

2009—2020 年淮河流域皖北 3 市氟化物变化研究

唐萍, 王欢, 耿天召\* (安徽省生态环境监测中心, 安徽合肥 230071)

**摘要** 采用单因子评价法和 Spearman 秩相关系数法研究 2009—2020 年淮河流域皖北 3 市氟化物变化特征。结果表明, 近 10 年淮河流域皖北 3 市主要断面氟化物均值超标, 超标率较高; 淮河流域皖北地区氟化物与氨氮、COD 和总磷均不存在显著相关性。淮河流域皖北地区氟化物超标, 主要因为区域土壤母质氟化物及碳酸钙含量高于全国平均水平, 区域地下水氟化物浓度本底值偏高, 气候因素致使该区域地下水中氟化物更容易富集以及地表水氟化物及高含氟地下水相关等。

**关键词** 淮河流域; 皖北 3 市; 氟化物; 变化

**中图分类号** X83 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)04-0059-06

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Change of Fluoride in Three Cities in Northern Anhui in Huaihe River Basin in 2009-2020

TANG Ping, WANG Huan, GENG Tian-zhao (Anhui Ecological Environment Monitoring Center, Hefei, Anhui 230071)

**Abstract** Single factor evaluation method and Spearman rank correlation coefficient method were used to study the variation characteristics of fluoride in Huaihe River Basin in 2009-2020. In recent ten years, the average of fluoride in the main sections of Huaihe River Basin in Northern Anhui exceeded the standard, the over standard rate was high, there was no significant correlation between fluoride and ammonia nitrogen, COD and total phosphorus in Huaihe River Basin. The main reasons for the excessive fluoride in Huaihe River Basin in Northern Anhui are that the contents of fluoride and calcium carbonate in soil are higher than the national average level, the background value of fluoride concentration in groundwater is higher, the fluoride concentration in groundwater is more easily enriched due to climate factors, and the fluoride in surface water and groundwater with high fluoride content are related.

**Key words** Huaihe River Basin; Three cities in Northern Anhui; Fluoride; Change

皖北 3 市(亳州、淮北和宿州)地处安徽省最北部, 与苏、鲁、豫 3 省交界, 总面积分别为 2 741、8 374 和 9 787 km<sup>2</sup>, 皖北 3 市均位于淮北平原, 沿线地质属于华北地层区、鲁西地层分区, 徐州-宿县小区。基岩主要有第四系寒武系、奥陶系、石炭系和二迭系等地层<sup>[1]</sup>。淮北平原土壤类型主要为钙质结核土及黄泛冲积形成的新近沉积粉土, 土壤母质均富含碳酸钙和氟。根据《安徽淮北平原土壤》<sup>[2]</sup>中土壤调查方法, 淮北平原土壤中氟含量明显偏高, 质量比平均值为 457 mg/kg(我国土壤中氟平均值为 440 mg/kg, 世界土壤中氟平均值为 200 mg/kg), 这为区内高氟水提供了物质来源, 该地区属于安徽省高氟地区。“十二五”和“十三五”以来, 氟化物仍是淮河流域地表水主要污染因子之一。

采用国家地表水环境监测网的监测数据, 对 2009—2020 年淮河流域地表水中氟化物浓度变化特征进行初步分析, 以期为淮河流域的水污染防治工作提供基础资料<sup>[3-5]</sup>。

1 材料与方法

**1.1 研究区域** 研究区域为淮河流域皖北 3 市, “十三五”期间, 生态环境部门在皖北 3 市 27 条河流上共布设省控以上监测断面 43 个, 其中一级支流 4 条、二级支流 17 条、三级支流 6 条。

研究时段为 2009 年 1 月—2020 年 9 月, 研究因子为氟化物, 研究河流为皖北 3 市涉及的河流。重点研究断面为涡河亳州、涡阳义门大桥、岳坊大桥和龙亢断面, 沱河后常桥和

芦岭桥断面, 西淝河利辛段断面, 淝河李大桥闸断面, 浍河东坪集断面, 王引河固口闸断面共 10 个断面。

**1.2 研究方法** 按照《地表水环境质量标准》(GB3828—2002) 和《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办[2011]22 号)的要求进行单因子评价, 采用时间序列法分析污染物浓度的时间变化规律, 采用 Spearman 秩相关系数法分析氟化物与其他主要污染物间的关系。

