

高汞背景土壤中Hg在NaCl型融雪剂作用下迁移规律研究

王艳娇¹, 杨鸿波²

¹贵州省分析测试研究院, 贵州 贵阳

²贵州医科大学, 贵州 贵阳

收稿日期: 2021年11月6日; 录用日期: 2021年12月8日; 发布日期: 2021年12月16日

摘要

冬季下雪天气, 为保证交通畅达, 使用融雪速度快、不必运输和处理积雪、交通恢复快等优点的融雪剂。综合考虑价格低廉、不易受环境温度影响、低温融雪效率较高等特点后氯盐型融雪剂被广泛应用。融雪剂的大量施用致使土壤结构破坏和肥力下降, 形成盐碱化; 土壤微生物种群和酶活性降低, 土壤活力降低; 增加和活化土壤重金属, 造成重金属污染。通过汞在土壤中的迁移试验, 研究了融雪剂对高背景汞地区土壤中汞的迁移规律。结果表明: 土壤在NaCl作用下, 以Langmuir方程求得的土壤对重金属吸附作用强弱的指标参数 k_1 值由0.3降至0.03, 说明 Hg^{2+} 在土壤中的吸附能力降低。由淋溶实验数据得出, 在NaCl作用下, 流出液检测到汞离子的时间相差30小时, 说明NaCl的加入使汞迁移提前。而土柱实验得出, Hg^{2+} 主要集中在土壤表层, 随着土壤深度的增加其含量逐渐减小, 随着淋滤液的增加, 离子的浓度峰向土壤深处移动, 并且在NaCl的作用下, 离子迁移的速率加快, 向下迁移能力增强。通过研究氯化钠对土壤中汞的迁移行为影响, 对揭示在极端气候公路铺洒氯化钠型融雪剂对汞的迁移行为有重要意义。

关键词

土壤, 汞, 迁移规律, 氯化钠

Study on Hg Migration in Soil with High Mercury Background under the Action of NaCl Type Snowmelt Agent

Yanjiao Wang¹, Hongbo Yang²

¹Guizhou Academy of Analysis and Testing, Guiyang Guizhou

²Guizhou Medical University, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 6th, 2021; accepted: Dec. 8th, 2021; published: Dec. 16th, 2021

Abstract

In winter rain and snow weather, in order to ensure smooth traffic, the use of snow melting agent has the advantages of fast snow melting speed, no need to transport and deal with snow, and fast traffic recovery. In consideration of the characteristics of low price, not easy to be affected by ambient temperature and high low-temperature snow melting efficiency, chlorine salt type snow melting agent has been widely used. The large amount of application of snow melt agent results in the destruction of soil structure, the decline of soil fertility and the formation of salinization. Soil microbial population and enzyme activities decreased, and soil vitality decreased. Increase and activate soil heavy metals result in heavy metal pollution. The migration of mercury in soil by snowmelt agent in high background mercury area was studied. The results showed that under NaCl, the index parameter K1, which was calculated by Langmuir equation, decreased from 0.3 to 0.03, indicating that the adsorption capacity of Hg^{2+} in soil decreased. According to the data of leaching experiment, under the action of NaCl, the time difference between mercury ions detected in the outflow liquid was 30 hours, indicating that the addition of NaCl made mercury migration advance. The soil column experiment showed that Hg^{2+} was mainly concentrated in the soil surface, and its content gradually decreased with the increase of soil depth. With the increase of leachate, the concentration peak of ions moved to the depth of soil. Moreover, under the action of NaCl, the rate of ion migration was accelerated, and the downward migration ability was enhanced. The study of the effect of sodium chloride on mercury migration in soil is of great significance to reveal the effect of sodium chloride snowmelt on mercury migration in extreme weather highway.

