

doi: 10.12029/gc20220212002

郭晓东, 刘强, 张慧荣, 石旭飞, 秦传玉, 张志强. 2024. 土壤重金属对地下水的危害评价方法研究——以吉林省珲春盆地为例[J]. 中国地质, 51(4): 1243–1251.

Guo Xiaodong, Liu Qiang, Zhang Huirong, Shi Xufei, Qin Chuanyu, Zhang Zhiqiang. 2024. Evaluation method of soil heavy metal harm to groundwater: Taking Huichun basin, Jilin Province as an example[J]. Geology in China, 51(4): 1243–1251(in Chinese with English abstract).

土壤重金属对地下水的危害评价方法研究—— 以吉林省珲春盆地为例

郭晓东^{1,2}, 刘强^{1,2}, 张慧荣^{1,2}, 石旭飞^{1,2}, 秦传玉³, 张志强⁴

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130026; 4. 吉林省水文地质调查所, 吉林 长春 130012)

摘要:【研究目的】土壤中不断富集的重金属对地下水产生潜在危害, 但以往研究缺少定量评价土壤重金属对地下水危害度的方法。【研究方法】本文以地下水循环和固液平衡理论相结合, 构建了简便易用的土壤重金属进入地下水的通量模型, 在评价地下水环境容量的基础上, 创新提出了土壤重金属对地下水危害评价方法。【研究结果】以珲春盆地为例进行了应用, 结果表明: 研究区土壤重金属进入地下水通量从大到小依次为 Zn、Cu、As、Pb、Cd、Ni、Hg, 大部分地区地下水重金属(As、Hg、Cu、Pb、Zn、Ni、Cd)在 10 年内达不到环境容量限值, 大部分乡镇土壤重金属对地下水的危害等级在中度及以下级别。【结论】通过该评价方法能够简单快捷的定量计算土壤重金属进入地下水的通量, 判定地下水重金属剩余容量, 评价土壤重金属对地下水的危害状况, 为相关部门开展土壤及地下水的环境保护提供支撑, 为相关学者开展类似研究提供借鉴。

关键词: 土壤重金属; 环境容量; 地下水; 危害度; 迁移通量; 环境地质调查工程; 珲春盆地; 吉林省

创新点: (1) 创新提出了土壤重金属进入地下水的简便易行的量化通量评价模型, 为土壤重金属对地下水的危害评价提供基础; (2) 结合地下水环境容量评价, 构建提出土壤重金属对地下水的危害性评价方法, 并进行了实地应用, 为区域土壤重金属危害性评价提供有效借鉴。

中图分类号: X523; X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)04-1243-09

Evaluation method of soil heavy metal harm to groundwater: Taking Huichun basin, Jilin Province as an example

GUO Xiaodong^{1,2}, LIU Qiang^{1,2}, ZHANG Huirong^{1,2}, SHI Xufei^{1,2}, QIN Chuanyu³,
ZHANG Zhiqiang⁴

(1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, Shenyang 110034, Liaoning, China; 3. New Energy and Environment College, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 4. Jilin Hydrogeological Survey Institute, Changchun 130012, Jilin, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

收稿日期: 2022-02-12; 改回日期: 2022-06-11

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221753, 12120115032801)资助。

作者简介: 郭晓东, 男, 1981 年生, 硕士, 正高级工程师, 从事水土环境调查评价研究; E-mail: 287684839@qq.com。

[Objective] The continuous accumulation of heavy metals in soil has potential harm to groundwater, but there is no quantitative method to evaluate the harm of heavy metals in soil to groundwater in previous studies. **[Methods]** Based on the theory of groundwater circulation and solid-liquid equilibrium, a simple and easy-to-use flux model of soil heavy metals into groundwater is constructed in this paper. On the basis of evaluating groundwater environmental capacity, an innovative method for evaluating the harm of soil heavy metals to groundwater is proposed. **[Results]** The application was carried out in Hunchun Basin as an example, and the results showed that the fluxes of soil heavy metals into groundwater in the study area were Zn, Cu, As, Pb, Cd, Ni, and Hg in descending order, and that the heavy metals of the groundwater in most of the areas could not reach the limit of the environmental capacity within 10 years, and the damage level in most towns and villages to groundwater was moderate or below. **[Conclusions]** Through this evaluation method, the flux of heavy metals in soil into groundwater can be calculated simply and quickly, the residual capacity of heavy metals in groundwater can be determined, and the harm of heavy metals in soil to groundwater can be evaluated, which provides support for relevant departments to carry out environmental protection of soil and groundwater, and provides reference for relevant scholars to carry out similar research.

Key words: soil heavy metals; environmental capacity; groundwater; hazard degree; migration flux; environmental geological survey engineering; Hunchun basin; Jilin Province

Highlights: (1) A simple and easy quantitative flux evaluation model of soil heavy metals into groundwater is proposed, which provides the basis for the hazard evaluation of soil heavy metals to groundwater; (2) Combined with the assessment of groundwater environmental capacity, the hazard assessment method of soil heavy metals on groundwater was constructed and applied in the field, which provided an effective reference for the hazard assessment of regional soil heavy metals.

