

# 金沙江攀枝花河段土壤重金属污染状况及生态风险评价

史鹏<sup>1,2</sup>,朱长军<sup>1,3</sup>,王世岩<sup>2</sup>,樊皓<sup>4</sup>,吴比<sup>4</sup>,刘畅<sup>2</sup>,李步东<sup>2</sup>

(1.河北工程大学 能源与环境工程学院,河北 邯郸 056038;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038;

3.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210009;

4.长江水资源保护科学研究所,武汉 430051)

**摘要:**为清晰了解金沙江攀枝花河段土壤重金属污染状况,以丰、平、枯不同水期下金沙江攀枝花河段岸边土壤为研究对象,采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法以及潜在生态风险指数法对金沙江攀枝花河段土壤重金属污染状况以及可能存在的生态风险进行评价,并提出了相关风险管控建议.研究表明,丰、平、枯不同水期下V,Cd,Cu,Ni等重金属质量含量均值超过四川省表层土壤背景值;丰水期与枯水期下重金属内梅罗综合污染指数均值分别为3.10,3.14,综合污染等级达到V级重度污染,平水期下重金属内梅罗综合污染指数均值为2.94,综合污染等级达到IV级中度污染,土壤中Cd,V污染值得进一步关注;丰、平、枯不同水期下金沙江攀枝花河段岸边土壤重金属的潜在生态风险系数均值分别为144.04,110.88和147.15,总体呈现轻微生态风险,重金属Cd存在的危害较为严重,潜在生态风险指数分别为103.92,84.81和111.71,呈现强生态风险,Cd存在的生态风险值得进一步去关注.

**关键词:**土壤;重金属污染;污染评价;生态风险

**中图分类号:**X53

**文献标志码:**A

随着现代工业的快速发展,重金属或其化合物所造成的环境污染日益受到人们的关注<sup>[1]</sup>.改革开放以来,随着化石燃料的不断燃烧以及对矿产资源的过度开发,土壤重金属的污染形势日趋严峻<sup>[2]</sup>.据《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤总超标率为16.1%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为11.2%,2.3%,1.5%和1.1%,全国土壤环境状况总体不容乐观,土壤环境质量令人担忧.土壤重金属污染不同于其他污染,重金属的不可降解性与易累积性的特点<sup>[3-4]</sup>,使得重金属常常在食物链中富集,或通过皮肤接触等途径最终进入人体中,对人体产生危害<sup>[5]</sup>.攀枝花市主要通过冶金工业与矿产开发兴建起来,是一座典型的矿业城市.作为我国大型矿业基地之一,其蕴藏着丰富的钒钛磁铁矿资源<sup>[6]</sup>,但在矿山的开采、运输以及冶炼的过程中难免会产生含有一定量重金属的“三废”,对环境造成污染<sup>[7]</sup>.其区域的独特性使得国内研究人员在此开展了众多关于土壤重金属污染的研究,而以往关于攀枝花地区土壤重金属污染的研究大多以矿产企业周边的土壤作为研究对象,对于攀枝花河段岸边土壤的研究比较少,研究所得出来的结论也更多反映的是矿产企业周边土壤重金属污染的状态,无法准确地反映出攀枝花河段岸边土壤重金属整体的污染状态.与此同时,以往的研究中研究人员对于土壤样品的采集多集中于某一特定时间,样品采集时间的连续性较差.在此背景下,本文以丰、平、枯不同水期下金沙江攀枝花河段岸边采集的土壤作为研究对象,对金沙江攀枝

**收稿日期:**2021-07-30;**修回日期:**2021-09-01.

**基金项目:**国家自然科学基金(91647212;51679256);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室资助项目(2019490911);中国水利水电科学研究院科技项目(WE0163A052018;WE0145B012021);广西水工程材料与结构重点实验室资助项目(GXHRI-WEMS-2020-13);中国三峡建设管理有限公司科研资助项目(JG/18011B).

**作者简介:**史鹏(1996-),男,河北保定人,河北工程大学硕士研究生,主要从事流域水环境保护研究,E-mail:1004967807@qq.com.

**通信作者:**朱长军(1976-),男,河北工程大学教授,主要从事水环境模拟与规划研究,E-mail:christorf@126.com.

花河段岸边土壤重金属污染状况以及可能存在的生态风险进行全面的分析评价,并提出了相关风险管控建议,以为金沙江攀枝花河段岸边土壤重金属的污染防治提供参考。

## 1 研究区域概况

金沙江攀枝花段周边区域人口密集、经济发达,目前攀枝花市区共有 16 个行业,54 家企业,涉及炼焦业和化学原料及化学品制造业两个门类,行业中所占比例较大的有颜料制造、无机酸制造、无机碱制造、其他基础化学原料制造以及炼焦制造。金沙江攀枝花河段部分地区具有开采矿山多、开采数量大、产生尾矿多等特点。大量尾矿囤积在尾矿坝,使得尾矿中重金属含量较高,其表层土壤受到 V, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 等重金属元素不同程度的污染,个别重金属质量含量远超出四川省表层土壤背景值。与此同时,金沙江攀枝花河段的位置还具有特殊性和敏感性等特点,金沙江攀枝花河段为金沙江下游的乌东德水电站按 975 m 蓄水时的库尾部分,河段岸边土壤具有被淹没的风险,同时攀枝花河段上有生活饮用水水源地,水质保护目标较为敏感。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