Keywords

Soil, Mercury, Migration Patterns, NaCl

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

20 世纪 40~50 年代, 以美国为代表的发达国家的经济与交通取得长足发展, 城市间的高速公路甚至逐步取代了铁路的功能而成为经济发展的主体命脉, 保证城市高速公路交通畅达, 成为现实而又特别重要的任务。冬季下雪是公路、铁路交通的“大敌”, 就有了采用融雪剂融冰化雪的方法[1]。融雪剂主要分为氯盐型、非氯盐型及混合型; 若按化学组成划分, 还可以分为无机、有机和混合型[2] [3]。

由于我国冬季降雪次数较多, 给交通造成了影响, 目前的除雪方式有机械式除雪、电热除雪、洒水除雪, 但这些除雪方式会耗费大量的人力、物力、财力。洒布融雪剂除雪具有融雪速度快、不必运输和处理积雪、交通恢复快等优点, 然而传统氯盐型融雪剂的使用对环境造成了新的污染[4] [5]。于是环保型融雪剂就应运而生, 但是环保型融雪剂也有它的缺点, 例如, 醋酸钾融雪剂融雪效果好、腐蚀性很小, 但是价格非常昂贵, 一般只适用于机场等地; 传统的环保型融雪剂醋酸钙镁盐(CMA)虽具有无污染、环保的特点, 但由于原料昂贵, 融雪效果受环境温度影响很大, 低温融雪效率较低, 对雪的融化能力不如氯化钠, 并没有得到广泛使用[6] [7] [8] [9] [10]。然而在消除道路冰雪的同时, 随着温度的逐渐升高, 含有 NaCl 的积雪大量融化后进入道路周边土壤和地下水环境, 造成“盐害”次生灾害。

融雪剂的大量施用会改变道路周围的土壤的理化性质, 降低土壤中有机质的含量, 从而影响土壤生物化学性质和土壤中重金属迁移转化。

1) 土壤结构破坏和肥力下降, 形成盐碱化问题。根据土壤中 Cl^- 沉积作用和分配规律, 在距离公路 0~100 m 有 45% 左右的融雪剂沉降在地表, 破坏了土壤中 Cl^- 的浓度平衡降低了土壤渗透能力[11]。通过分析王艳春[12]对道路绿化带分层采样的数据, 上部表层土(0~10 cm)全盐量分析结果为全部属于盐土, 下部表层土(10~20 cm)有 80% 盐渍化, 得出是融雪剂随融化的雪水进入土壤, Na^+ 可以置换土壤中的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} , 使土壤的 pM (金属离子浓度的负对数) 值升高, 导致土壤板结[13], 土壤透水性大大降低[14]。同时还会造成土壤含水量降低, 土壤 pH 值升高和阳离子交换量显著下降, 土壤容重增大, 有机质含量降低, 电导率增加, 进而降低了土壤肥力, 增加了环境风险[15]。

2) 土壤微生物种群和酶活性降低, 形成土壤活力降低问题。捷克学者 Cernohlavko 研究融雪剂对路旁森林土壤质量影响表明, 微生物量和呼吸活性显著下降, 微生物群落代谢熵增高表明明显处于胁迫作用。土壤的酶活性会随电导率的升高而降低, 在中度腐殖质土壤中, 酶活性降低比例较高[16], 这是融雪剂降低了土壤微生物量导致, 而不是酶的失活。此外, 硝化生物往往对高土壤酸度敏感, 当土壤 pH 值小于 5.0 时他们的活动明显减少。通过分析孙婷婷[17]的研究试验得出在土壤 pH 值从酸性转向近中性或以上, 不再受酸性约束时, 可能会提高有机质矿化和硝化速率, 但最终会导致通过挥发损失氨, 通过反硝化作用损失硝酸盐。

3) 增加和活化土壤重金属, 造成重金属污染。融雪剂的大量使用会使土壤酸碱度发生变化, 影响重金属浓度、形态、垂直迁移并改变毒性。对重金属形态分布的影响。通过分析邹苗[18]、赵菲[19]两者对 NaCl 和 CMA 两种融雪剂对土壤典型重金属结合态影响的实验得出, 由于高质量分数的 Na^+ 有利于土壤胶体扩散, 导致与土壤胶体紧密吸附的金属易被释放, 使得 NaCl 对 Zn 的可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态影响较大; 而对 Cu 的各种结合态影响均较小, CMA 中的 CH_3COO^- 和 CH_3COO^- 生物降解产生 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 对 pH 起缓冲作用, 且 CMA 的还原能力较强, 土壤中有高质量分数的阳离子, 使得 CMA 对 Zn 和 Cu 的结合态影响均小于 NaCl。总结得出 NaCl 比 CMA 影响更显著, 但是对有机/硫化物结合态和残渣影响很小, 基本不会影响到 Cu、Pb 的形态变化。