About the first author: GUO Xiaodong, male, born in 1981, professor level senior engineer, engaged in the research on investigation and evaluation of water and soil environment; E-mail: 287684839@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221753, No.12120115032801).

1 引 言

重金属在土壤中的富集过程缓慢、持续且不可逆,造成土壤污染的同时必然会对周围环境产生危害(Liao et al., 2017; 邬光海等, 2020; Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2020; Xiao et al., 2021)。土壤中的重金属随着降水、灌溉等自然和人为活动,通过淋滤作用进入地下水系统,进而危害地下水环境质量(谢飞等, 2016; 丛鑫等, 2017; 高健翁等, 2021; 李秋燕等, 2021; 尹德超等, 2022)。土壤重金属对地下水的危害评价研究成为了一项重要研究方向(鲍丽然等, 2020; 林苾等, 2021)。

目前土壤重金属对地下水的危害评价研究较少,主要以土壤重金属进入地下水的通量评价研究为主。不少学者模拟降水或酸雨等条件,开展重金属的迁移特征研究(Chen et al., 2010; 陈子方等, 2014; Vink et al., 2017; 吕达等, 2019; 胡译水等, 2020)。另有一部分学者采用包气带污染物迁移转化模型,模拟评价重金属在包气带中的迁移转化通量(林挺等, 2019; 冯祯, 2020; 万朔阳等, 2020)。除

了上述研究方向外,另有一些学者参照美国、瑞典以及中国污染场地污染物风险筛选值推导方法,开展了基于保护地下水的重金属污染物风险筛选值评价方法,提出了重金属迁移至地下水的通量模型,并推导了土壤中重金属的风险筛选值(许增光, 2012; 蒋世杰等, 2016)。这些方法对土壤重金属对地下水的危害研究奠定了基础,但土壤重金属对地下水的危害缺少定量化评价方法。

本文基于水循环和固液平衡理论,深入研究珲春盆地土壤表层重金属进入地下水的途径,构建了基于面源污染特征的土壤重金属进入地下水通量模型,以地下水重金属环境容量作为地下水对重金属的承载能力指标,提出了土壤表层重金属对地下水的危害度评价方法,对珲春盆地土壤重金属对地下水的危害状况进行了定量评价。

2 研究区概况

珲春市是中国图们江国际合作示范区,毗邻朝鲜和俄罗斯,矿业发达,近年来经济快速发展,土壤环境成为制约经济社会发展的重要因素。珲春盆地

位于吉林省东部珲春市中南部,是珲春市主要人口经济分布区。研究区为近海洋大陆季风气候,年平均降水 618 mm(石旭飞和赵海清,2017)。区内河流主要有珲春河,从东北向西南贯穿珲春盆地,另有图们江沿研究区西部边界流出界外。研究区内商贸发达,交通运输频繁,煤炭的大量开采与使用,农田施用的化肥农药等都造成了当地土壤重金属的富集。

3 研究方法

3.1 样品采集与检测

土壤样品采集时间为 2015 年 6—10 月,采样密度为 1 个点/km²,采集从地表至 20 cm 深处土壤样品,共采集样品 319 件,主要布置在水田、旱田以及其他草地荒地林地等不同土地利用类型(图 1)。土壤样品送到吉林地质矿产研究院进行测试,采用 HNO₃-HClO₄-HF 进行消解,比例为 5:2:3。Ni、Cd 和 Pb 采用等离子体质谱法(ICP-MS),As 和 Hg 采用原子荧光光谱法(AFS),Cu 和 Zn 采用荧光光谱法(XRF-X),质量控制按照中国地质调查局《多用途区域地球化学测量标准(1:25 万)》(DZ/T 0258-2014)执行。As、Hg、Cu、Pb、Zn、Ni、Cd 的检出限分别为 1 mg/kg、0.5 mg/kg、1 mg/kg、0.105 mg/kg、4 mg/kg、0.22 mg/kg、0.007 mg/kg。

地下水样品采集时间为 2015 年 5—9 月,共采集 98 组地下水样品(图 1)。采集之前先洗井,取 1000 mL 水样,用于测试常规阴阳离子,过滤后装入聚乙烯瓶,低温保存。取 500 mL 阳离子水样,过滤后装入聚乙烯瓶低温保存并加浓硝酸使得 pH 值小于 2。全部样品送自然资源部东北矿产资源监督检测中心测试。测试结果进行阴阳离子平衡分析,误差小于 5% 的可以用作研究。

3.2 土壤重金属对地下水的危害评价方法

3.2.1 土壤重金属进入地下水的通量

污染物在土壤颗粒孔隙中存在固、液、气三相中的平衡分配,平衡模型为公式(1)。

$$C_s = C_L \times \left(K_d + \frac{\theta_w + \theta_a \times H'}{\rho_b} \right) \quad (1)$$

