



嫩江流域水体及悬浮物重金属元素分布特征及环境指示意义

刘国栋^{1,2}, 张立³, 杨泽^{1,2}, 戴慧敏^{1,2}, 赵传冬⁴

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
2. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034;
3. 黑龙江省地质调查研究总院, 黑龙江 哈尔滨 150036;
4. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000

摘要: 水和悬浮物是河流重金属元素迁移的主要载体。对嫩江中下游悬浮物及滤后水重金属元素分布特征进行了较系统的研究, 结果表明: 丰水期是嫩江流域内悬浮物迁移的主要季节, 支流的汇入会影响嫩江干流悬浮物浓度, 大安市生产生活对水体悬浮物浓度产生明显影响; 齐齐哈尔市的生产生活对嫩江水体悬浮物重金属含量影响不大, 而对水中 Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 元素产生明显影响; 雅鲁河是向嫩江输入重金属 Cr、Ni 最多的支流, 年输入嫩江通量分别为 1223、100.46 t; 阿伦河是向嫩江输入重金属 Cd、Cu、Pb 最多的支流, 年输入嫩江通量分别为 0.08、10.93、9.96 t; 嫩江向松花江年输入重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 通量分别为 113.7、0.32、0.79、438、164、152、440、224 t。

关键词: 嫩江; 水体悬浮物; 滤后水; 重金属

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN THE WATER AND SUSPENDED SUBSTANCE OF NENJIANG RIVER BASIN: Environmental Implication

LIU Guo-dong^{1,2}, ZHANG Li³, YANG Ze^{1,2}, DAI Hui-min^{1,2}, ZHAO Chuan-dong⁴

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;
2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China;
3. Heilongjiang Institute of Geological Survey and Research, Harbin 150036, China;
4. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract: Water and suspended substance are the main carriers for the migration of heavy metal elements in rivers. The paper systematically studies the distribution characteristics of heavy metals in suspended substance and filtered water from the middle and lower reaches of Nenjiang River. The results show that the migration of suspended substance mainly occurs in wet season, and the inflow of tributaries may affect the concentration of suspended matter in the main stream. The industrial and domestic activities in Da'an City have obvious influence on the concentration of suspended matter; while those in Qiqihar have little influence on the heavy metal contents in suspended substance, but significant influence on Cr, Cu, Pb, Ni, and Zn in water. Yalu River brings the most heavy metals Cr and Ni to Nenjiang River, with the annual flux of 1223 and 100.46 t, respectively. Arun River inputs the most heavy metals

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2020-10-09. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“东北黑土地 1:25 万土地质量地球化学调查”(编号 121201007000161312), “兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520).

作者简介: 刘国栋(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事生态地球化学、土地质量地球化学调查研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//9760677@qq.com

Cd, Cu and Pb, with the annual flux of 0.08, 10.93 and 9.96 t, respectively. The annual fluxes of heavy metals such as As, Hg, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn and Ni from Nenjiang River to Songhua River are 113.7, 0.32, 0.79, 438, 164, 152, 440 and 224 t, respectively.

Key words: Nenjiang River; suspended substance in water; filtered water; heavy metal

0 前言

河流中悬浮物来自集水区的风化壳和土壤,是流域风化、成土及地表侵蚀过程的产物^[1-2],是研究表生地球化学特征及影响因素的重要介质.悬浮物的特征不仅可以指示源区,也可以为研究河流的污染源提供依据.

国内外许多重要河流悬浮物的研究发现^[3-7],水及水体悬浮物是流域内重金属元素迁移的主要载体.悬浮物主要由黏土、细碎屑等物质组成,重金属元素在悬浮物中可呈吸附态、矿物态等形式存在.许多学者进行过风化作用、物质运移规律和物源的判别分析等方面的研究.长江、黄河^[8-10]及世界上其他温、热带流域^[11-16]的悬浮物、沉积物重金属元素地球化学特征已有了较为系统的研究成果.

嫩江作为松花江最大支流,其干流水及水体悬浮物对松花江中下游物质组成及环境状况有较大影响,然而研究程度则相对较低.本文通过系统取样,研究水体及悬浮物重金属元素分布分配特征,探索总结嫩江支流对干流重金属浓度的影响程度和控制因素,估算嫩江干流及各支流重金属年输出通量,期望该成果可为元素在流域间迁移转化研究提供依据.

1 研究区概况

嫩江是松花江最大的支流,发源于内蒙古自治区境内大兴安岭伊勒呼里山的中段南侧,干流流经黑龙江省与内蒙古自治区、吉林省的交界,最后在吉林省松原市三岔河与松花江南源汇合为松花江.嫩江全长1370 km,流域面积为 $29.7 \times 10^4 \text{ km}^2$.本次研究嫩江中下游段属广阔的松嫩平原地带,江道蜿蜒曲折,沙滩、沙洲、江汊多,江道多呈网状,两岸滩地延展很宽,最宽处超过10 km,最大水深7.4 m,滩地上广泛分布着泡沼、湿地和牛轭湖.齐齐哈尔市以上江道平均坡降 $0.2\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$,主槽水面宽300~400 m,水深3~4 m.下游江段河网密度较大,右岸有阿伦河、雅鲁河、绰尔河、洮儿河等大支流汇入嫩江,左岸广大地区基本属于内

陆闭流区,有大片沼泽、连环湖和湿洼地,从河源到三岔河口高差900 m.下游段流经的城镇主要有齐齐哈尔市、大安市.