对重金属迁移转化的影响。通过分析 Norrstrom [20]的融雪剂高速公路旁的土壤室内淋溶实验, 得出所测定的指标中 Pb 迁移转化能力变化最大, Pb、Fe 和 TOC 的浓度由于胶体促进作用相关性显著, 分析 Cd、Zn 迁移的主要原因之一是 Cl^- 的络合作用。结合赵菲[19]实验总结得出, 重金属的垂向迁移在一定程度上都受到了融雪剂的影响, 但 Cd、Zn 和 Ni 在土壤中大比重以移动性和活性较高的形态存在, 融雪剂可以通过促进离子交换和影响土壤理化性质进而促进 Cd、Zn 和 Ni 的释放和迁移, 但 Cu 和 Pb 在土壤中大比重以稳定性较高的形态存在, 所以对土壤中 Cu、Pb 的迁移影响较小[21]。

我国矿产资源丰富, 随着冶金、化工等产业的高速发展, 土壤重金属污染已成为我国重要的环境问题。土壤重金属污染的主要来源有工业“三废”、矿山开采废水、矿渣淋滤水、化肥农药、化石燃料燃烧排放和土壤母质等[22] [23]。金属矿开采、冶炼和尾渣堆放是造成周边环境重金属污染的主因[24] [25]。位于贵州省内的丹寨汞金矿床是典型卡林型金矿床, 研究表明, 矿区附近的废渣与土壤汞的含量高达 $15\sim 327 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远远超出我国($0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和贵州($0.102 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)土壤背景值以及国家土壤环境质量 (GB15618-2018): $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, $\text{Hg} \leq 1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [26]。

汞污染矿渣与土壤, 不仅源源不断向大气释放气态单质汞[27], 且给当地的食物链安全带来巨大的环境风险。刘荣相等[28]研究表明, 丹寨汞污染已导致苔藓群落的退化。郑顺安等通过室内土柱淋溶试验研究了 22 中典型土壤在酸雨(pH5.6)作用下污染土壤 Hg (外源添加 $2 \text{ mg}/\text{kg}$)的淋溶试验和释放特征, 并利用优化设计的动态通量箱, 对不同盐分(NaCl 和 Na_2SO_4)和盐度(0%~5%)的盐渍化土壤-气界面汞交换通量进行动态监测, 研究盐渍化土壤汞和大气释放的影响[29] [30]。李楚娴等利用室内模拟试验, 探讨了三峡

水库消落区淹没后土壤、植物汞释放特征及其在斑马鱼体的富集情况[31]。未见针对喀斯特地区高汞背景土壤中汞因雪凝天气施洒氯化钠型融雪剂的迁移规律研究。

本文以黔南丹寨土壤——黄壤为研究对象, 实验室内进行玻璃土柱淋溶迁移模拟试验以及吸附-解吸试验, 最大化模拟自然条件, 得出高汞背景土壤中汞受氯化钠型融雪剂影响的迁移规律。通过研究土壤中汞的迁移变化, 了解氯化钠对汞的迁移行为存在影响, 这对揭示在雪凝气候公路铺洒氯化钠对汞的迁移行为的影响有重要意义。

2. 实验部分

2.1. 供试材料

贵州省黔南丹寨地区的高速公路旁未受融雪剂污染地块, 采用 GPS 定位, 采取 30 个土壤样品, 土壤经风干、粉碎后, 过 20 目筛备用。在实验室完成土壤对汞的吸附和迁移实验。

2.2. 实验仪器及试剂

北京海光原子荧光光度计(AFS-230E); 玻璃柱(直径 5 cm, 高 35 cm); 50 mL 具塞比色管; 100 mL 烧杯; 硝酸(优级纯); 盐酸(优级纯); 汞单元素标准溶液(GBW(E)08617, 中国计量科学研究院), 土壤成分分析标准物质 GSS-5 (GBW07405, 地球物理地球化学勘查研究院)。