在金沙江攀枝花河段共布置了 6 个土壤采样点位(见图 1),土壤采样点位特征见表 1。分别于 2020 年 8 月、10 月和 12 月(8 月份代表丰水期;10 月份代表平水期;12 月份代表枯水期)进行攀枝花河段岸边土壤采集工作。为兼顾采集土壤样品的典型性、代表性和随机性,采用多点混合法采集土壤样品 1 kg 以代表该采样点区域的土壤样品。在金沙江攀枝花河段共采集了 6 份表层 0~20 cm 的土壤样品,将采集的土壤样品去除石子、草根及动植物残体等地表杂质部分后放入密封袋中密封避光保存,并用携带的 GPS 设备对采样点进行定位,用记号笔对所采集的土壤样品进行编号,并记录采样点的经纬度坐标。

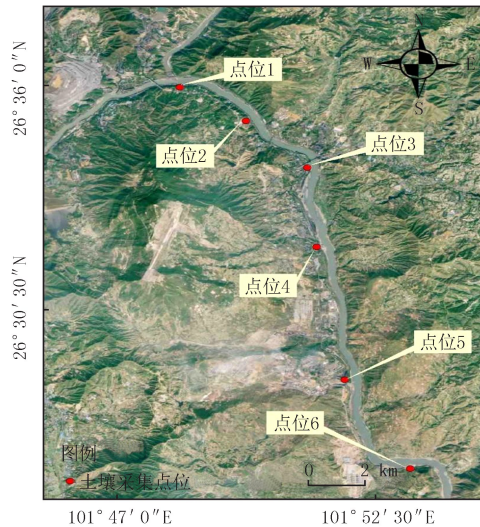


图1 土壤采样点位示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil collection sites

表 1 土壤采样点位特征

Tab. 1 Characteristics of soil sampling points

点位	采样点位的特征
1	位于金沙江支流雅砻江的汇口附近,周边人口分布密集,矿产企业车辆频繁通过
2	金沙江支流巴拉河口附近,周边存在尾矿
3	位于三堆子水文站附近,此处水量较大,土壤存在着被淹没的风险
4	位于金江水厂取水口附近,水源地水质保护目标敏感
5	位于钒钛工业园区排污口附近,此区域集中分布有矿产企业,重金属排放量大,岸边土壤存在被淹没的风险
6	位于迳资村附近,周边人口密集,分布有生活污水处理厂

## 2.2 样品处理

将带回实验室的土壤样品放置于阴凉、干燥并且无污染的通风处风干,摊成2~3 cm的薄层,适当地压碎、翻动,去除碎石、砂砾以及动植物残体。将风干后的土壤样品放在有机玻璃板上,用木棒再次压碎土壤样品,去除杂质后在研钵内研磨,过20目尼龙筛,过筛后的土壤样品经过充分搅拌均匀后,采用四分法取其两份,一份存放在样品库,另一部分再次在研钵内研磨,研磨后过100目尼龙筛,用于土壤重金属元素实验分析。

## 2.3 样品测定

土壤样品重金属元素测定前首先使用微波消解法(HJ 832-2017)对土壤进行消解,随后使用电感耦合等离子体质谱仪测定土壤样品中V, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb的质量含量,用原子荧光分光光度计测定土壤样品中As的质量含量。

### 2.3.1 V, Ni, Cu, Zn, Cd 和 Pb 的测定

称取处理后的土壤样品0.5 g放置于消解罐中并用二次去离子水润湿,依次加入硝酸( $\rho=1.42$  g/mL)6 mL,盐酸( $\rho=1.19$  g/mL)3 mL以及氢氟酸( $\rho=1.16$  g/mL)2 mL,土壤样品和消解液混合均匀后加盖拧紧。将消解罐装入支架后放入微波消解装置炉腔中,按照表2的升温程序进行微波消解,微波消解结束后冷却,待温度降至室温后取出消解罐,缓缓泄压放气并打开消解罐盖。将消解罐中的溶液转移至聚四氟乙烯坩埚中,将坩埚放在可调节温度的加热设备上,在微沸的状态下赶酸,当液体成黏稠状时,取下坩埚进行冷却,用滴管取少量硝酸溶液冲洗坩埚内壁,利用余温溶解附着在坩埚内壁上的残渣,重复上述操作2~3次。最后将坩埚中的溶液转移至25 mL的容量瓶中,用硝酸溶液定容、混匀,静置1 h后利用电感耦合等离子体质谱仪进行重金属V, Ni, Cu, Zn, Cd和Pb的质量含量检测。