2 样品采集与分析

2.1 水体悬浮物及滤后水采集

河流悬浮物的采样点布置在嫩江干流及主要支流(图1).在同一采样点分枯水期(5月)和丰水期(8月)2次采集,共采集悬浮物样品22件.采样点选择在河流开阔、水流平稳处.悬浮物采样位置为河流中洪线上,距水面下30 cm的水体中上部.为防止水体在自然状态下与大气接触后可能会产生新的沉淀物,每次采集选用20 L聚乙烯水桶,将水桶完全装满并除去漂浮或浸没的树枝、枯叶等杂质,避免与空气接触,水样采集后放置在4℃左右的冷藏箱中,并在7 d内完成布氏漏斗中减压抽气对水样过滤.过滤过程中采用



图1 嫩江流域水体悬浮物采样点位图

Fig. 1 Location map of suspended substance sampling sites in Nenjiang River Basin

1—采样点(sampling site); 2—市(city); 3—县(county)

专用滤膜(孔径 0.45 μm,直径 140 mm)过滤提取悬浮物. 过滤过程中,每次取水时,需将水样充分摇匀,避免容器底部有悬浮物沉积. 过滤完成后,将滤后水保存编号,再将滤膜阴干至半干燥状态,每一张滤膜装一个塑料袋,留两张空白滤膜作空白分析,最后将滤后水和滤膜一并送往实验室做测试分析.

悬浮物分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成. 分析测试工作均严格按照《多目标区域地球化学调查规范》和《区域生态地球化学评价技术要求》执行.

2.2 数据处理方法

由于悬浮物及水是流域内元素大跨度迁移的主要介质,而不同流域悬浮物及水中元素含量的差异极大,因此估算研究区主要支流元素的年输出通量对全面认识各支流对松花江干流的影响、确定各支流的贡献率极为重要.

悬浮物元素的输出通量计算公式:

$$F_{悬} = K \times C \times R / 10^4 \quad (1)$$

式中, $F_{悬}$ 为某一元素的输出通量,单位 t/a; K 为水体悬浮物浓度,单位 g/L; C 为悬浮物中某一元素的含量,单位为 10^{-9} ; R 为河流年均径流量,单位为 $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 10^4 为单位换算系数.

滤后水元素的输出通量计算公式:

$$F_{水} = S \times R / 10$$

式中, $F_{水}$ 为某一元素的输出通量,单位 t/a; S 为滤后水中某一元素的含量,单位为 ng/mL; R 为河流年均径

流量,单位为 $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 10 为单位换算系数.

3 结果与讨论

3.1 嫩江流域水体中悬浮物含量

从嫩江干流及其主要支流水体中枯水期和丰水期悬浮物的含量统计(表 1、图 2)中可以看出:嫩江干流丰水期河流悬浮物的平均含量为 0.173 g/L,明显高于枯水期悬浮物平均含量 0.107 g/L;嫩江主要支流丰水期悬浮物的平均含量为 0.305 g/L,是枯水期悬浮物平均含量的 3.43 倍. 表明丰水期是嫩江流域内悬浮物迁移的主要季节. 在丰水期,嫩江齐齐哈尔上游段悬浮物含量明显高于阿伦河汇入之前嫩江富裕段,悬浮物

表 1 嫩江干流及其主要支流悬浮物含量统计

Table 1 Contents of suspended solids in the main stream and tributaries of Nenjiang River

干流	丰水期	枯水期	支流	丰水期	枯水期
富裕段	0.074	0.098	阿伦河	1.015	0.039
齐齐哈尔上游段	0.184	0.060	雅鲁河	0.064	0.049
齐齐哈尔下游段	0.158	1.612	绰尔河	0.072	0.074
泰来上游	0.101	0.037	洮儿河	0.071	0.193
泰来下游	0.137	0.070			
大安上游	0.050	0.232			
大安下游	0.489	0.145			
平均	0.173	0.107	平均	0.305	0.089

含量单位:g/L.

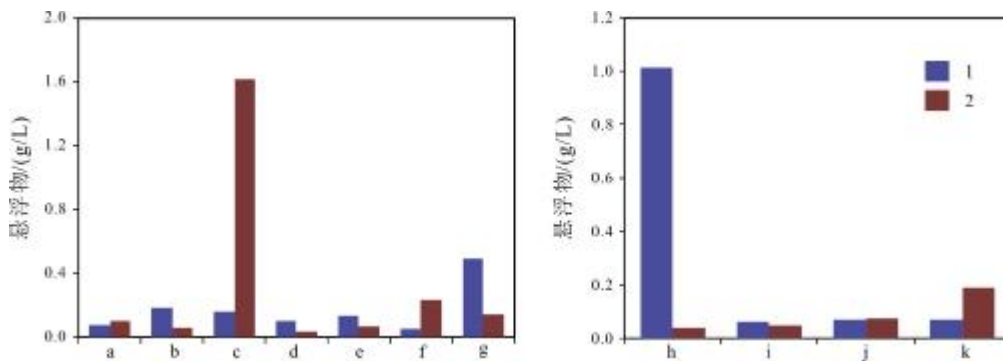


图 2 嫩江干流及主要支流悬浮物含量

Fig. 2 Contents of suspended substance in Nenjiang River and its main tributaries