3. 实验方法

1) 将所取土样冷冻干燥后研磨过 100 目筛, 取 0.1 g 样品用 1 + 1 王水溶液在沸水浴中消化 2 h, 用原子荧光光度计测定总汞含量。

2) 土壤对汞的吸附/解吸试验, 以 0.01 mol·L⁻¹ 的 KNO₃ 溶液为背景溶液, 以 HgCl₂ 作溶质, 配制一系列溶液; 再以 0.01 mol·L⁻¹ 的 KNO₃ + NaCl 溶液为背景溶液, 以 HgCl₂ 作溶质, 配制一系列溶液。以 50 mg·L⁻¹ 的 HgCl₂ 溶液为背景溶液, 配制一系列 NaCl 溶液。称取土样 1.000 g 于 10 个 50 mL 的离心管中, 按土液比[32] 1:10 加入 10mL 配制好的不同质量浓度的 Hg²⁺ 溶液。将混合均匀的离心管密封放置在振荡器内恒温(25°C ± 1°C)振荡 2h, 在恒温箱内恒温(25°C ± 1°C)静置 24 h, 使得各供试土样达到吸附平衡。将上清液转移到干燥的离心试管中离心(4500 r·min⁻¹)分离, 取上清液用原子荧光光度计测定 Hg²⁺ 浓度。

3) 淋溶实验参考齐志明等研究者采用的方法[33], 选用 35 cm 高玻璃柱模拟土壤重金属迁移情况, 重金属溶液浓度为 100 mg·L⁻¹。根据采样地区年降雨量, 设置淋溶液体积, 控制滤液在 200 个小时内滤完, 每 10 个小时接一次样上原子荧光光度计测定汞含量。

4. 实验结果

4.1. 土壤基本性质及汞含量测定结果

表 1、表 2 分别为试验土壤基本理化性质和汞背景值情况, 可见试验土壤背景值高于中国土壤背景值及世界土壤背景值, 为高背景值土壤。

Table 1. Basic physical and chemical properties of Qiannan Danzhai in Guizhou province
表 1. 贵州黔南丹寨地区土壤基本理化性质

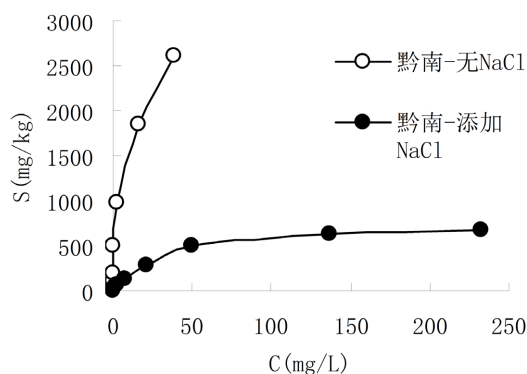
| 样品编号 | pH | 有机质含量/(g·kg ⁻¹) | CEC/(cmol·kg ⁻¹) | 颗粒组成 | | |
|------|------|-----------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|
| | | | | 粘粒/% | 粉粒/% | 砂粒/% |
| 黔南土样 | 5.86 | 15.99 | 20.32 | 23.55 | 51.69 | 24.56 |

Table 2. Hg average statistics of Qiannan in Guizhou province**表 2.** 贵州黔南丹寨地区 Hg 平均值统计

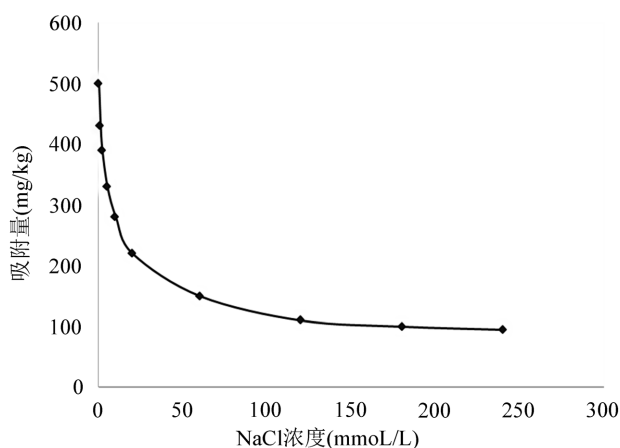
| 重金属 | 黔南丹寨地区 | | | 中国土壤(mg·kg ⁻¹) | 世界土壤(mg·kg ⁻¹) |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | 平均值(mg·kg ⁻¹) | 最小值(mg·kg ⁻¹) | 最大值(mg·kg ⁻¹) | | |
| Hg | 0.451 | 0.035 | 3.72 | 0.065 | 0.1 |

4.2. 土壤中汞的吸附解吸规律及氯化钠对其影响

图 1 给出了土样在有无 NaCl 作用下对 Hg 等温吸附 S-C 关系曲线, NaCl 作用下, 在试验浓度范围内, NaCl 对土壤吸附 Hg²⁺有强烈的抑制作用, 且这种抑制作用随着 Hg²⁺浓度的增加而增大。