表2 重金属V, Ni, Cu, Zn, Cd和Pb的微波消解升温程序

Tab. 2 Microwave digestion heating program of heavy metal V, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb

升温时间/min	消解温度/℃	保持时间/min	升温时间/min	消解温度/℃	保持时间/min	升温时间/min	消解温度/℃	保持时间/min
7	室温→120	3	5	120→160	3	5	160→190	25

### 2.3.2 As 的测定

称取处理后的土壤样品0.5 g放置于消解罐中并用少量二次去离子水润湿,依次加入硝酸( $\rho=1.42$  g/mL)2 mL和盐酸( $\rho=1.19$  g/mL)6 mL,土壤样品和消解液混合均匀后加盖拧紧。将消解罐装入支架后放入微波消解装置炉腔中,按照表3的升温程序进行微波消解,微波消解结束后冷却,待温度降至室温后,取出消解罐缓缓泄压放气并打开消解罐盖。最后将消解罐中的溶液转移至25 mL容量瓶中,用二次去离子水定容、混匀,静置1 h后取上清液进行测定。吸取待测液5 mL,分别加入1 mL铁盐溶液( $\rho=1$  g/L)和2.5 mL硫脲-抗坏血酸混合液,用盐酸溶液( $c=6$  mol/L)定容至10 mL容量瓶中,放置约15 min后,使用原子荧光光度计对试样溶液进行测定。

表3 As的微波消解升温程序

Tab. 3 Microwave digestion heating program of As

升温时间/min	消解温度/℃	保持时间/min	升温时间/min	消解温度/℃	保持时间/min
7	室温→120	3	10	120→180	15

## 2.4 重金属污染状况评价方法

### 2.4.1 单因子污染指数法

单因子指数法<sup>[8]</sup>侧重于反映某种重金属的污染程度,但不能全面反映土壤污染现状。其计算公式见(1)式,评价标准见表4。

$$P_i = C_i / S_i, \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为单因子污染指数; $C_i$ 为土壤中重金属的实测值,mg/kg; $S_i$ 为四川省表层土壤重金属背景值,mg/kg,见表5。

表 4 土壤单因子污染指数评价标准

Tab. 4 Evaluation criteria of soil single factor pollution index

$P_i$	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 5$	$P_i > 5$
污染程度	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重污染
等级	I	II	III	IV	V

表 5 四川省表层土壤背景值

Tab. 5 Background values of topsoil in Sichuan Province

重金属元素	V	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
土壤重金属背景值/(mg · kg <sup>-1</sup> )	96.0	32.6	31.1	86.5	10.4	0.079	30.9

### 2.4.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法<sup>[9]</sup>可以反映各种重金属污染物对土壤的共同影响,同时也突出污染较重的金属污染物对土壤环境质量的影响.计算公式见(2)式,评价标准见表 6.

$$P_N = [(P_{i_{\max}}^2 + P_{i_{\text{ave}}}^2)/2]^{1/2}, \quad (2)$$

式中: $P_N$  为内梅罗综合污染指数; $P_{i_{\max}}$  代表土壤污染物中最大的单项重金属污染指数; $P_{i_{\text{ave}}}$  代表土壤污染物中所有重金属污染指数的平均值.

表 6 土壤内梅罗污染指数评价标准

Tab. 6 Evaluation criteria for soil Nemerow pollution index

$P_N$	$P_N \leq 0.7$	$0.7 < P_N \leq 1$	$1 < P_N \leq 2$	$2 < P_N \leq 3$	$P_N > 3$
污染程度	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重污染
等级	I	II	III	IV	V

### 2.4.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是由瑞典科学家 Hakanson 提出的<sup>[10-11]</sup>,该评价方法将金属元素毒性水平、土壤中重金属污染物含量、不同金属元素之间的协同作用、生态环境效应以及生物毒理学等众多因素综合考虑了进来<sup>[12-14]</sup>,不仅可以反映出土壤中某一重金属的污染状况,也可以综合展现出重金属所造成的生态风险程度,被广泛应用于各种土壤污染风险评价中<sup>[15-17]</sup>.其计算公式见(3)式、(4)式,潜在生态风险指数等级划分标准如表 7 所示.

$$E_i = T_i \cdot P_i, \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (4)$$

式中: $E_i$  为重金属污染物  $i$  的潜在生态风险指数, $T_i$  为重金属污染物  $i$  的潜在生态风险系数<sup>[18]</sup>,各种金属的潜在生态风险系数见表 8, $P_i$  为重金属单因子污染指数, $RI$  为土壤中多种重金属污染的潜在风险综合指数.