1—丰水期(wet season); 2—枯水期(dry season); a—富裕段(Fuyu segment); b—齐齐哈尔上游(upstream Qiqihar); c—齐齐哈尔下游(downstream Qiqihar); d—泰来上游(upstream Tailai); e—泰来下游(downstream Tailai); f—大安上游(upstream Da'an); g—大安下游(downstream Da'an); h—阿伦河(Arun river); i—雅鲁河(Yalu river); j—绰尔河(Chao'er river); k—洮儿河(Tao'er river)

含量是富裕段的 2.5 倍,嫩江支流阿伦河入嫩江河口段丰水期悬浮物浓度是嫩江富裕段的 13.7 倍,说明丰水期阿伦河的汇入提高了嫩江悬浮物浓度;嫩江泰来上游段悬浮物浓度明显低于齐齐哈尔下游段,该嫩江段汇入雅鲁河及绰尔河,汇入前悬浮物浓度是汇入后的 1.6 倍,且两条支流的悬浮物浓度明显低于汇入前的齐齐哈尔下游段,齐齐哈尔下游段悬浮物浓度分别是两条河流的 2.5 和 2.2 倍,说明两条河流的汇入会稀释嫩江干流的悬浮物浓度且在枯水期表现更为明显;洮儿河的汇入对嫩江干流水体悬浮物浓度的影响与雅鲁河及绰尔河相似。

河流水体悬浮物浓度受流域范围内地貌、河流比降、地理位置、地质背景、水文地貌条件和自然与人工环境等因素控制^[17],嫩江干流从上游到下游水体悬浮物浓度丰枯水期均呈现不均匀分布的特点。丰水期大安下游水体悬浮物浓度较高,达到 0.489 g/L,齐齐哈尔上游段、泰来上游和泰来下游水体悬浮物浓度在 0.1~0.2 g/L 之间,富裕段及大安上游水体悬浮物浓度在 0.1 g/L 以下。大安下游水体悬浮物浓度明显高于上游,下游浓度是上游的 9.8 倍,说明大安市生产生活对水体悬浮物浓度产生明显影响。枯水期大安上游及下游水体悬浮物浓度相对较高,在 0.14~0.24 g/L 之间,嫩江干流其他段位均在 0.1 g/L 以下。

嫩江主要支流雅鲁河、绰尔河水体悬浮物浓度丰枯水期变化不大,而阿伦河、洮儿河丰枯水期水体悬浮物浓度变化较大。阿伦河丰水期水体悬浮物浓度为 1.015 g/L,是枯水期的 26 倍;洮儿河枯水期水体悬浮物浓度为 0.193 g/L,是丰水期的 2.7 倍。可见,不同河流物质源区、植被覆盖、风化侵蚀程度、人类活动等条件的差别会造成丰枯水期水体悬浮物浓度的差异。

3.2 悬浮物中重金属元素含量特征

1) 嫩江干流

图 3 示出的是嫩江干流富裕段到大安丰水期、枯水期悬浮物中重金属元素的含量特征。从中可以看出:富裕县采样点丰水期悬浮物中 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 的含量明显高于枯水期,其中丰水期悬浮物 Cd 和 Zn 含量分别是枯水期的 7.8 和 6 倍。对于流悬浮物样品的统计显示,丰水期悬浮物中 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 元素含量大于枯水期的样品数分别占总样品数的 85.7%、57.1%、100%、71.4%、100%、85.7%、100%,

表明嫩江干流丰水期样品中除 Hg 之外的重金属元素含量较枯水期高是一个普遍特征。丰水期水体悬浮物 Hg 元素含量大于枯水期的样品数占总样品数仅为 28.6%,说明水体悬浮物 Hg 元素区别于其他重金属元素,含量枯水期大于丰水期。刘飞等^[18]在研究土壤-大气界面 Hg 交换通量中发现,气象条件显著影响 Hg 交换通量,Hg 交换通量密度与光照和土壤温度呈显著正相关关系。据富拉尔基水文站 1971~1985 年 15 年观测记录^[19],嫩江在 6~8 月份,尤其是 7 月份为一年中水流温度最高时期,在 24.6~28.4 °C 之间;11~3 月份水温最低,在 0~0.2 °C 之间。丰水期与枯水期温度相差 10~20 °C。因此推测温度是嫩江干流水体悬浮物 Hg 元素含量变化的主要控制因素。嫩江在流经齐齐哈尔市前后的水体悬浮物重金属含量对比发现,As、Cd、Zn 元素丰水期及枯水期均显示下降的趋势,Cr、Cu、Pb、Ni 则表现为变化不明显,这说明齐齐哈尔市的生产生活对嫩江水体悬浮物重金属含量影响不大。