**Figure 1.** S-C curve of Hg adsorption in three regions**图 1.** 三个土样对 Hg 吸附的 S-C 关系曲线

由图 2 可以看出, 在 Hg²⁺浓度 50 mg·L⁻¹ 不变的情况下, 土样对 Hg²⁺的吸附随 NaCl 浓度的增加而降低。NaCl 浓度为 10 mmol·L⁻¹ 时为转折点, 当其浓度小于 10 mmol·L⁻¹ 时, 土壤对 Hg²⁺的吸附量呈线性下降; 当 NaCl 浓度大于 10 mmol·L⁻¹ 时, 土壤对 Hg²⁺的吸附量下降速度缓慢并趋于平衡, 此时土壤对 Hg²⁺的吸附量下降到最大限度。

**Figure 2.** The influence of Hg adsorption with changing concentration of NaCl**图 2.** NaCl 浓度变化对土壤 Hg 吸附量的影响

低浓度下 Hg²⁺首先与土壤的高吸附位点结合, 随着处理浓度的增加, 与土壤的高吸附位点结合呈

现饱和以后才依次与低吸附位点结合从而使土壤中的 Hg^{2+} 与溶液中的 Hg^{2+} 浓度形成动态平衡[34]。NaCl 的竞争吸附作用使 Hg^{2+} 的最大吸附量降低, 且平衡吸附量随着 NaCl 浓度的增加存在平衡趋势。随着加入溶液汞离子浓度增加, S-C 关系曲线斜率逐渐减小, 吸附量趋于一个稳定的数值, 逐渐达到最大吸附量。