表 7 潜在生态风险指数等级划分标准

Tab. 7 Classification standard of potential ecological risk index

等级	$E_i$	$RI$	污染等级	等级	$E_i$	$RI$	污染等级
1	$E_i < 40$	$RI < 150$	轻微生态风险	4	$160 \leq E_i < 320$	$600 \leq RI < 1\ 200$	很强生态风险
2	$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态风险	5	$E_i \geq 320$	$RI \geq 1\ 200$	极强生态风险
3	$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态风险				

表 8 重金属元素潜在生态风险系数

Tab. 8 Potential ecological risk coefficient of heavy metals

重金属元素	V	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
重金属元素潜在生态风险系数	2	5	5	1	10	30	5

### 3 结果与讨论

#### 3.1 金沙江攀枝花河段土壤重金属质量含量特征分析

金沙江攀枝花河段丰、平、枯不同水期下的土壤重金属质量含量统计结果如表 9 所示.通过对比四川省表层土壤重金属背景值发现,丰水期下 7 种重金属中除 Pb 外,其余重金属的平均质量含量均超过四川省表层土壤背景值,超标倍数由大到小依次为 Cd, V, Cu, Ni, Zn, As;平水期下 7 种重金属中除 Pb, Zn 和 As 外,其余重金属平均质量含量也均超过四川省表层土壤背景值,超标倍数由大到小依次为 V, Cd, Cu, Ni;枯水期下 7 种重金属除 Pb 和 As 外,其余重金属平均质量含量同样超过四川省表层土壤背景值,超标倍数由大到小依次为 Cd, V, Cu, Ni, Zn.

土壤中 V, Cd, Cu, Ni 等不同重金属的平均质量含量在丰、平、枯不同水期下均超过了四川省表层土壤背景值,这表明在丰、平、枯不同水期下土壤中的重金属 V, Cd, Cu, Ni 出现了不同程度的累积.王瑞<sup>[19]</sup>在对攀枝花市某矿产企业周边土壤重金属污染研究时,发现其表层土壤中 V, Cd, Cu, Ni, Cr, Pb 和 As 等重金属质量含量均高于四川省表层土壤背景值.龙治杰<sup>[20]</sup>在对攀枝花地区土壤重金属污染研究时也发现了其表层土壤 Cd, V 等重金属质量含量高于四川省表层土壤背景值.这与本研所得到的结果基本一致. V, Cd, Cu, Ni 在土壤中的累积可能与土壤成土母质以及大气沉降有关<sup>[21-22]</sup>.攀枝花市地处我国西南区域,其特有的土壤地质类型常常使得土壤中 V, Cd, Cu, Ni 等重金属元素含量高于我国其他区域土壤中的含量.此外,金沙江攀枝花河段周边分布有钒钛工业园区等著名矿产企业,常年的矿产资源开发活动和特有的生产工艺会产生大量含有 V, Cd, Cu, Ni 等重金属的有害气体与粉尘等.空气中绝大部分含重金属的有害气体与粉尘等会经自然沉降或者降雨沉降进入到土壤中,重金属在土壤中难以迁移和易富集的特点往往会使得重金属在土壤中累积<sup>[23]</sup>,使得土壤中重金属含量偏高.

表 9 不同时期岸边土壤重金属质量含量分析

Tab. 9 Analysis of heavy metal content in coastal soil during different period

mg · kg<sup>-1</sup>

时间段	重金属	V	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
丰水期	最小值	138.0	38.4	41.9	47.7	3.3	0.16	12.1
	最大值	475.0	114.0	64.8	137.0	21.4	0.37	38.2
	平均值	251.2	54.5	52.2	111.3	13.4	0.27	24.7
	背景值	96.0	32.6	31.1	86.5	10.4	0.079	30.9
平水期	最小值	222.0	27.3	28.6	59.0	3.2	0.10	4.0
	最大值	443.0	92.4	67.6	112.0	4.1	0.40	16.6
	平均值	325.2	45.4	50.3	78.0	3.6	0.22	9.9
	背景值	96.0	32.6	31.1	86.5	10.4	0.079	30.9
枯水期	最小值	241.0	29.0	34.8	68.7	1.1	0.14	11.6
	最大值	379.0	108.0	161.0	232.0	26.4	0.68	46.2
	平均值	277.8	49.5	66.0	107.4	7.0	0.29	21.2
	背景值	96.0	32.6	31.1	86.5	10.4	0.079	30.9

### 3.2 金沙江攀枝花河段土壤重金属污染评价

#### 3.2.1 单因子污染指数评价法

丰、平、枯不同水期下土壤重金属单因子污染指数结果如表 10 所示.丰、平、枯不同水期下 7 种重金属都有着不同程度的污染.从重金属单因子污染指数均值来看,依据土壤单因子污染指数评价标准,丰水期下重金属 Cd 达到Ⅳ级中度污染,重金属 V 达到Ⅲ级轻度污染,重金属污染强度由大到小依次为 Cd, V, Cu, Ni, Zn(As), Pb;平水期下重金属 V 达到Ⅳ级中度污染,重金属 Cd 达到Ⅲ级轻度污染,重金属污染强度由大到小依次为 V, Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, As;枯水期下重金属 Cd 达到Ⅳ级中度污染,重金属 V, Cu 达到Ⅲ级轻度污染,重金属污染强度由大到小依次为 Cd, V, Cu, Ni, Zn, Pb, As.