2) 嫩江支流

图 4 表明,丰水期雅鲁河相对富集 Hg、Cd、Zn;洮儿河相对富集 As;绰尔河及阿伦河没有明显富集及贫化的重金属元素。枯水期阿伦河相对富集 As、Hg、Cd、Cu、Zn,绰尔河相对富集 Cd,雅鲁河及洮儿河没有明显富集及贫化的重金属元素。由于各支流的物质源区、水文地貌条件、侵蚀程度等地质环境因素的差异,黏土矿物的种类存在不同。阿伦河流域以粉细砂、中粗砂及淤泥质亚黏土为主,雅鲁河及绰尔河地质背景相似,主要为粉细砂和中粗砂,洮儿河主要为风积亚黏土和黄土状亚砂土。悬浮物重金属元素含量不仅受黏土矿物含量影响,也受黏土矿物种类影响。不同的黏土矿物对金属元素吸附能力有很大差别,对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附容量依次为:蒙脱石>伊利石>高岭石^[20]。嫩江各支流水体悬浮物重金属元素含量的差异性可能受控于各流域第四系地质背景。

各支流丰水期悬浮物中 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 元素含量大于枯水期的样品数分别占总样品数的 75%、75%、50%、100%、75%、100%、75%、100%,说明嫩江支流水体悬浮物重金属元素含量丰水期大于枯水期,丰水期是重金属元素迁移的主要季节。

3.3 嫩江流域河流滤后水中重金属元素分布

表 2 示出的是嫩江干流枯水期和丰水期滤后水的

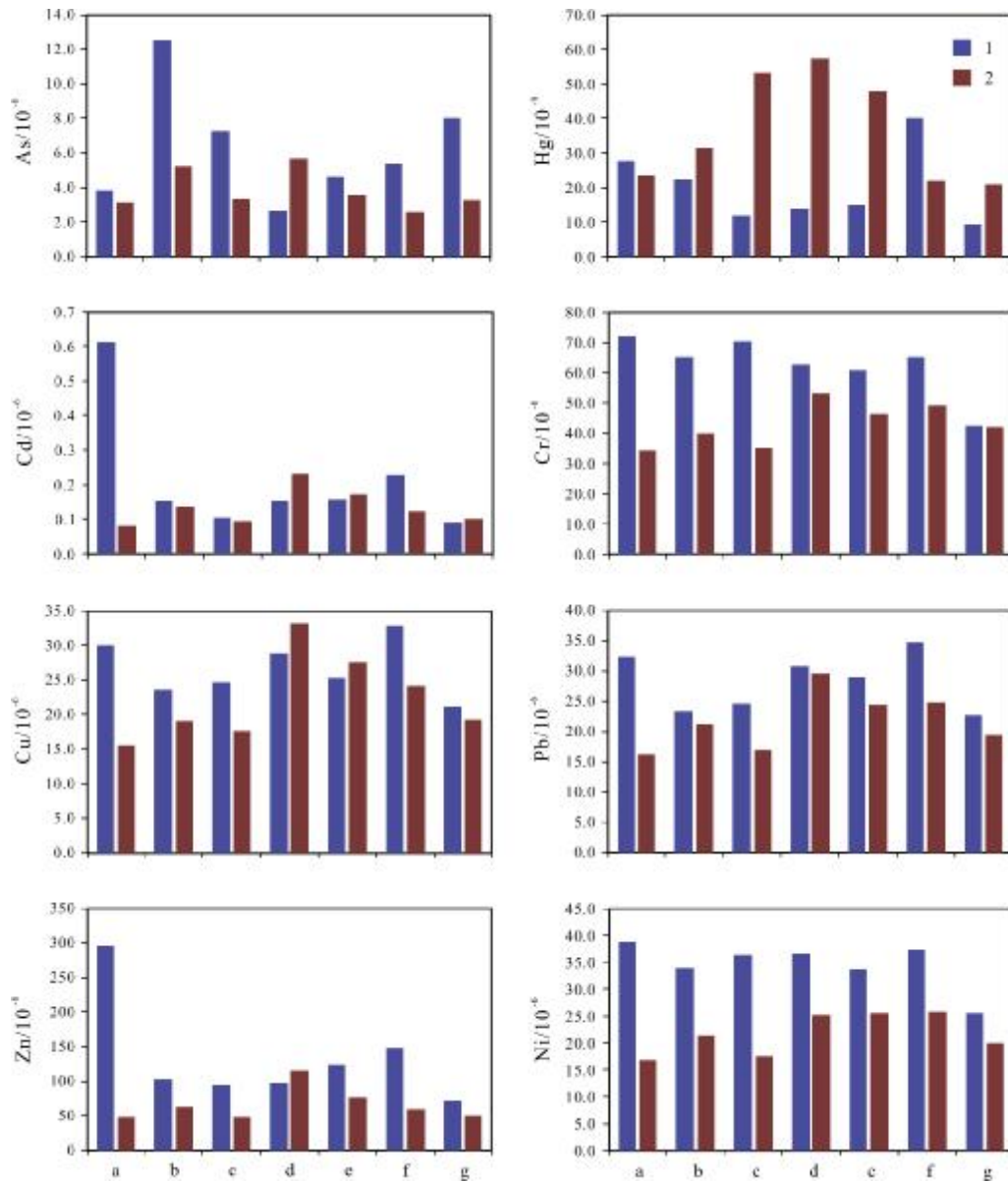


图 3 嫩江干流水体悬浮物重金属元素含量特征

Fig. 3 Heavy metal contents in suspended substance in the trunk stream of Nenjiang River