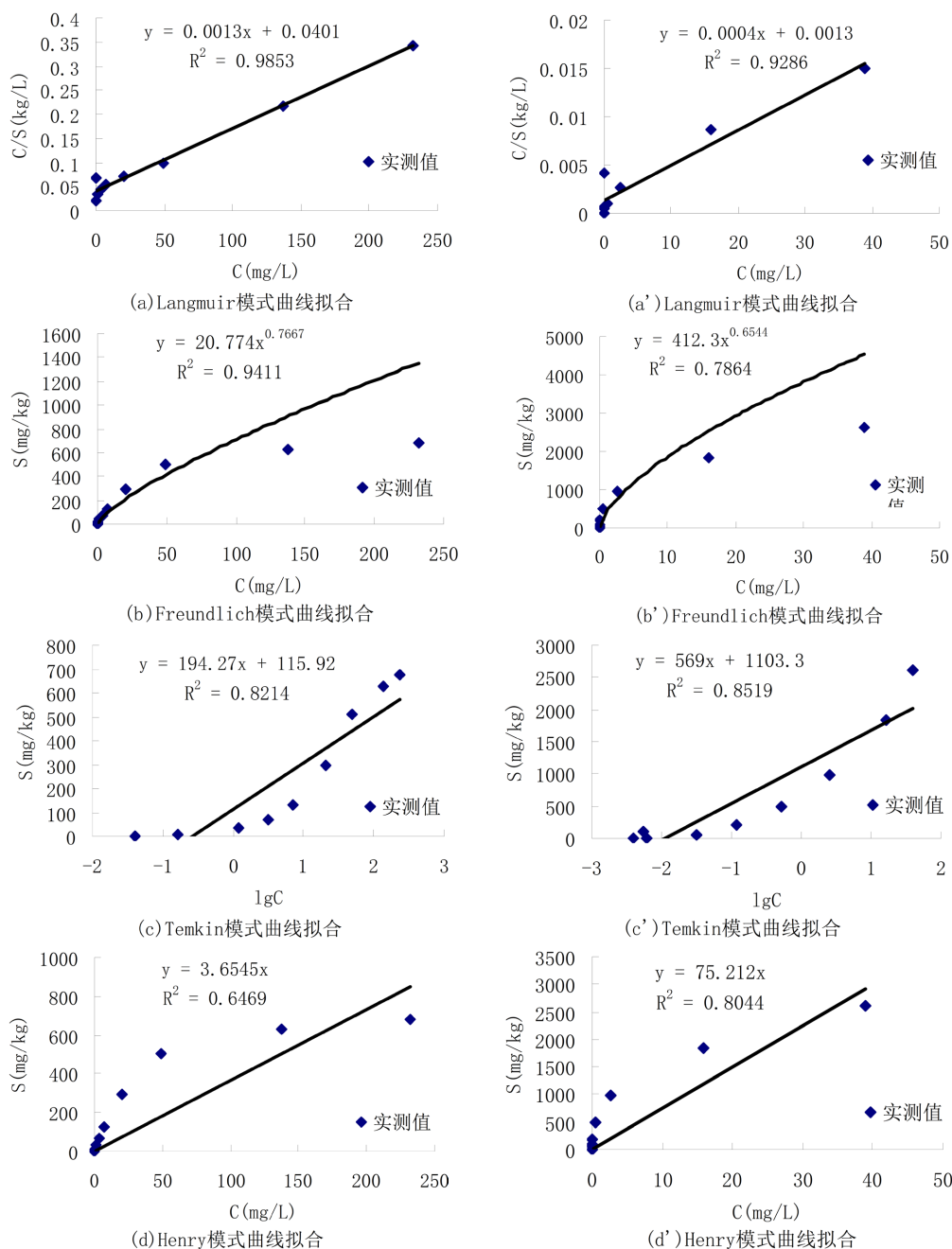


Figure 3. Hg adsorption model fitting of the soil sample in tow types solution

图 3. 土样对两种溶液中 Hg 吸附模式曲线拟合

由上图 3 可以看出, 在有、无 NaCl 作用下, Langmuir 模式都能较好的拟合土样对 Hg^{2+} 吸附的实验数据, 相关系数在 0.95 以上, 拟合效果较好。以 Langmuir 方程求得两种条件下相关参数列于表 3 中。

Table 3. The fitting parameters of the soil adsorption isotherm equation
表 3. 土样吸附等温线方程拟合参数

| 土样 | | Langmuir 方程: $C/S = C/S_m + 1/(k_1 S_m)$ | | |
|------|---------|--|--------|--------|
| | | S_m | k_1 | R^2 |
| 黔南丹寨 | 添加 NaCl | 769.2 | 0.0324 | 0.9853 |
| | 无 NaCl | 2500 | 0.308 | 0.9286 |

S_m 值越大, 表示土样对 Hg^{2+} 的吸附能力越强, 表中数据显示在溶液中添加 NaCl 后土样对 Hg^{2+} 的最大吸附量有所降低, 即吸附能力降低。由表中数据可知, 作为土壤对重金属吸附作用强弱的指标参数 k_1 的值只有 0.3 左右, 添加 NaCl 后只有 0.03, 说明在吸附液中添加 NaCl 使土样吸附能力明显下降。

NaCl 对 Hg 的吸附影响较大。相关文献表明高浓度的 Cl^- 环境是极其不利于 Hg^{2+} 在土壤中的吸附, 土壤环境溶液中 Cl^- 浓度达到 $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 数量级时, 土壤对外源汞的吸附能力大大降低, 随着 Cl^- 浓度继续升高到 $10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 甚至会出现“负吸附”的现象, 反而释放出土壤中原有固定的汞, 造成额外的污染。所以, 盐碱化会令已受污染的土地可能会造成汞的二次污染。

Hg^{2+} 与 Cl^- 的络合能力较大, 当土壤溶液中有较多的 Cl^- 存在时, 可形成 $HgCl_2^0$ 和 $HgCl_3^-$ 等络合离子, 从而使带负电荷的粘土矿物胶体对汞的吸附作用显著降低。 OH^- 、 Cl^- 与汞的络合作用大大提高了汞化物的溶解度。例如, 盐渍土会生成溶解度很低的 Hg_2Cl_2 、 $HgCl_2$ 和不溶性的 HgS , 可是由于含有大量的 Cl^- 而生成的 $HgCl_4^{2-}$ 即可大大提高汞的迁移能力[35]。

4.3. 淋溶试验

对黔南土样进行两个土柱迁移实验, 注入 Hg^{2+} 浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液, 根据当地年降水量设置总林滤液体积。由 Hg^{2+} 相对浓度随时间的变化过程绘制成 Hg^{2+} 穿透曲线图 4。