从单因子污染指数评价法中可以看出,丰、平、枯不同水期下土壤重金属 V, Cd 的污染较为严重.周娅等<sup>[24]</sup>在对攀枝花市钒钛磁铁矿周边土壤研究时,发现土壤重金属 Cd 达到重度污染水平.何庆等<sup>[25]</sup>在对攀枝花市钒钛工业园区周边土壤研究时,也发现重金属 Cd, V, Pb 有着不同程度的污染现象.这也与本次的研究结果基本一致.土壤中重金属 V, Cd 污染较为严重,这可能与周边矿产企业日常生产、固废堆积、污水灌溉以及人为活动干扰有关<sup>[26]</sup>.随着产业结构的不断优化,钒钛工业园区已逐渐形成了以钒钛冶金、钒钛化工以及钒钛配套为主导的产业结构,园区企业在日常生产及加工运输的过程中,会产生大量含有 V, Cd, Cu, Ni 等重金属的废弃物,含重金属的废弃物会随着大气沉降等多种途径进入到企业周边的土壤中,使得矿产企业周边土壤重金属含量过高,从而产生重金属污染.

表 10 不同时期下重金属单因子污染指数评价结果

Tab. 10 Evaluation results of single-factor pollution index of heavy metals in different period

时间段	参数	$P_i$						
		V	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
丰水期	最大值	4.95	3.50	2.08	1.58	2.06	4.68	1.24
	最小值	1.44	1.18	1.35	0.55	0.31	2.06	0.39
	平均值	2.62	1.67	1.68	1.29	1.29	3.46	0.80
平水期	最大值	4.61	2.83	2.17	1.29	0.39	5.04	0.54
	最小值	2.31	0.84	0.92	0.68	0.00	1.29	0.13
	平均值	3.39	1.39	1.62	0.90	0.18	2.83	0.32
枯水期	最大值	3.95	3.31	5.18	2.68	2.54	8.61	1.50
	最小值	2.51	0.89	1.12	0.79	0.10	1.76	0.38
	平均值	2.89	1.52	2.12	1.24	0.68	3.72	0.69

#### 3.2.2 内梅罗综合污染指数评价法

金沙江攀枝花河段丰、平、枯不同水期下土壤重金属综合污染指数如表 11 所示.其中丰水期与枯水期下土壤重金属内梅罗综合污染指数的平均值分别为 3.10、3.14,根据内梅罗综合污染评价方法,综合污染评价等级达到了Ⅴ级重度污染;平水期下土壤重金属内梅罗综合污染指数的平均值为 2.94,综合污染评价等级达到了Ⅳ级中度污染.

表 11 丰、平、枯不同水期下土壤重金属综合污染指数

Tab. 11 Comprehensive pollution index of heavy metals in soil under different periods of wet, normal and dry water

参数	$P_N$		
	丰水期	平水期	枯水期
最大值	3.81	3.80	6.63
最小值	2.46	2.30	1.97
平均值	3.10	2.94	3.14

丰、平、枯不同水期下金沙江攀枝花河段岸边土壤重金属综合污染指数差别不大,综合污染评价等级在

中度污染与重度污染之间. 庾先国等<sup>[27]</sup>在研究攀枝花钒钛磁铁矿土壤重金属污染程度时,发现表层土壤重金属大部分处于中度污染水平,其中重金属 V、Cu、Cd 处于重度污染. 吕卫星等<sup>[28]</sup>在研究攀枝花钒钛磁铁矿企业尾矿库周边土壤重金属污染程度时,发现周边表层土壤重金属处于重度污染水平,重金属 Cd 是重点污染防治对象. 这与本研所得到的结果基本保持一致. 钒钛等矿产资源的常年开发、生产原料的交通运输、固废的常年堆积、重金属的自然沉降以及人类活动的不断干扰都是导致丰、平、枯不同水期下金沙江攀枝花河段土壤发生重金属污染的关键因素.