1—丰水期(wet season); 2—枯水期(dry season); a—富裕段(Fuyu segment); b—齐齐哈尔上游(upstream Qiqihar); c—齐齐哈尔下游(downstream Qiqihar); d—泰来上游(upstream Tailai); e—泰来下游(downstream Tailai); f—大安上游(upstream Da'an); g—大安下游(downstream Da'an)

重金属含量. 从中可以看出: 嫩江干流及支流除 As、Hg 外, 其他重金属元素含量丰水期明显高于枯水期, Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 丰水期高于枯水期的样本占总样本分别为 91%、100%、81.8%、100%、91%、100%, 而 As 元素含量表现为枯水期明显大于丰水期. 可见重金属元素在除 Hg、As 外, 在丰水期是主要的迁移季节. 在丰水期, 齐齐哈尔下游滤后水的 Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 含量明显高于齐齐哈尔上游段, 说明齐齐哈尔市的生产

生活提高了水体中 Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 元素含量. 嫩江泰来上游段滤后水 Cr、Ni 元素含量明显高于齐齐哈尔下游段. 该嫩江段汇入雅鲁河及绰尔河, 汇入前 Cr、Ni 元素含量分别是汇入后的 3.3、5.4 倍, 且两条支流 Cr、Ni 元素含量明显高于汇入前的齐齐哈尔下游段. 其中雅鲁河 Cr、Ni 元素含量分别是嫩江干流汇入前的 93、2.6 倍, 绰尔河 Cr、Ni 元素含量分别是嫩江干流汇入前的 8.4、17.5 倍, 说明两条河流的汇入提高了嫩江干流

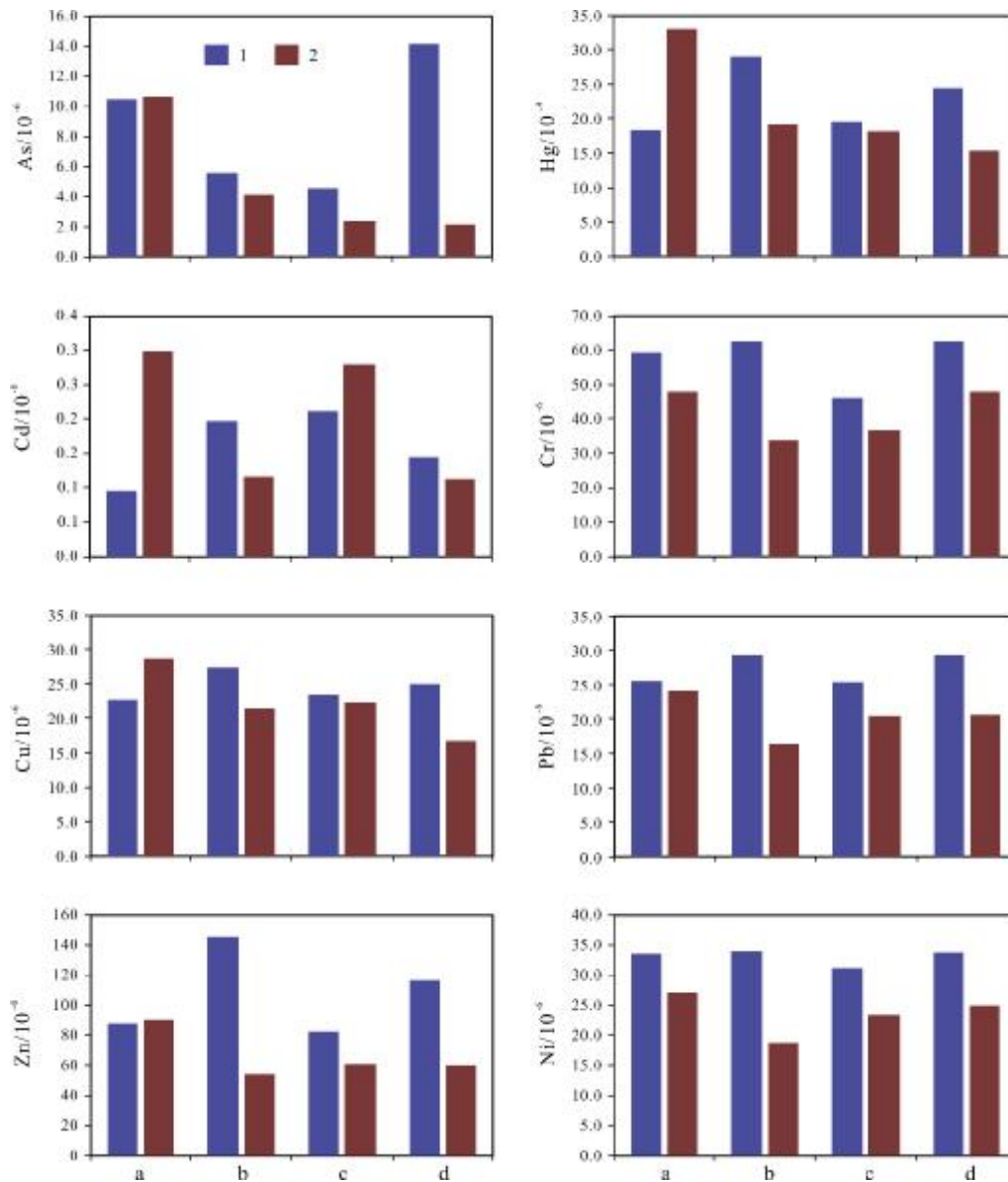


图4 嫩江主要支流水体悬浮物重金属元素含量特征

Fig. 4 Heavy metal contents in suspended substance in the main tributaries of Nenjiang River

