P M, Seaman J C. Characterization of complex mineral assemblages: implications for contaminant transport and environmental remediation[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 1999, 96:3350-3357.
- [9] Schuln R. Contaminant mass balances in soil monitoring[P]. Soil monitoring: Early detection and surveying of soil contamination and degradation, 1993, Basel, Switzerland, 55-71.
- [10] Gilbert A R, Harger, Meyer F M. Criteria for sustainability in the development of indicators for sustainable development[J]. *Chemosphere*, 1996, 33:1739-1748.
- [11] Moolenaar S W, Lexmond Th M. Heavy metal balances of agro-ecosystems in the Netherlands[J]. *Neth J Agric Sci*, 1998, 46:171-192.
- [12] van der Zee S E A T M, de Haan F A M. Monitoring, control and remediation of soil degradation by agrochemicals, sewage sludge and composed municipal wastes[J]. *Adv Geoecology*, 1998, 31:607-614.
- [13] Tiktak A R, Alkemade H, van Grinsven, et al. Modelling cadmium accumulation on a regional scale in the Netherlands[J]. *Environ Qual*, 1998, 28:461-470.
- [14] 王代长, 蒋新, 卞永荣, 等. 模拟酸雨对不同土层酸度和 K^+ 淋失规律的影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(2):30-34.
WANG Dai-zhang, JIANG Xin, BIAN Yong-rong, et al. The influence of simulated acid rain acidity and K^+ leaching regulation of different soil layers[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(2):30-34.
- [15] 高太忠, 戚鹏, 张扬, 等. 酸雨对土壤营养元素迁移转化的影响[J]. *生态环境*, 2004, 13(1):23-26.
GAO Tai-zhong, QI Peng, ZHANG Yang, et al. Effects of simulating acid rain on the migration and transformation of nutrient elements in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004, 13(1):23-26.
- [16] 许中坚, 徐冬梅, 刘广深, 等. 红壤中铝、锰和铁在酸雨作用下的释放特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):20-23.
XU Zhong-jian, XU Dong-mei, LIU Guang-shen, et al. Release of Al, Mn and Fe from red soils under influence by simulated acid rain[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(3):20-23.
- [17] 许中坚, 李方文, 刘广深, 等. 模拟酸雨对红壤中铬释放的影响研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(2):18-21.
XU Zhong-jian, LI Fang-wen, LIU Guang-shen, et al. Study on release of chromium from red soils under the influence by simulated acid rain[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2):18-21.
- [18] 赵其国, 骆永明. 开展我国东南沿海经济快速发展地区资源与环境质量问题研究建议[J]. *土壤*, 2000, 4:169-172.
ZHAO Qi-guo, LUO Yong-ming. Carry out the rapid development of China's southeastern coastal areas of economic resources and environmental qualities of the proposed[J]. *Soil*, 2000, 4:169-172.
- [19] 朱志良, 张华, 陈玲, 等. 模拟酸雨对污泥中重金属元素的淋洗作用研究[J]. *清洗世界*, 2006, 22(1):1-4.
ZHU Zhi-liang, ZHANG Hua, CHEN Ling, et al. Study on leaching heavy metals from sewage sludge with simulated acid rain[J]. *Cleaning World*, 2006, 22(1):1-4.
- [20] 许中坚, 刘广深. 模拟酸雨对红壤重金属元素释放的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5):89-93.
XU Zhong-jian, LIU Guang-shen. Release of heavy metal elements from red soils under influence by simulated acid rain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5):89-93.