### 3.3 金沙江攀枝花河段土壤重金属潜在生态风险分析

金沙江攀枝花河段土壤重金属潜在生态分析结果如表 12 所示. 丰水期下,各采集点位的重金属潜在生态风险综合指数  $RI$  均值为 144.04, 总体呈现轻微生态风险. 重金属 V、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的潜在生态风险系数  $E_i$  的均值分别为 5.23、8.35、8.39、1.29、12.86、103.92、3.99. 依据潜在生态风险指数等级划分标准, 重金属 Cd 的潜在生态危害为强生态危险, 其余金属的潜在生态危害为轻微生态风险, 重金属潜在生态危害程度由大到小依次为 Cd、As、Cu、Ni、V、Pb、Zn. 平水期下  $RI$  均值为 110.88, 总体呈现轻微生态风险. 重金属 V、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的潜在生态风险系数  $E_i$  的均值分别为 6.77、6.96、8.08、0.90、1.75、84.81、1.60, 重金属 Cd 的潜在生态危害为强生态危险, 其余金属的潜在生态危害为轻微生态风险, 重金属潜在生态危害程度由大到小依次为 Cd、Cu、Ni、V、As、Pb、Zn. 枯水期下  $RI$  均值为 147.15, 总体与丰水期、平水期一样呈现轻微生态风险. 重金属 V、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的潜在生态风险系数  $E_i$  的均值分别为 5.79、7.60、10.62、1.24、6.77、111.71、3.43, 重金属 Cd 的潜在生态危害呈现强生态危险, 其  $E_i$  的均值是强生态风险阈值的 1.4 倍, 其余金属的潜在生态危害为轻微生态风险, 重金属潜在生态危害程度由大到小依次为 Cd、Cu、Ni、As、V、Pb、Zn.

表 12 不同时期下土壤重金属潜在生态分析结果

Tab. 12 Potential ecological analysis results of heavy metals in soil during different period

时间段	参数	重金属潜在生态风险指数 $E_i$							$RI$
		V	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	
丰水期	最大值	9.90	17.48	10.42	1.58	20.58	140.51	6.18	187.69
	最小值	2.88	5.89	6.74	0.55	3.13	61.90	1.96	106.37
	平均值	5.23	8.35	8.39	1.29	12.86	103.92	3.99	144.04
	贡献率/%	3.63	5.80	5.82	0.90	8.93	72.15	2.77	100.00
平水期	最大值	9.23	14.17	10.87	1.29	3.92	151.14	2.69	180.76
	最小值	4.63	4.19	4.60	0.68	ND	38.73	0.64	61.12
	平均值	6.77	6.96	8.08	0.90	1.75	84.81	1.60	110.88
	贡献率/%	6.11	6.28	7.29	0.81	1.58	76.49	1.44	100.00
枯水期	最大值	7.90	16.56	25.88	2.68	25.38	258.23	7.48	355.31
	最小值	5.02	4.45	5.59	0.79	1.05	52.78	1.88	75.06
	平均值	5.79	7.60	10.62	1.24	6.77	111.71	3.43	147.15
	贡献率/%	3.93	5.16	7.22	0.84	4.60	75.92	2.33	100.00

注:“ND”表示未检出.

从土壤重金属潜在生态分析结果中不难发现,金沙江攀枝花河段岸边土壤重金属总体呈现轻微生态风险,但土壤中重金属 Cd 的潜在生态危害为强生态风险,这与周娅等<sup>[24]</sup>研究所得出的结论基本一致. 重金属 Cd 主要来源于镉矿、工业冶炼厂以及工业废水,当 Cd 随着人类活动进入到土壤中时,可以被土壤中的植物吸收,随着食物链进入到人体中,危害人类的生命健康,同时 Cd 也会阻碍植物的正常发育,影响植物正常生长,破坏生态环境. 为降低重金属 Cd 以及其他土壤重金属污染对环境的不利影响,相关企、事业单位应减少

对矿产资源的过度开发,加强对矿区生产原料运输过程的管理,严格控制工业生产废水的排放,同时相关部门也可以在矿产企业周边种植一些对重金属具有超富集性的植物,加强对土壤重金属的吸收、转运,对已经受到重金属污染的土壤进行一定的修复,以维护土壤生态系统的正常运转。

## 4 结 论

(1)丰、平、枯不同水期下金沙江攀枝花河段岸边土壤重金属 V, Cd, Cu, Ni 质量含量均值高于四川省表层土壤背景值,土壤中重金属 V, Cd, Cu, Ni 存在不同程度的累积;丰水期与枯水期下重金属内梅罗综合污染指数均值分别为 3.10 和 3.14,土壤重金属综合污染等级达到 V 级重度污染,平水期下重金属内梅罗综合污染指数均值为 2.94,土壤重金属综合污染等级达到 IV 级中度污染,土壤中重金属 Cd, V 污染较为严重,值得进一步关注。

(2)丰、平、枯不同水期下土壤采集点位重金属的潜在生态风险指数 *RI* 均值分别为 144.04, 110.88, 147.15, 总体呈现轻微生态风险;重金属 Cd 的潜在生态风险指数最高,潜在生态风险为强生态风险,重金属 Cd 对生态环境的危害值得进一步关注。