1—丰水期(wet season); 2—枯水期(dry season); a—阿伦河(Arun river); b—雅鲁河(Yalu river); c—绰尔河(Chao'er river); d—洮儿河(Tao'er river)

Cr、Ni 元素的浓度。

3.4 嫩江重金属输入输出通量估算

根据各支流的多年年均径流量^[21-24],结合本研究的水体悬浮物重金属元素含量(表3),估算了嫩江流域及主要支流以水及悬浮物的形式重金属输出通量(表4)。

悬浮物统计结果表明:阿伦河是以水体悬浮物形式向嫩江输入重金属 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 最多的支流。值得注意的是,阿伦河是嫩江主要支流中多年

径流量最小的,仅占嫩江主要支流总径流量的 11.2%。其中 As 输出通量是其他支流的 2~8 倍,Cd 输出通量是其他支流的 2~4 倍。洮儿河是以水体悬浮物形式向嫩江输入重金属 Hg 最多的支流。

滤后水重金属输出通量结果表明:与水体悬浮物的输出特征存在明显不同,雅鲁河是向嫩江输入重金属 Cr、Ni 最多的支流,年输入通量分别为 1218、97.7 t,其中 Cr 年输出通量是其他支流的 9~347 倍,Ni 年输出通量是其他支流的 4~19 倍;绰尔河是向嫩江输入

表 2 嫩江干流及主要支流滤后水重金属元素含量

Table 2 Heavy metal contents in the filtered water of Nenjiang River and main tributaries

河流段	采样时间	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
富裕县段	丰水期	2.40	0.060	0.076	4.79	1.55	0.68	1.38	5.36
	枯水期	3.30	0.074	0.005	3.42	0.93	0.04	0.62	1.35
齐齐哈尔上游段	丰水期	2.55	0.010	0.011	13.02	1.43	0.81	1.61	7.21
	枯水期	3.00	0.028	0.003	4.69	0.80	0.10	0.73	0.69
齐齐哈尔下游段	丰水期	1.50	0.011	0.010	14.18	3.53	1.31	1.90	9.78
	枯水期	3.45	0.008	0.003	3.34	0.76	0.02	0.72	0.85
泰来县上游段	丰水期	3.30	0.009	0.015	47.16	1.44	1.01	10.26	7.95
	枯水期	4.05	0.014	0.012	5.34	3.45	0.35	1.34	3.76
泰来县下游段	丰水期	2.70	0.010	0.009	15.05	1.51	0.92	1.83	6.59
	枯水期	4.20	0.006	0.003	3.97	1.27	0.01	0.72	0.06
大安上游段	丰水期	3.90	0.011	0.010	10.22	1.54	0.70	1.44	3.74
	枯水期	4.20	0.006	0.008	3.35	1.47	0.06	0.90	1.07
大安下游段	丰水期	2.40	0.014	0.007	10.00	1.47	0.69	1.38	5.32
	枯水期	4.50	0.006	0.005	3.88	0.98	0.04	0.76	0.99
阿伦河段	丰水期	3.60	0.016	0.022	6.84	2.14	1.71	3.16	34.96
	枯水期	4.80	0.016	0.008	3.00	1.55	0.16	0.89	0.67
雅鲁河段	丰水期	3.45	0.010	0.009	1312.30	1.16	0.93	4.86	96.88
	枯水期	4.50	0.006	0.001	4.39	0.65	0.10	0.34	8.76
绰尔河	丰水期	1.95	0.008	0.012	118.69	1.61	0.82	33.32	17.82
	枯水期	4.80	0.011	0.003	4.54	1.10	0.12	0.57	1.79
洮儿河	丰水期	10.05	0.009	0.015	19.16	1.72	0.65	2.18	5.80
	枯水期	7.50	0.008	0.020	5.61	1.75	0.05	2.37	0.06

含量单位:ng/mL.

重金属 Hg、Pb、Zn 最多的支流, 年输入通量分别为 0.02、0.97、34.91 t, 其中 Zn 是其他支流输出通量的 7~24 倍; 洮儿河是向嫩江输入重金属 As、Cd、Cu 最多的支流, 年输入通量分别为 15.27、0.03、3.02 t, 其中 As 是其他支流输出通量的 2~5 倍. 以上说明不同支流输入嫩江的重金属通量存在明显差异. 阿伦河 Cr 元素以水体悬浮物形式输入嫩江重金属最多, 但以水的形式输入相对其他河流却很少, 说明阿伦河中溶入水的重金属 Cr 较其他河流少, 多以悬浮物的形式存在. 且数据表明, 阿伦河 Cu、Pb 与 Cr 相似, 主要以悬浮物形式输入嫩江. 已有研究表明, 在表生强烈氧化条件下, Cr³⁺氧化成 Cr⁶⁺形式的铬酸根离子, 使不活动的铬离子

变为络阴离子发生迁移. 遇到极化性很强的离子 Cu²⁺、Pb²⁺等则形成难溶的铬酸盐矿物^[25]. 因此, 推测阿伦河中的铬元素多以难溶的铬酸盐矿物存在.