式中: C_s 为土壤污染物浓度, mg/kg; C_L 为土壤污染物浸出液浓度, mg/L; K_d 为土壤固相-水分配系数, L/kg; θ_w 为土壤充水孔隙度; θ_a 为土壤充气孔隙

度; H' 为亨利常数; ρ_b 为土壤容重, kg/L。

针对重金属则可以不考虑亨利常数和充气孔隙度,则公式可以简化为公式(2):

$$C_s = C_L \times \left(K_d + \frac{\theta_w}{\rho_b} \right) \quad (2)$$

其中, θ_w 可以用公式(3)计算:

$$\theta_w = \frac{\rho_b \times P_{ws}}{\rho_w} \quad (3)$$

其中 ρ_w 为水的密度, 1 kg/L, P_{ws} 为土壤含水率, kg(水)/kg(土壤)。则土壤浸出液的浓度可以用公式(4)计算:

$$C_L = C_s \div \left(K_d + \frac{P_{ws}}{\rho_w} \right) \quad (4)$$

土壤固相-水污染物分配系数 K_d , 是在土壤化学平衡条件下, 土壤固相与液相中重金属的含量比, 其值大小受 pH 值、氧化还原环境、有机质类型和含量等因素的影响较大, 对此国内外学者进行了大量深入研究, 提出了土壤中不同元素的 K_d 计算方法(表 1), 本文借鉴前人的研究成果。

基于重金属固液平衡原理, 构建了土壤重金属进入地下水的降水入渗途径和灌溉入渗途径模型, 土壤表层重金属输入地下水的通量 Q_g 可用公式(5)计算。

$$Q_g = (P_r + Q_i) \times C_L = (10^{-1} \times \alpha \times F + \beta \times Q_{iw}) \times C_s \div \left(K_d + \frac{P_{ws}}{\rho_w} \right) \quad (5)$$

式中: Q_g 为土壤重金属进入地下水的量, g/a; P_r 为年降水入渗补给量, 万 m³/a; α 为降水入渗补给系数, 无量纲; F 为面积, km²; Q_i 为年田间灌溉入渗补给量, 万 m³/a; β 为田间灌溉入渗补给系数, 无量纲; Q_{iw} 为年灌溉水量, 万 m³。其他量见公式(1)和公式(3)。

3.2.2 地下水环境容量

地下水中重金属环境容量反映地下水在一定的重金属含量限值下可以容纳更多重金属的量, 反映地下水的纳污能力。以地下水环境可以继续容纳重金属的量来衡量土壤重金属对地下水的危害。地下水重金属容量通过地下水年均储量与地下水重金属年均剩余含量的乘积获得。