**1.3 数据来源** 采用国家地表水环境监测网中 2009 年 1 月—2020 年 9 月有连续月监测数据的监测断面进行分析研究。

2 结果与分析

**2.1 淮河流域皖北 3 市近 10 年氟化物变化** 根据 2009 年 1 月—2020 年 9 月的监测结果分析, 淮河流域皖北 3 市 43 个国家、省控断面中, 共有 20 个断面氟化物出现过超地表水Ⅲ类标准(以下简称“超标”), 其中 19 个断面氟化物 10 年均值超标, 涡河龙亢断面 10 年均值为 0.882 mg/L, 不超Ⅲ类标准(1.0 mg/L)。均值超标断面的氟化物均值为 1.006 ~ 1.282 mg/L, 月度监测中的超标率为 27.0%~95.7%(表 1)。

**2.2 重点断面氟化物**

**2.2.1 亳州市重点断面氟化物。**选取涡河亳州、涡阳义门大桥、岳坊大桥、龙亢断面以及西淝河利辛段断面 2009 年 1 月—2020 年 9 月年国家监测网氟化物监测数据进行分析研究。

由图 1 可知, 涡河亳州、涡阳义门大桥、岳坊大桥、龙亢 4 个断面均位于涡河上, 2009 年以来氟化物浓度均值分别为 1.101、1.065、1.071 和 0.882 mg/L, 月度监测的超标率分别为 71.6%、65.8%、65.8%和 11.1%。除龙亢断面氟化物浓度及超标率略低以外, 其他 3 个断面氟化物浓度和超标率基本相

**基金项目** 第二次全国污染源普查工业源普查报表制度及普查数据质量控制实施技术支持项目(22110399005)。

**作者简介** 唐萍(1980—), 女, 安徽枞阳人, 工程师, 硕士, 从事环境质量综合分析研究。\* 通信作者, 正高级工程师, 硕士, 从事环境质量监测研究。

**收稿日期** 2020-12-10

当。利辛段断面位于西淝河上,2009 年以来氟化物浓度均值 为 1.050 mg/L,月度监测的超标率为 27.0%。

表 1 2009 年 1 月—2020 年 9 月氟化物均值超标断面  
Table 1 Sections of fluoride exceeding the standard from 2009-01 to 2020-09

| 序号<br>No. | 水体名称<br>Water<br>name | 断面名称<br>Section<br>name | 出入境<br>Entry and exit | 所在地区<br>Region | 氟化物浓度<br>Fluoride concen-<br>tration//mg/L | 超标率<br>Exceeding<br>standard rate//% |
|-----------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1         | 涡河                    | 亳州                      | 境内                    | 亳州市            | 1.101                                      | 71.6                                 |
| 2         | 涡河                    | 涡阳义门大桥                  | 境内                    | 亳州市            | 1.065                                      | 65.8                                 |
| 3         | 涡河                    | 岳坊大桥                    | 境内                    | 亳州市            | 1.071                                      | 65.8                                 |
| 4         | 惠济河                   | 刘寨村后                    | 入境(豫—皖)               | 亳州市            | 1.086                                      | 80.3                                 |
| 5         | 西淝河                   | 利辛段                     | 境内                    | 亳州市            | 1.050                                      | 27.0                                 |
| 6         | 小洪河                   | 古井                      | 入境(豫—皖)               | 亳州市            | 1.282                                      | 91.5                                 |
| 7         | 包河                    | 颜集                      | 入境(豫—皖)               | 亳州市            | 1.142                                      | 68.4                                 |
| 8         | 武家河                   | 五马                      | 入境(豫—皖)               | 亳州市            | 1.181                                      | 77.8                                 |
| 9         | 赵王河                   | 十河                      | 入境(豫—皖)               | 亳州市            | 1.134                                      | 82.9                                 |
| 10        | 油河                    | 双沟                      | 入境(豫—皖)               | 亳州市            | 1.110                                      | 73.5                                 |
| 11        | 阜蒙新河                  | 辛集                      | 境内                    | 亳州市            | 1.155                                      | 77.8                                 |
| 12        | 涡河                    | 龙亢                      | 境内                    | 亳州市            | 0.882                                      | 11.1                                 |
| 13        | 沱河                    | 小王桥                     | 入境(豫—皖)               | 淮北市            | 1.171                                      | 87.9                                 |
| 14        | 沱河                    | 后常桥                     | 境内                    | 淮北市            | 1.133                                      | 83.7                                 |
| 15        | 浍河                    | 临涣集                     | 入境(豫—皖)               | 淮北市            | 1.215                                      | 95.7                                 |
| 16        | 王引河                   | 任圩孜桥                    | 入境(豫—皖)               | 淮北市            | 1.255                                      | 94.8                                 |
| 17        | 濉河                    | 李大桥闸                    | 境内                    | 淮北市            | 1.136                                      | 84.6                                 |
| 18        | 沱河                    | 芦岭桥                     | 境内                    | 宿州市            | 1.008                                      | 30.5                                 |
| 19        | 浍河                    | 东坪集                     | 境内                    | 宿州市            | 1.060                                      | 40.4                                 |
| 20        | 浍河                    | 湖沟                      | 境内                    | 宿州市            | 1.006                                      | 34.2                                 |