汇总嫩江及其支流滤后水及悬浮物的重金属总输出通量发现, 阿伦河是向嫩江输入重金属 Cd、Cu、Pb 最多的支流, 年输入通量分别为 0.08、10.93、9.96 t; 雅鲁河是向嫩江输入重金属 Cr、Ni 最多的支流, 年输入通量分别为 1223、100.46 t; 绰尔河是向嫩江输入重金属 Zn 最多的支流, 年输入通量为 45.7 t; 洮儿河是向嫩江输入重金属 As 最多的支流, 年输入通量为 17.13 t. 嫩江向松花江年输入重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 通量分别为 113.7、0.32、0.79、438、164、

152、440、224 t.

表3 嫩江及主要支流多年年均径流量统计
Table 3 Average annual runoff of Nenjiang River and main tributaries

河流段	嫩江	阿伦河	雅鲁河	绰尔河	洮儿河
径流量/(10 ⁸ m ³ /a)	216.12	7.12	18.5	20.6	17.4
悬浮物总量/t	6 852 965	375 190.8	104 552.8	151 168	229 233

表4 嫩江及主要支流输出重金属通量
Table 4 Output flux of heavy metals from Nenjiang River and main tributaries

元素	介质	嫩江	阿伦河	雅鲁河	绰尔河	洮儿河
As	悬浮物	38.61	3.96	0.51	0.52	1.86
	水	74.56	2.99	7.35	6.95	15.27
Hg	悬浮物	0.103	0.010	0.003	0.003	0.005
	水	0.216	0.011	0.015	0.020	0.015
Cd	悬浮物	0.66	0.07	0.02	0.04	0.03
	水	0.13	0.01	0.01	0.02	0.03
Cr	悬浮物	288.23	20.08	5.03	6.25	12.65
	水	149.99	3.50	1217.94	126.93	21.55
Cu	悬浮物	138.01	9.61	2.56	3.45	4.79
	水	26.47	1.31	1.67	2.79	3.02
Pb	悬浮物	144.46	9.29	2.39	3.46	5.72
	水	7.89	0.67	0.95	0.97	0.61
Zn	悬浮物	416.79	33.43	10.44	10.82	20.23
	水	23.12	1.44	4.81	34.91	3.96
Ni	悬浮物	156.09	11.41	2.75	4.12	6.73
	水	68.19	12.68	97.72	20.20	5.10

单位:t.

4 结论

1)丰水期是嫩江流域内悬浮物样品迁移的主要季节,支流的汇入会影响嫩江干流悬浮物浓度.大安市生产生活对水体悬浮物浓度产生明显影响.不同河物质源区、植被覆盖、风化侵蚀程度、人类活动等条件的差别造成丰枯水期水体悬浮物浓度的差异.

2)嫩江干流丰水期样品中除 Hg 之外的重金属元素含量较枯水期高是一个普遍特征.嫩江干流水体悬浮物 Hg 元素枯水期明显高于丰水期,推测温度是嫩

江干流水体悬浮物 Hg 元素含量变化的主要控制因素.研究表明齐齐哈尔市的生产生活对嫩江水体悬浮物重金属含量影响不大.嫩江各支流水体悬浮物重金属富集种类存在明显差别,丰水期雅鲁河相对富集 Hg、Cd、Zn,洮儿河相对富集 As,绰尔河及阿伦河没有明显富集及贫化的重金属元素.

3)丰水期,齐齐哈尔市的生产生活提高了嫩江干流水体中 Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 元素的含量;雅鲁河、绰尔河两条之流的汇入提高了嫩江干流 Cr、Ni 元素的浓度,汇入前 Cr、Ni 元素含量分别是汇入后的 3.3、5.4倍.

4)汇总嫩江及其支流滤后水及悬浮物的重金属总输出通量发现,雅鲁河是向嫩江输入重金属 Cr、Ni 最多的支流,年输入通量分别为 1223、100.46 t;阿伦河是向嫩江输入重金属 Cd、Cu、Pb 最多的支流,年输入嫩江通量分别为 0.08、10.93、9.96 t;嫩江向松花江年输入重金属 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 通量分别为 113.7、0.32、0.79、438、164、152、440、224 t.

参考文献(References):

- [1]屈翠辉,郑建勋,杨绍晋,等.黄河、长江、珠江下游控制站悬浮物的化学成份及其制约因素的研究[J].科学通报,1984,29(17):1063-1066.
Qu C H, Zheng J Z, Yang S J, et al. Chemical composition of suspended matter and its restriction factors in control stations of the lower reaches of the Yellow River, the Yangtze River and the Pearl River[J]. Chinese Science Bulletin, 1984, 29(17): 1063-1066.
- [2]刘文,徐士进,杨杰东,等.金沙江河流悬浮物与沉积物的矿物学特征及其表生地球化学意义[J].矿物岩石地球化学通报,2007,26(2):164-169.
Liu W, Xu S J, Yang J D, et al. Mineralogical characteristics of suspended matters and sediments in the Jinshajiang River and their superficial geochemical significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(2): 164-169.
- [3]Zhou D M, Chen H M, Zheng C R. Heavy metals in water bodies purified by suspended substrate of rivers[J]. Journal of Environmental Sciences, 2002, 14(1): 44-48.
- [4]Woitke P, Wellnitz J, Helm D, et al. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube[J]. Chemosphere, 2003, 51(8): 633-642.
- [5]王文正,张经.欧洲罗纳河和中国几条主要河流悬浮物的矿物学组成分析[J].海洋与湖沼,1994,25(3):319-327.
Wang W Z, Zhang J. Analysis on the mineral compositions of suspended matter from Rhone and some main Chinese rivers [J].

- Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(3): 319-327.
- [6] 何江, 王新伟, 李朝生, 等. 黄河包头段水-沉积物系统中重金属的污染特征[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 53-57.
- He J, Wang X W, Li C S, et al. Pollution character of heavy metals in the water-sediment system from Baotou section of the Yellow River [J]. Acta scientiae Circumstantiae, 2003, 23(1): 53-57.
- [7] 张敏, 王德淑. 长江铜陵段表层水中重金属含量及存在形态分布研究[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(6): 61-64.
- Zhang M, Wang D S. Investigation on heavy metal elements distribution on surface water of Tongling section along the Yangtze River [J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(6): 61-64.
- [8] 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 570-578.
- Wang Z B, Yang S Y, Li P, et al. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 570-578.
- [9] Yang S Y, Jung H S, Choi M S, et al. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201(2): 407-419.
- [10] Zhang C S, Wang L J, Zhang S, et al. Geochemistry of rare earth elements in the mainstream of the Yangtze River, China[J]. Applied Geochemistry, 1998, 13(4): 451-462.
- [11] Dupré B, Gaillardet J, Rousseau D, et al. Major and trace elements of river-borne material: the Congo Basin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(8): 1301-1321.
- [12] Gaillardet J, Dupré B, Allègre C J. A global geochemical mass budget applied to the Congo basin rivers: erosion rates and continental crust composition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3469-3485.
- [13] Roy S, Gaillardet J, Allègre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France: anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(9): 1277-1292.
- [14] Singh P, Rajamani V. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: implication to source area weathering and sedimentary processes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(18): 3093-3108.
- [15] Sharma A, Rajamani V. Weathering of charnockites and sediment production in the catchment area of the Cauvery River, southern India[J]. Sedimentary Geology, 2001, 143(1/2): 169-184.
- [16] Vital H, Statterger K. Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River[J]. Chemical Geology, 2000, 168(1/2): 151-168.
- [17] 高建飞, 丁悌平, 田世洪, 等. 黄河水及其悬浮物硅同位素组成的变化特征及其地质环境意义[J]. 地质学报, 2011, 85(10): 1613-1628.
- Gao J F, Ding D P, Tian S H, et al. Silicon isotope compositions of suspended matter in the Yellow River, China, and its significance in geological environment [J]. Acta geologica sinica, 2011, 85(10): 1613-1628.
- [18] 刘飞, 成杭新, 杨柯, 等. 广州市土壤-大气界面 Hg 交换通量研究[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 331-338.
- Liu F, Cheng H X, Yang K, et al. Research of mercury exchange flux between soil and air in Guangzhou City [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(2): 331-338.
- [19] 齐齐哈尔市志编审委员会. 齐齐哈尔市志[M]. 合肥: 黄山书社, 1998: 171-173.
- Editorial Committee of Chronicle of Qiqihar City. Chronicle of Qiqihar City [M]. Hefei: Huangshan Publishing House, 1998: 171-173. (in Chinese)
- [20] 何宏平. 粘土矿物与金属离子作用研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 237-239.
- He H P. Study on the interaction between clay minerals and metal ions [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 237-239.
- [21] 何文光. 甘南县志[M]. 合肥: 黄山书社, 1992: 189-190.
- He W G. Chronicle of Gannan County [M]. Hefei: Huangshan Publishing House, 1992: 189-190. (in Chinese)
- [22] 金耀东. 兴安盟志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1997: 145-147.
- Jin Y D. Chronicle of Xing'an League [M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1997: 145-147. (in Chinese)
- [23] 吉林省地方志编纂委员会. 吉林省志·自然地理志[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1992: 321-323.
- Jilin Provincial Local Chronicles Compilation Committee. Chronicle of Jilin Province: Physical geography [M]. Changchun Jilin People's Publishing House, 1996: 321-323. (in Chinese)
- [24] 肇源县地方志编审委员会办公室. 肇源县志[M]. 肇源: 肇源县地方志编审委员会办公室, 1996: 165-167.
- Zhaoyuan County Local Chronicles Compilation Committee. Chronicles of Zhaoyuan County [M]. Zhaoyuan: Zhaoyuan County Local Chronicles Compilation Office, 1998: 165-167. (in Chinese)
- [25] 吴敦放, 鲁文毓. 铬在土壤-地下水系统中的污染研究[J]. 环境科学学报, 1991, 11(3): 276-283.
- Wu D A, Lu W Y. Study on the pollution of chromium in soil-groundwater system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1991, 11(3): 26-33.