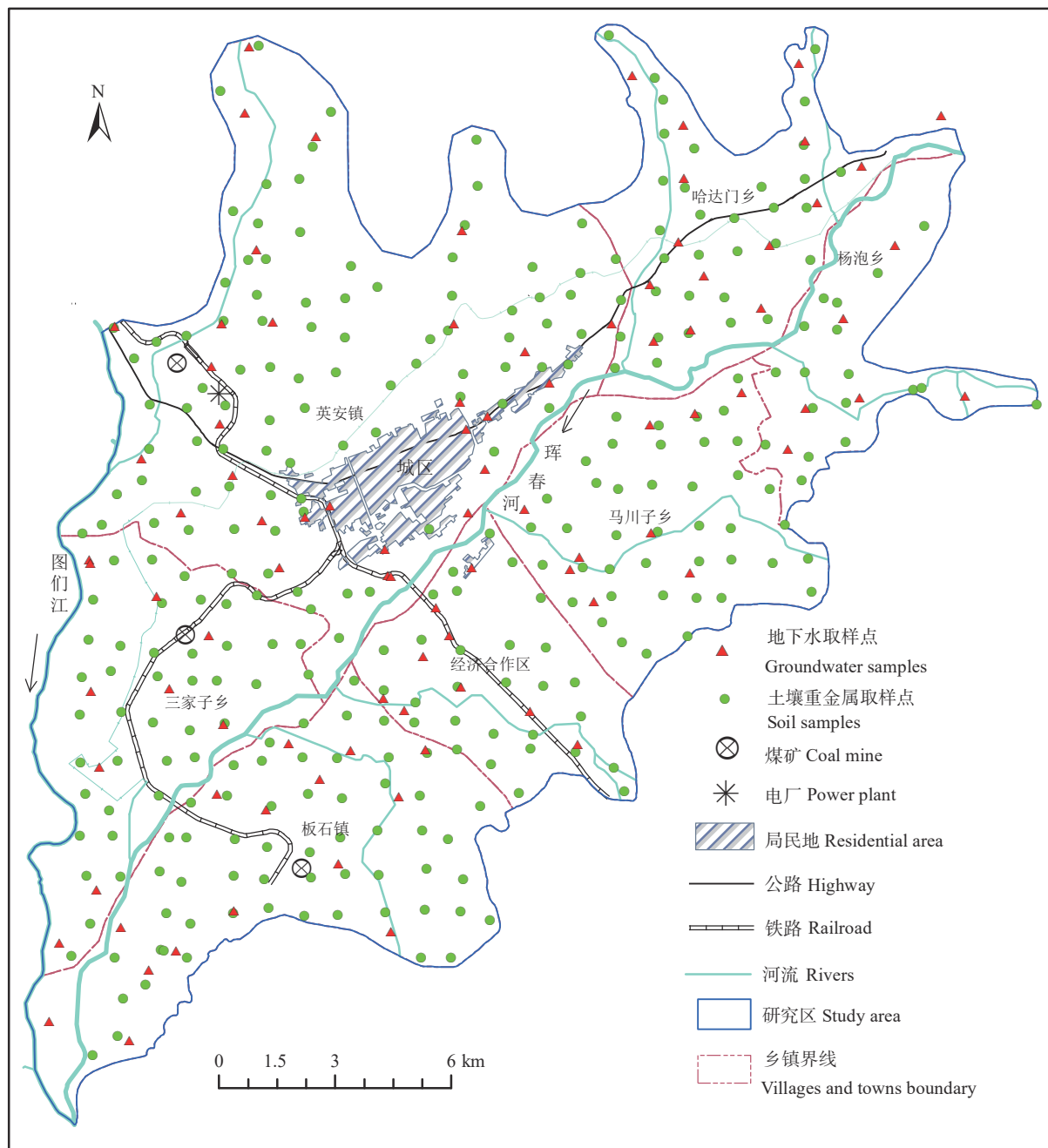


图1 瑋春盆地水土样品取样点分布图

Fig.1 Distribution map of soil samples and water samples in Hunchun Basin

地下水的的环境容量依据《地下水质量标准》(GB 14848-2017)中重金属Ⅲ级质量标准限值,作为地下水可饮用的污染物容量限值。地下水环境容量可用公式(6)计算。

$$Q_d = (C' - C_g) \times \mu \times H_w \times F \quad (6)$$

式中: Q_d 为地下水中重金属环境容量, g; C_g 为

地下水中重金属的含量, mg/L; C' 为地下水重金属的污染限值, mg/L, 参照《地下水质量标准》中Ⅲ级质量标准; μ 为含水层给水度, 无量纲; H_w 为地下含水层的厚度, m; F 为面积, m^2 。

3.2.3 土壤重金属对地下水的危害度

区域土壤重金属进入地下水的通量反映每年地下水系统接纳重金属污染物的量, 地下水系统接

表 1 各元素固相-水分配系数预测模型一览

Table 1 List of prediction models in the solid-water partition coefficients of each element

元素	K_d 预测模型	文献来源
As	$LgK_d=0.41lg(\text{total})+0.72lg(\text{AlFeox})-0.40$	Groenenberg et al., 2012
Hg	旱田: $lgK_d=0.021lg(\text{Slit})+2.70$ 水田: $lgK_d=1.13lg(\text{S})+3.17$	王晓晨等, 2018
Cu	$LgK_d=0.21pH+0.51lg(\text{SOM})+1.75$	Sauve et al., 2000
Pb	$LgK_d=0.37pH+0.44lg(\text{total})+1.19$	Sauve et al., 2000
Zn	$LgK_d=0.60pH+0.21lg(\text{total})-1.34$	Sauve et al., 2000
Ni	$LgK_d=1.02pH+0.80lg(\text{SOM})-4.16$	Sauve et al., 2000
Cd	$LgK_d=0.48pH+0.82lg(\text{SOM})-0.65$	Sauve et al., 2000

注: SOM为有机碳含量, %; total为元素总含量, mg/kg; AlFeox为铁铝氧化物, % (铁铝氧化物/土壤); Slit为土壤黏粒含量, %; S为土壤总硫含量, g/kg。

纳重金属的量与地下水中重金属的环境容量的比值可反映土壤重金属对地下水的危害度(D_g), 计算公式见式(7):

$$D_g = Q_g / Q_d \quad (7)$$

由于重金属对地下水的污染属于缓变型危害, 可以从不同的时间段危害度来评价危害程度, 分别以未来 25 年、10 年、5 年和 1 年达到环境容量以及环境容量 50 倍来评判危害程度的高低, D_g 具体评价标准见表 2。

4 结果与讨论

4.1 珲春盆地土壤重金属进入地下水通量

珲春盆地土壤重金属随着降水和农田灌溉等途径向地下水迁移(Moon et al., 2000; 郭晓东等, 2018), 按照公式(5)计算。降水量数据来源于当地气象部门, 共搜集 8 个站点的多年平均降水量, 采用泰森多边形进行区域降水量分配。降水入渗系数和给水度根据当地水文地质条件和抽水试验获取。农田灌溉量根据农田灌溉面积和灌溉定额计算。土壤固相-水污染物分配系数 K_d 采用表 1 中的公式计算得到。

表 2 土壤重金属对地下水危害程度评价标准

Table 2 Harm degree of soil heavy metals in the groundwater

土壤重金属对地下水危害度 (D_g)	危害程度
>50或<0	极严重
1~50	严重
0.2~1	中度
0.1~0.2	轻度
0.04~0.1	警戒
0~0.04	无