## 参 考 文 献

- [1] 刘超. 攀枝花矿区环境重金属分布特征及铜同位素示踪技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.  
LIU C. Distribution characteristics of heavy metals and copper isotope tracing technique in mining area of Panzhihua[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [2] 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 460-476.  
YU T, JIANG T Y, LIU X, et al. Research progress in current status of soil heavy metal pollution and analysis technology[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 460-476.
- [3] 刘佳伟, 杨明生, 段磊光, 等. 鄱阳湖西南边缘农田土壤重金属污染特征及环境现状[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 66-71.  
LIU J W, YANG M S, DUAN L G, et al. Pollution characteristics of heavy metals in farmland soil on the southwest edge of Poyang Lake and its environmental evaluation[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2021, 49(3): 66-71.
- [4] 张雪娇, 何禹龙, 陈辰慧, 等. 河南省某高校校园表层土壤重金属污染状况与评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 79-85.  
ZHANG X J, HE Y L, CHEN C H, et al. Distribution and evaluation of heavy metals in surface soil in one of universities of Henan Province[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2019, 47(3): 79-85.
- [5] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地质前缘, 2021, 28(4): 238-249.  
ZHANG S R, WANG C Y, LIU J H, et al. Assessments of heavy metal pollution in soils of the southwestern Xiongan District and its ecological risk[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 238-249.
- [6] 罗启超, 周杨. 四川省攀枝花新街钒钛磁铁矿床地质特征[J]. 中国金属通报, 2020(4): 54-55.  
LUO Q C, ZHOU Y. Geological characteristics of Xinjie vanadium titanium magnetite deposit in Panzhihua, Sichuan Province[J]. China Metal Bulletin, 2020(4): 54-55.
- [7] 贾中民. 渝西北土壤重金属污染特征、源解析与生态健康风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2020.  
JIA Z M. Characteristics, source apportionment, and ecological health risk assessment of soil heavy metals contamination in northwest Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [8] 朱秀红, 吴晓娜, 茹广欣, 等. 济源某铅厂周边农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(3): 459-463.  
ZHU X H, WU X N, RU G X, et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soil around a plumbum plant in Jiyuan[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(3): 459-463.
- [9] 张迪, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州遵义下寒武统黑色页岩区土壤重金属污染和人体健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2021, 34(5): 1247-1257.  
ZHANG D, ZHOU M Z, XIONG K N, et al. Assessment of pollution and human health risk from heavy metals in soils and crops in the lower Cambrian black shale area, Zunyi, Guizhou Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(5): 1247-1257.
- [10] 黄安林, 傅国华, 秦松, 等. 黔西南三叠统渗育型水稻土重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 193-201.  
HUANG A L, FU G H, QIN S, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution of Triassic osmotic paddy soil in the southwest of Guizhou Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(2): 193-201.
- [11] 孙德尧, 薛忠财, 韩兴, 等. 冀北山区某矿区周边耕地土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2):