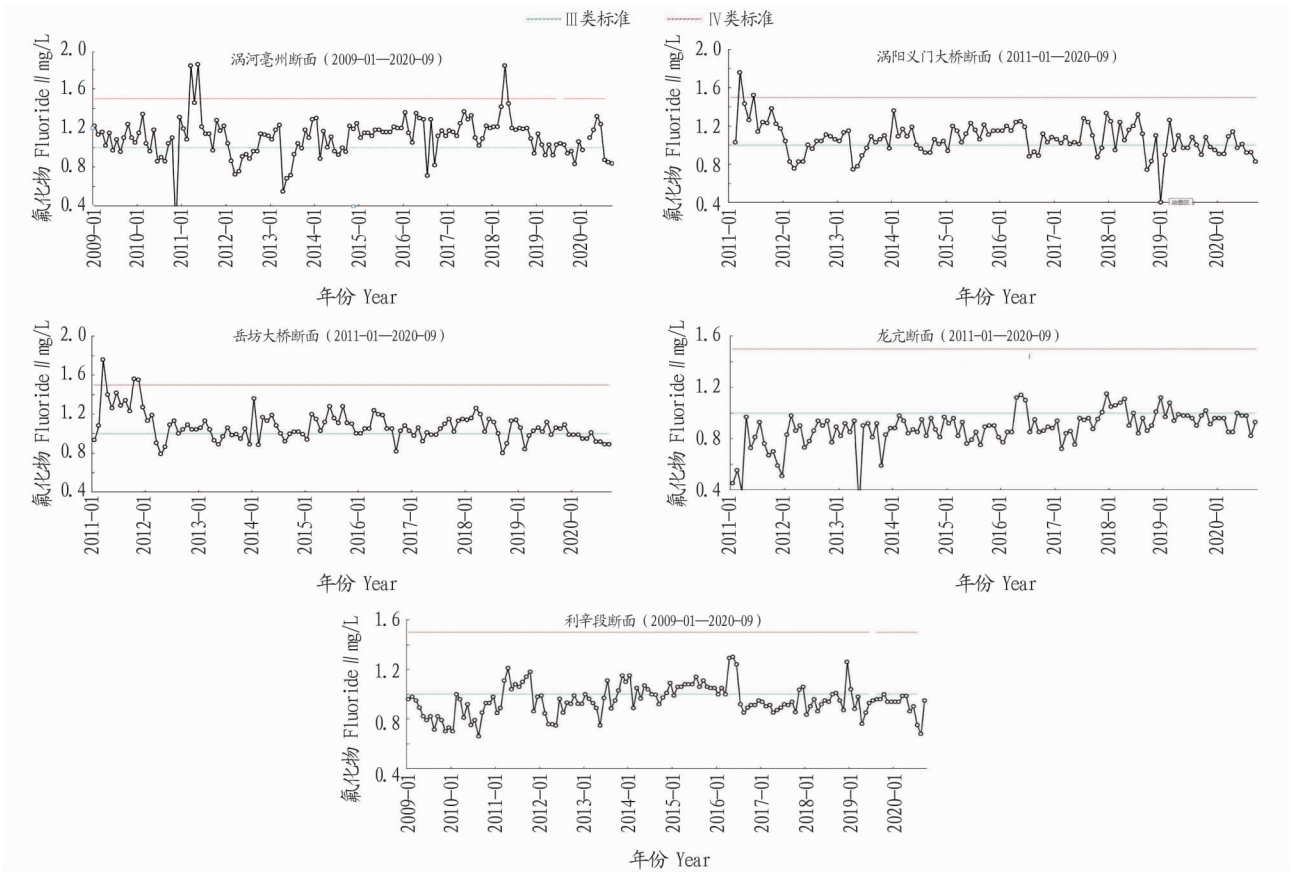


图 1 亳州市 5 个重点断面氟化物浓度  
Fig.1 Fluoride concentration in five key sections of Bozhou City