由于水田区在灌溉期以灌溉水下渗为主, 而没有大气降水入渗, 故在计算时, 需要扣除水田区 5—8 月降水入渗量。土壤含水率 P_{ws} 按照《污染场地风险评估技术导则》推荐值, 设为 0.1。

经过计算, 研究区土壤重金属进入地下水的量分布情况见表 3。区内地下水通量的重金属从大到小依次为 Zn、Cu、As、Pb、Cd、Ni、Hg。

4.2 珲春盆地地下水重金属环境容量

研究区地下水以第四系孔隙潜水为主, 含水厚度沿东北向西南从珲春河上游向下游逐渐增厚, 上游地区 4~7 m, 下游地区 10~12 m。研究区南北边缘地区接近山丘区, 含水层变薄, 颗粒较细, 缺少稳定的含水层, 给水度较小, 在 0.01~0.07; 中部河谷区为冲洪积砂砾石含水层, 颗粒粗, 给水度较大, 在 0.10~0.24。

地下水中各重金属含量见表 4。

表 3 研究区各乡镇土壤重金属进入地下水通量 (kg/a)

Table 3 Fluxes (kg/a) of soil heavy metals into groundwater in villages and towns in the study area

乡镇	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Ni	Cd
板石镇	114.96	1.07	136.27	18.84	1375.88	2.35	5.17
三家子乡	98.02	0.78	133.36	18.07	1440.23	2.29	6.34
经济合作区	59.29	0.61	73.56	11.16	736.82	1.32	2.15
马川子乡	103.66	1.16	114.23	19.20	1405.70	2.31	3.15
杨泡乡	58.28	0.36	76.79	10.22	695.80	1.35	2.84
英安镇	179.96	1.52	240.91	32.13	2178.65	3.94	7.37
哈达门乡	68.78	0.41	102.35	14.27	1011.68	1.83	4.08
总计	682.94	5.91	877.49	123.89	8844.75	15.40	31.09

表 4 研究区地下水重金属含量 (mg/L)

Table 4 Content (mg/L) of heavy metals in groundwater in study area

含量	Cu	Pb	Zn	As	Hg	Cd	Ni
最小值	0.00060	0.00040	0.0036	0.0014	0.0000000	0.000000	0.0006
最大值	0.00910	0.01880	0.4658	0.0094	0.0000357	0.000771	0.0458
平均值	0.00483	0.00244	0.0239	0.0026	0.0000230	0.000084	0.0109
国标III级*	1.00	0.01	1.00	0.01	0.001	0.005	0.02

注: *《地下水质量标准》(GB 14848-2017) 中III级质量标准。

根据含水层厚度、给水度和地下水中重金属含量,按照公式(6)计算研究区地下水中各重金属环境容量。对各乡镇地下水重金属环境容量和进行了统计,结果见表5。地下水重金属环境容量分区趋势与地下水储量相一致,上游小,下游大,南北两侧小,中部大。不同重金属环境容量不一致,Cu、Zn

环境容量较大,其次为 Ni、As、Pb 和 Cd, Hg 最小。

4.3 珲春盆地土壤重金属对地下水的危害度

按照公式(7)以 ArcGIS 栅格计算方式计算了研究区土壤重金属对地下水的危害度,各重金属的危害度平均值分区图(图2)显示:研究区无危害或者警戒级别占据较大面积,重金属从地表进入地下

表 5 研究区各乡镇地下水重金属环境容量 (kg)

Table 5 Environmental capacity (kg) of heavy metals in groundwater of the study area

行政区	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Ni	Cd
板石镇	692.77	92.58	94223.22	545.13	92380.17	706.93	466.76
三家子乡	782.23	100.41	102353.49	702.37	100951.68	1460.23	503.68
经济合作区	126.96	16.74	17014.08	131.77	15952.48	38.10	84.17
马川子乡	230.02	29.93	30468.46	238.12	29753.14	316.12	150.41
杨泡乡	173.52	21.76	22230.00	190.63	22081.60	267.84	109.89
英安镇	745.06	101.97	103863.29	809.86	102593.92	1082.58	513.06
哈达门乡	282.79	36.57	37362.07	342.22	37177.10	334.56	184.90