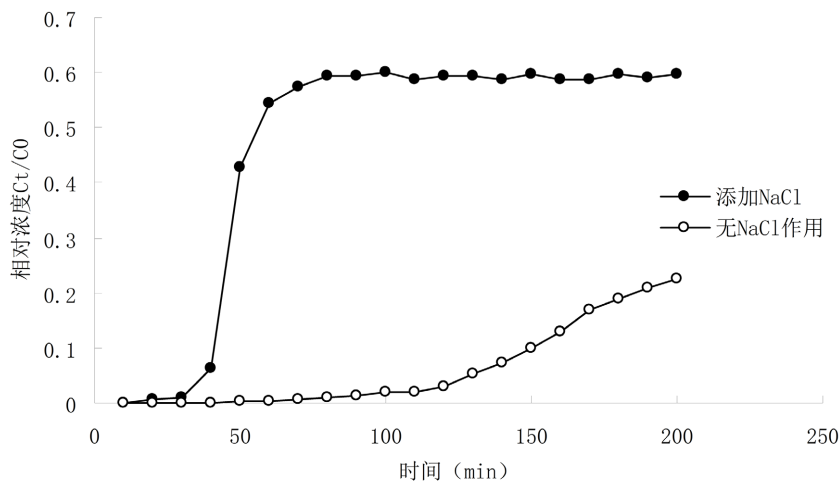


Figure 4. Hg^{2+} breakthrough curve
图 4. Hg^{2+} 穿透曲线

从图 4 中可以看出, 未添加 NaCl 时, 注入 50 小时后, 在土柱流出液中检测到 Hg^{2+} 出现, 100 小时后, 穿透曲线开始向上翘起, 流出液浓度逐渐增大, 但在实验设置时间范围汞离子未穿透土柱; 添加 NaCl 后, 注入 20 小时, 在土柱流出液中检测出 Hg^{2+} 出现, 40 h 后, 曲线开始上翘, 流出液浓度迅速增大, 注

入 100 小时后, 穿透曲线平缓, 其流出液浓度已达到流入浓度的 95%。土样在添加 NaCl 前后所呈现的穿透曲线趋势基本相同。

图 4 中 Hg^{2+} 在有无 NaCl 作用下两种情况对比可以看出, 在没有 NaCl 作用下 Hg^{2+} 穿透时间比 NaCl 作用时的穿透时间要延后, 产生明显的迟滞现象, 这反映出 Hg^{2+} 在供试土壤中发生了化学作用, 这些化学作用可能包括吸附解吸、离子交换、沉淀溶解、氧化还原等。由于 Hg^{2+} 在供试土壤中吸附相、沉降相、还原相难以区分, 因此将 Hg^{2+} 在供试土壤中这三相的变化都认为是由于吸附作用造成的。

迁移实验结束后, 各实验土柱不同深度的土样中重金属离子含量见表 4, 从表中可以看出重金属在表层土样中大量累积。随深度增加, 重金属含量逐渐减小, 各层土样中重金属含量没有达到稳定值, 说明土样还没有达到最大吸附容量。

Table 4. Heavy metals contents on each level after the experiment ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

表 4. 实验结束后各层土样重金属离子含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

| 取样深度 cm | | 0 | 2.5 | 5 | 10 | 20 | 30 |
|---------|----|------|------|------|-----|-----|-----|
| 无 NaCl | 黔南 | 4325 | 2795 | 1206 | 643 | 200 | 101 |
| 添加 NaCl | 黔南 | 4500 | 2895 | 1403 | 789 | 450 | 151 |

5. 结论

土壤释放汞主要来源于土壤中活性汞的还原作用的气态元素汞。氯离子与汞离子具有较强的亲和力, 氯离子浓度较高抑制汞向大气的挥发。由融雪剂化雪带来外源高浓度 Cl^- 离子土壤对汞的吸附能力降低。环境湿度大、土壤水分升高, 外源 Cl^- 离子介入等几个因素共同作用下, 汞释放通量降低, 在土壤中迁移能力增强, 导致污染深层土壤或邻近地下水及河流。