安徽省淮河流域除氟化物以外,主要污染指标为氨氮、COD 和总磷,分析各断面氟化物与其他水质指标间的相关性。由图 2 可知,涡河亳州、涡阳义门大桥、岳坊大桥、龙亢断面以及西淝河利辛段断面氟化物与氨氮、COD 和总磷均不

存在显著的相关性, $R^2$  均小于 0.10。由于上述氨氮、COD 和总磷 3 个指标均不同程度受到人为污染物排放的影响,该分析结果可间接说明氟化物与其他主要水质污染指标的污染来源不同,并非受人为污染源的影响。

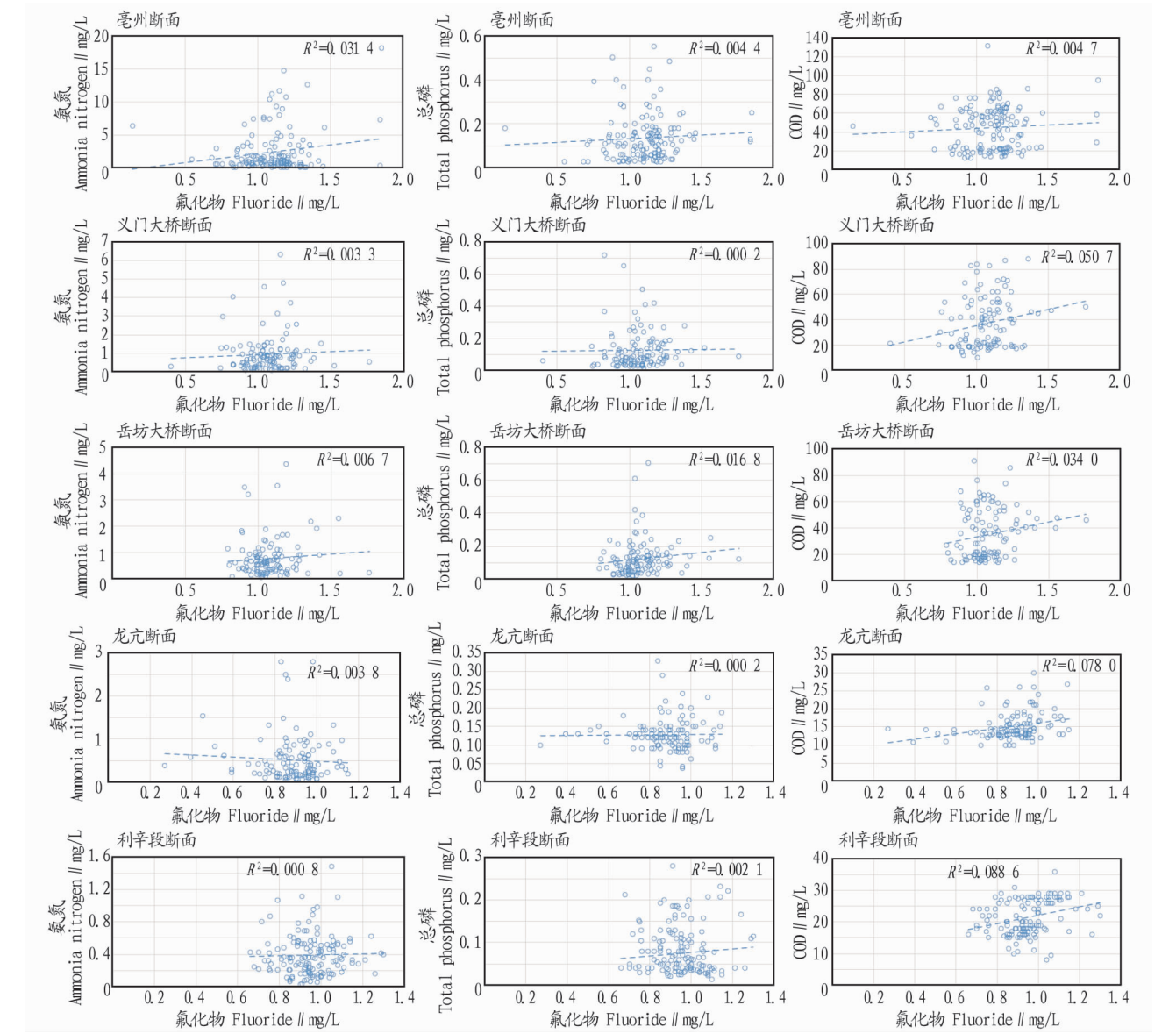


图 2 亳州市重点断面氟化物与其他水质指标的相关性

Fig.2 Correlation between fluoride and other water quality indexes in key sections of Bozhou City