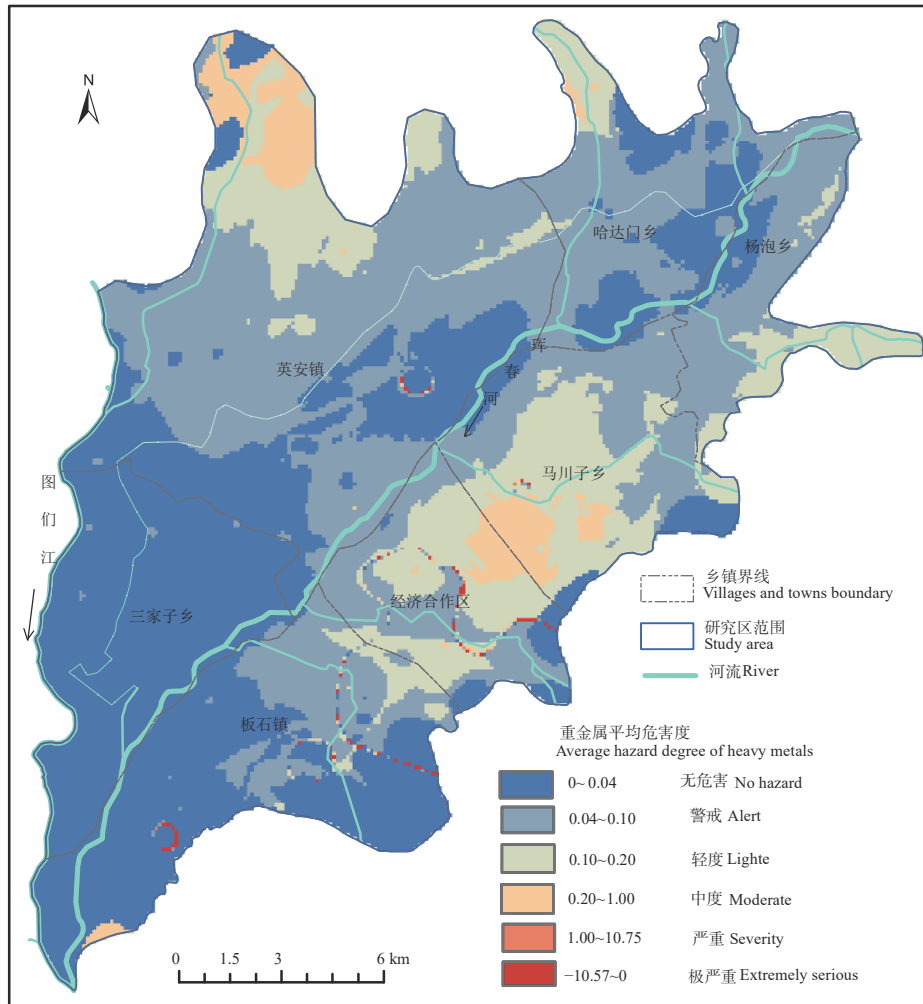


图 2 研究区土壤重金属对地下水危害度分区图
Fig.2 Map of hazard degree of soil heavy metals in the groundwater of the study area

水系统, 39% 的区域在 25 年内不会达到环境容量限值, 41% 的区域 10 年内不会达到环境容量限值, 16% 的区域 5—10 年内达到限值, 另有 4% 的区域在 5 年内会达到限值。

4.4 讨论

研究区土壤重金属对地下水的危害程度见表 6, 可以看出经济合作区 Ni 的危害等级较大, 其 Ni 进入地下水的通量为 $1.32 \text{ kg}/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$, 与其他地区相比无突变, 但是该区地下水环境容量却很小, 部分地区为负, 导致危害度为负, 说明该地区地下水环境已经受到严重危害, 不能接受外界污染负荷, 危害等级为极严重是合适的。其他各乡镇中除三家子乡外, 都为中度危害, 主要是由于 As 的危害度较高, As 进入地下水的通量在 $58.28\sim 179.96 \text{ kg}/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$, 而 As 的地下水环境容量在 $1.27\sim 241.73 \text{ kg}/\text{km}^2$, 得出的危害度大部分都在中度以上, 说明当地地下水环境容量较小, 不足以支撑或者容纳目前的重金属输入负荷。

5 结 论

本文以土壤中金属固液平衡理论和地下水循环理论为基础, 构建了土壤重金属进入地下水的通量评价模型, 并提出了地下水重金属环境容量评价方法, 构建了土壤重金属对地下水环境危害评价方法, 在珲春盆地进行了应用, 得出结论如下:

(1) 以大气降水和灌溉入渗为土壤重金属进入地下水的途径, 结合重金属在土壤中的固液平衡模型, 构建了土壤重金属进入地下水的通量评价方法, 并在珲春盆地进行了应用, 结果表明: 研究区土壤重金属进入地下水通量从大到小依次为 Zn、Cu、As、Pb、Cd、Ni、Hg。

表 6 研究区土壤重金属对地下水的危害程度一览

Table 6 List of the harm degree of soil heavy metals in the groundwater of the study area

行政区	危害等级							总体
	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
板石镇	中度	无	无	无	无	警戒	无	中度
三家子乡	轻度	无	无	无	无	无	无	轻度
经济合作区	中度	无	无	警戒	极严重	警戒	警戒	极严重
马川子乡	中度	无	无	警戒	无	警戒	警戒	中度
杨泡乡	中度	无	无	无	无	警戒	无	中度
英安镇	中度	无	无	无	无	警戒	无	中度
哈达门乡	中度	无	无	无	无	警戒	无	中度