参考文献

- [1] 冯守中, 冒卫星, 刘立湘, 等. 融雪剂对环境的影响和评价[J]. 辽宁化工, 2018, 47(9): 947-950.
- [2] 吴玉辉. 浅谈公路融雪技术[J]. 北方交通, 2010(3): 9-11.
- [3] 张丽岩, 许洪涛, 张怀强. 吉林省固态融雪剂撒布成本定额分析[J]. 吉林交通科技, 2010(1): 25.
- [4] 程刚, 韩萍, 杜素军. 融雪剂概况及存在问题[J]. 山西交通科技, 2004(5): 45-46.
- [5] 骆虹, 罗立斌, 张晶. 融雪剂对环境的影响及对策[J]. 中国环境监测, 2004, 20(1): 55-57.
- [6] 李华芳. 环保型融雪剂的研究新进展[J]. 中国科技信息, 2008(14): 27-28.
- [7] 王小光. 高效环保型融雪剂的研制[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [8] 洪乃丰. 再议“盐害”与融雪剂[J]. 城市与减灾, 2003(1): 29-32.
- [9] 韩志斌. 中国道路融冰除雪技术发展现状及未来趋势[J]. 公路与汽运, 2013(6): 142-143.
- [10] 王萌, 李晓林, 牡丹超. 一种有机无机复合环保融雪剂的制备及性能研究[J]. 现代化工, 2014, 34(12): 66-67.
- [11] 郭城. 复合吸附层对天安门融雪剂次生盐害土壤的修复研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [12] 王艳春, 白雪薇, 李芳. 氯盐融雪剂对城市道路绿化带土壤性状的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 59-63.
- [13] 蔺晓娟. 融雪剂可能造成的环境污染及对策[J]. 资源节约与环保, 2015(1): 174.
- [14] 赵莹莹. 化学融雪剂的环境影响探讨研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- [15] 李明峰. 三种融雪剂对高速公路边坡土壤基本特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [16] 张营. 城市土壤-植物系统中融雪剂的污染行为及其生态学效应[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [17] 孙婷婷. 化学融雪剂对高速公路路旁土壤中水溶性盐离子含量及氮素转化的影响[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽

- 宁大学, 2013.
- [18] 邹笛, 赵天宇, 温亚梅, 等. 氯化钠和醋酸钙镁两种融雪剂对土壤中典型重金属结合态的影响[J]. 吉林大学学报(理学版), 2019, 57(2): 445-453.
- [19] 赵菲. 醋酸钙镁融雪剂对土壤中重金属形态和地表水中溶解氧含量的影响[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [20] Norrström, A.C. (2005) Metal Mobility by De-Icing Salt from an Infiltration Trench for Highway Runoff. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, **20**, 1907-1919. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.06.002>
- [21] 李根, 黄占斌, 杨凤至, 等. 融雪剂施用对道路环境的影响研究[J]. 绿色科技, 2020(14): 169-172, 175.
- [22] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(4): 1-6.
- [23] 于瑞莲, 胡恭任. 土壤中重金属污染源解析研究进展[J]. 有色金属, 2008, 60(4): 158-165.
- [24] 许超, 夏北成, 秦建桥, 等. 广东大宝山矿下游地区稻田土壤的重金属污染状况的分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007(s2): 549-553.
- [25] 陈岩, 季宏兵, 朱先芳, 等. 北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2142-2151.
- [26] 刘鹏, 吴攀, 陶秀珍. 贵州丹寨汞矿土壤汞含量的变化趋势[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(B12): 9-10.
- [27] 林齐维, 李庆新, 瞿丽雅, 等. 丹寨汞矿冶炼厂土壤汞污染的初步研究[J]. 贵州环保科技, 1998, 4(2): 23-31.
- [28] 刘荣相, 张朝辉. 贵州东南部喀斯特汞矿带苔藓植物及其重金属富集特征[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 41-47.
- [29] 郑顺安, 周玮, 薛颖昊, 等. 模拟降雨条件下典型土壤汞淋溶风险研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3489-3496.
- [30] 郑顺安, 刁斌, 吴泽赢, 等. 污灌区盐分累积对污染土壤汞释放通量的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1047-1053.
- [31] 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2721-2727.
- [32] 杨华锋. 北京地区污水灌溉农田若干特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [33] 齐志明. 清、污水灌溉对重金属分布及作物生长影响的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [34] Basta, N.T. and Tabatabai, M.A. (1992) Effect of Cropping Systems on Adsorption of Metals by Soils: I. Single-Metal Adsorption. *Soil Science*, **153**, 108-114. <https://doi.org/10.1097/00010694-199202000-00004>
- [35] 陶春军. 合肥市郊水稻土中重金属的吸附淋溶特性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.