- 242-249.
- SUN D Y, XUE Z C, HAN X, et al. Polluting characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in cultivated land around a mining area in northern Hebei Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(2): 242-249.
- [12] 张耀文, 邸利. 矿区土壤重金属污染及治理研究进展[J]. *现代农业科技*, 2015(1): 206.
- ZHANG Y W, DI L. Research progress of soil heavy metal pollution and treatment in mining area[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(1): 206.
- [13] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1609-1619.
- ZHAO D J, WANG X Q. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the Karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(4): 1609-1619.
- [14] 徐友宁. 矿山地质环境调查研究现状及展望[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1235-1244.
- XU Y N. Investigation and research on the mine geological environment: present status and outlook[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1235-1244.
- [15] 任晓辉, 高宗军, 安永会, 等. 张掖市甘州区北部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(7): 163-169.
- REN X H, GAO Z J, AN Y H, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in northern Ganzhou District, Zhangye City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(7): 163-169.
- [16] 尹炳奎, 黄满红, 李光明, 等. 云南某冶炼厂周围农田土壤重金属污染状况及生态风险评价[J]. *有色金属工程*, 2017, 7(1): 92-96.
- YIN B K, HUANG M H, LI G M, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around historical mining plant in Yunnan Province[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2017, 7(1): 92-96.
- [17] 葛海泉, 石冬瑾. 铅锌矿区土壤和植物重金属污染调查分析[J]. *资源节约与环保*, 2019(7): 51.
- GE H Q, SHI D J. Investigation and analysis of soil and plant heavy metal pollution in lead-zinc mining area[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2019(7): 51.
- [18] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [19] 王瑞. 攀枝花地区土壤重金属分布特征与 Cr 同位素示踪[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- WANG R. Distribution of soil heavy metals and Cr isotope tracer in Panzhihua region[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [20] 龙治杰. 攀枝花地区土壤重金属分布特征及钒元素来源解析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- LONG Z J. A study on the spatial distribution of heavy metal elements and source apportionment of vanadium in Panzhihua area soil[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [21] 刘睿, 黄艺, 王丽, 等. 西南典型矿业城市土壤及近地表大气尘中重金属污染特征及评价: 以攀枝花市为例[J]. *矿物岩石*, 2019, 39(3): 111-119.
- LIU R, HUANG Y, WANG L, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil and near-surface atmospheric dust of typical mining city in southwest China: a case study for Panzhihua city[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2019, 39(3): 111-119.
- [22] 赵晶, 范必威, 武仕忠. 攀枝花市攀钢工业区土壤重金属污染特征及评价[J]. *四川环境*, 2007, 26(3): 67-70.
- ZHAO J, FAN B W, WU S Z. Characteristics and assessment of soil contamination by heavy metals in the industrial zone of Panzhihua iron & steel group co[J]. *Sichuan Environment*, 2007, 26(3): 67-70.
- [23] 李晓晓, 韩瑞芳, 陈倩倩, 等. 土壤重金属迁移转化领域研究的文献计量分析[J]. *土壤通报*, 2020, 51(3): 733-740.
- LI X X, HAN R F, CHEN Q Q, et al. Bibliometric analysis for migration and transformation of heavy metals in soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(3): 733-740.
- [24] 周娅, 杨定清, 谢永红, 等. 攀枝花市芒果基地土壤环境质量评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(S1): 107-110.
- ZHOU Y, YANG D Q, XIE Y H, et al. Assessment on soil environmental quality of the main mango base in Panzhihua City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(S1): 107-110.
- [25] 何庆, 姚毅, 廖德兵, 等. 利用历史监测资料分析土壤重金属环境质量: 以攀枝花市钒钛产业园区为例[J]. *四川环境*, 2020, 39(6): 151-156.
- HE Q, YAO Y, LIAO D B, et al. Analysis of soil heavy metal environmental quality using historical monitoring data: take Panzhihua vanadium and titanium industrial park as an example[J]. *Sichuan Environment*, 2020, 39(6): 151-156.
- [26] 赵兵, 王玉云, 徐德江, 等. 四川石棉工业园区周边土壤重金属污染及生态风险评价研究[J]. *四川环境*, 2019, 38(6): 138-142.
- ZHAO B, WANG Y Y, XU D J, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk of soils near a industrial park in Shimian Sichuan Province[J]. *Sichuan Environment*, 2019, 38(6): 138-142.
- [27] 庾先国, 徐争启, 滕彦国, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿区土壤重金属地球化学特征及污染评价[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(2): 127-131.
- TUO X G, XU Z Q, TENG Y G, et al. The geochemical characteristics of heavy metals in soils in the Panzhihua V-Ti magnetite mine and

the pollution evaluation[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(2): 127-131.

[28] 吕卫星, 吕享宇. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿对土壤环境影响调查与分析[J]. 环境影响评价, 2021, 43(4): 70-74.

LYU W X, LYU X Y. Investigation and analysis of influence of vanadium titanomagnetite tailings on soil environment in Panzhihua[J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(4): 70-74.

## Soil heavy metal pollution and ecological risk assessment in Panzhihua reach of Jinsha River

Shi Peng<sup>1,2</sup>, Zhu Changjun<sup>1,3</sup>, Wang Shiyan<sup>2</sup>, Fan Hao<sup>4</sup>, Wu Bi<sup>4</sup>, Liu Chang<sup>2</sup>, Li Budong<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210009, China;

4. Yangtze River Water Resources Protection Research Institute, Wuhan 430051, China)

**Abstract:** To clearly understand the heavy metals pollution of the soil in the Panzhihua reach of the Jinsha River, the bank soil of which in wet, normal and dry periods were taken as the research objects. In addition, the single-factor pollution index method, the Nemerow comprehensive pollution index method, and the potential ecological risk index method were used to evaluate the pollution state of soil heavy metals and possible ecological risk in the Panzhihua reach of the Jinsha River. Apart from that, relevant risk management and control recommendations are put forward. The results show that the average content of heavy metals such as V, Cd, Cu, Ni in different periods of wet, normal and dry water levels exceed the background value of the surface soil in Sichuan Province; the mean values of the heavy metals Nemerow comprehensive pollution index in the wet and dry seasons are 3.10 and 3.14, respectively, the comprehensive pollution level reaches level V heavy pollution, the average value of the heavy metal Nemerow comprehensive pollution index in the normal water period is 2.94, the comprehensive pollution level reaches level IV moderate pollution, Cd and V pollution in soil deserve further attention; the average values of the potential ecological risk coefficients of heavy metals in the bank soil of the Panzhihua reach of the Jinsha River in wet, normal, and dry periods are 144.04, 110.88, and 147.15, respectively, showing a slight ecological risk in general, the harm of heavy metal Cd is more serious, and the potential indexes of ecological risk are 103.92, 84.81 and 111.71, respectively, presenting strong ecological risk, the ecological risk of Cd deserves further attention.

**Keywords:** soil; heavy metal pollution; pollution assessment; ecological risk

[责任编辑 赵晓华 陈留院]