(2) 提出了地下水重金属环境容量评价方法, 并在珲春盆地进行了计算, 结果表明: 珲春盆地地下水重金属 Cu、Zn 环境容量较大, 其次为 Ni、As、Pb 和 Cd、Hg 最小。其中 Pb 和 Ni 部分地区环境容量为负值。

(3) 在土壤重金属进入地下水通量和地下水环境容量评价方法的基础上, 提出了土壤重金属对地下水的危害度评价方法, 应用结果表明: 珲春盆地大部分地区重金属在 10 年内达不到环境容量限值, 行政区中除经济合作区处于极严重级别外, 其他在中度及以下。通过该方法能够量化地给出土壤重金属对地下水的危害状况, 为土壤及地下水的环境保护提供支撑。

References

- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Q, Zeng G M, Du C Y, Huang D L, Tang L, Wang L, Shen G L. 2010. Transfer of heavy metals from compost to red soil and groundwater under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1): 211–216.
- Chen Zifang, Zhao Yongsheng, Sun Gujiang, Bai Jing, Liu Lu, Zhou Rui. 2014. Study on the migration and release of lead and chromium and in the vadose zone[J]. *China Environmental Science*, 34(9): 2211–2216 (in Chinese with English abstract).
- Cong Xin, Lei Xutao, Fu Ling, Shang Saiyao, Ding Jing, Bi Ran. 2017. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of Haizhou coal mine, China[J]. *Earth and Environment*, 45(3): 329–335 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhen. 2020. Application of Hydrus-1D in environmental impact assessment of dump in metal mines[J]. *World Nonferrous Metals*, (13): 161–162 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jianweng, Gong Jingjing, Yang Jianzhou, Tang Shixin, Ma Shengming. 2021. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal pollution in the soil of Limu Mountain–Wanling Town, Qiongzong, Hainan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(5): 807–816 (in Chinese with English abstract).
- Groenenberg J E, Dijkstra J J, Bonten L T C, Vries W D, Comans R N J. 2012. Evaluation of the performance and limitations of empirical partition–relations and process based multisurface models to predict

- trace element solubility in soils[J]. *Environmental Pollution*, 166: 98–107.
- Guo Xiaodong, Sun Qifa, Zhao Yongsheng, Cai He. 2018. Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 37(9): 1875–1883 (in Chinese with English abstract)
- Hu Yishui, Qi Shi, Li Yutong, Zhou Jinxing, Wu Bingchen. 2020. Effects of sludge composting products on soil and groundwater[J]. *China Environmental Science*, 40(5): 2157–2166 (in Chinese with English abstract)
- Jiang Shijie, Zhai Yuanzheng, Wang Jinsheng, Leng Suyu, Teng Yanguo. 2016. Derivation of soil environmental criteria for groundwater protection: A comparative study between countries[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 43(4): 52–59 (in Chinese with English abstract)
- Li Qiuyan, Wei Minghui, Dai Huimin, He Pengfei, Liu Kai. 2021. Characteristics of soil heavy metal pollution and ecological risk assessment of Jinzhou city[J]. *Geology and Resources*, 30(4): 465–472 (in Chinese with English abstract).
- Liao J B, Ru X, Xie B B, Zhang W H, Wu H Z, Wu C F, Wei C H. 2017. Multi-phase distribution and comprehensive ecological risk assessment of heavy metal pollutants in a river affected by acid mine drainage[J]. *Ecotoxicol Environ Safety*, 141: 75–84.
- Lin Jin, Liang Wenjing, Jiao Yang, Yang Li, Fan Yaning, Tian Tao, Liu Xiaomeng. 2021. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 48(3): 749–763 (in Chinese with English abstract).
- Lin Ting, Luo Fei, Zhu Yan, Yang Kun, Xi Xiuping. 2019. Calculation of the soil risk control value through a hydrus-1D model for groundwater protection[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 40(12): 5640–5648 (in Chinese with English abstract).
- Lü Da, Wei Yong, Liu Guijian. 2019. Migration Characteristics of heavy metals in interaction system of soil-groundwater[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 57(6): 1544–1548 (in Chinese with English abstract).
- Moon J W, Moon H S, Woo N C, Hahn J S, Won J S, Song Y, Lin X, Zhao Y. 2000. Evaluation of heavy metal contamination and implication of multiple sources from Hunchun basin, northeastern China[J]. *Environmental Geology*, 39(9): 1039–1052.
- Sauve S, Hendershot W, Allen H E. 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 34(7): 1125–1125.
- Shi Xufei, Zhao Haiqing. 2017. The age and water cycle of shallow the age and water cycle of shallow groundwater in Hunchun basin[J]. *Advances in Geosciences*, 7(1): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- Vink J P M, Van Zomeren A, Dijkstra J J, Comans R N J. 2017. When soils become sediments: Large-scale storage of soils in sandpits and lakes and the impact of reduction kinetics on heavy metals and arsenic release to groundwater[J]. *Environmental Pollution*, 227: 146–156.
- Wan Shuoyang, Wu Yong, Tang Xuefang, Deng Dongping, Lan Zhen, Han Libi. 2020. Simulation and spatial analysis of heavy metal migration in Xiba Town soil based on Hydrus-1 D[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(2): 854–859 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaochen, Dai Yunan, Qiao Xianliang, Zhang Aijing, Yu Hui, Bai Lou. 2018. Study on adsorption and partitioning behaviors of mercury in agricultural soils[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 13(6): 115–123 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guanghai, Wang Chensheng, Chen Honghan. 2020. Eco-environmental assessment and genetic analysis of heavy metal pollution in the soil around the abandoned tungsten-molybdenum mine area in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 47(6): 1838–1852. (in Chinese with English abstract)
- Xiao H, Shahab A, Xi B D, Chang Q X, You S H, Li J Y, Sun X J, Huang H W, Li X K. 2021. Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China[J]. *Environmental Pollution*, 269: 116189.
- Xie Fei, Wu Junfeng, Ren Xiaoming. 2016. Sources and ecological risks of heavy metals in the soils of the typical industry-based development zones in Jiangsu[J]. *Journal of Safety and Environment*, 16(2): 387–391 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zengguang. 2012. Numerical Simulation Study on Migration and Remediation of Organic Matter and Heavy Metals in Groundwater [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1–156 (in Chinese with English abstract).
- Yin Dechao, Qi Xiaofan, Wang Yushan, Xu Rongzhen, An Yonghui, Wang Xuqing, Geng Hongjie. 2022. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake, Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 49(3): 979–992 (in Chinese with English abstract).
- Zhang M, Chen G, Luo Z T, Sun X, Xu J L. 2020. Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in seawater and sediments from Meishan Bay, Zhejiang coast, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 156: 111217.
- Zhao K L, Zhang L Y, Dong J Q, Wu J S, Ye Z Q, Zhao W M, Ding L Z, Fu W J. 2020. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China[J]. *Geoderma*, 360: 114011.

附中文参考文献

鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀

- 山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1625-1636.
- 陈子方, 赵勇胜, 孙家强, 白静, 刘璐, 周睿. 2014. 铅和铬污染包气带及再释放规律的实验研究[J]. *中国环境科学*, 34(9): 2211-2216.
- 丛鑫, 雷旭涛, 付玲, 商思瑶, 丁静, 毕然. 2017. 海州煤矿矸石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地球与环境*, 45(3): 329-335.
- 冯祯. 2020. Hydrus-1D 在金属矿山排土场环境影响评价中的应用研究[J]. *世界有色金属*, (13): 161-162.
- 高健翁, 龚晶晶, 杨剑洲, 唐世新, 马生明. 2021. 海南岛琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. *地质通报*, 40(5): 807-816.
- 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 蔡贺. 2018. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. *农业环境科学学报*, 37(9): 1875-1883.
- 胡译水, 齐实, 李昱彤, 周金星, 伍冰晨. 2020. 污泥堆肥施用对土壤及地下水影响研究[J]. *中国环境科学*, 40(5): 2157-2166.
- 蒋世杰, 翟远征, 王金生, 冷苏娅, 滕彦国. 2016. 国内外基于保护地下水的土壤环境基准的推导与比较[J]. *水文地质工程地质*, 43(4): 52-59.
- 李秋燕, 魏明辉, 戴慧敏, 贺鹏飞, 刘凯. 2021. 锦州市土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地质与资源*, 30(4): 465-472.
- 林苾, 梁文静, 焦畅, 杨莉, 范亚宁, 田涛, 刘晓萌. 2021. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 48(3): 749-763.
- 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平. 2019. Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用[J]. *环境科学*, 40(12): 5640-5648.
- 吕达, 魏勇, 刘桂建. 2019. 重金属在土壤-地下水交互系统中的迁移特征[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 57(6): 1544-1548.
- 石旭飞, 赵海清. 2017. 珲春盆地浅层地下水年龄及其水循环特征[J]. *地球科学前沿*, 7(1): 50-57.
- 万朔阳, 吴勇, 唐学芳, 邓东平, 兰真, 韩莉璧. 2020. 基于 Hydrus-1D 对西坝镇农田土壤重金属迁移模拟及空间解析[J]. *科学技术与工程*, 20(2): 854-859.
- 王晓晨, 代宇楠, 乔显亮, 张艾婧, 余慧, 白露. 2018. 农田土壤中汞的吸附分配行为研究[J]. *生态毒理学报*, 13(6): 115-123.
- 邬光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 2020. 内蒙古废弃钨钼矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. *中国地质*, 47(6): 1838-1852.
- 谢飞, 吴俊锋, 任晓鸣. 2016. 江苏省典型工业开发区土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *安全与环境学报*, 16(2): 387-391.
- 许增光. 2012. 地下水有机物和重金属迁移与污染修复的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1-156.
- 尹德超, 祁晓凡, 王雨山, 徐蓉楨, 安永会, 王旭清, 耿红杰. 2022. 雄安新区白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征及生态风险评价[J]. *中国地质*, 49(3): 979-992.