2.2.2 淮北市重点断面氟化物。选取沱河后常桥、浍河东坪集和濉河李大桥闸断面 2009 年 1 月—2020 年 9 月国家监测网氟化物监测数据进行分析研究。

由图 3 可知,沱河后常桥 2009 年以来氟化物浓度均值为 1.133 mg/L,月度监测的超标率为 83.7%;浍河东坪集断面 2009 年以来氟化物浓度均值为 1.060 mg/L,月度监测的超标率为 40.4%;濉河李大桥闸断面 2011 年以来氟化物浓度均值为 1.136 mg/L,月度监测的超标率为 84.6%。

沱河后常桥、浍河东坪集和濉河李大桥闸断面氟化物与其他水质指标间的相关性分析见图 4,该断面氟化物与氨氮、COD 和总磷均不存在显著相关性, $R^2$  均小于 0.1,由于上述氨氮、COD 和总磷 3 个指标均不同程度受到人为污染物排放

的影响,该分析结果可间接说明淮北市氟化物与其他主要水质污染指标的污染来源不同,并非受人为污染源的影响。

2.2.3 宿州市重点断面氟化物。选取沱河芦岭桥断面和王引河固口断面 2009 年 1 月—2020 年 9 月国家监测网氟化物监测数据进行分析研究。

由图 5 可知,沱河芦岭桥 2009 年以来氟化物浓度均值为 1.008 mg/L,月度监测的超标率为 30.5%;王引河固口断面是“十四五”新增国考断面,位于王引河上,因而自 2020 年开始有国家采测分离监测数据,且由于疫情影响导致道路封堵,所以缺测了 2 月和 3 月的数据,如图 5 所示,该断面 2020 年 1—9 月氟化物浓度均值为 1.32 mg/L,范围 0.47~1.81 mg/L,超过地表水Ⅲ类标准 0.32 倍,超标率 71.0%。

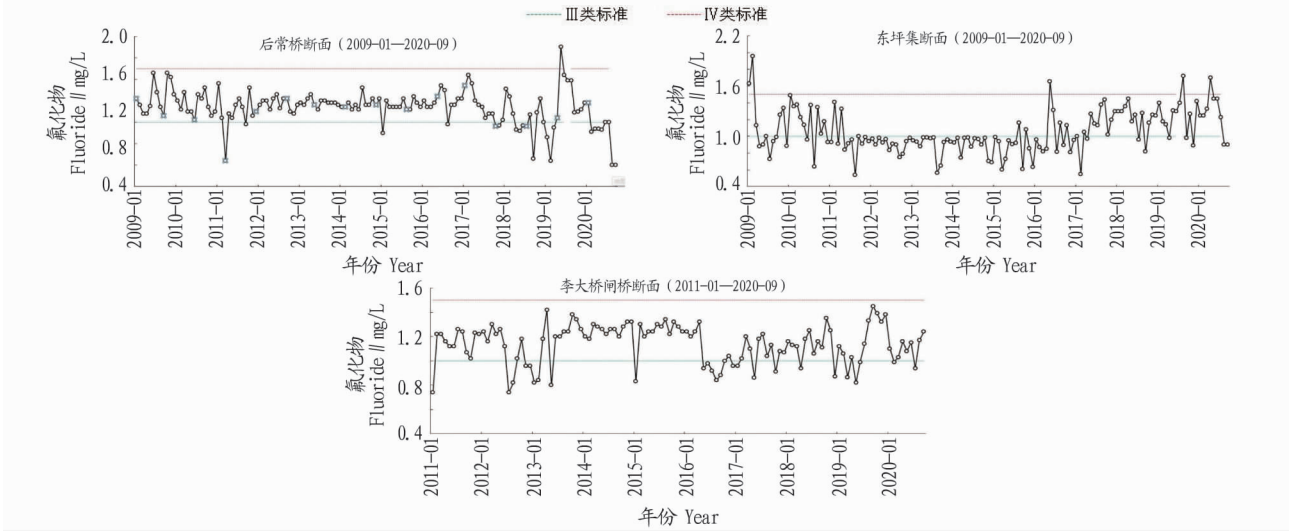


图3 淮北市3个重点断面氟化物浓度  
Fig.3 Fluoride concentration in three key sections of Huaibei City

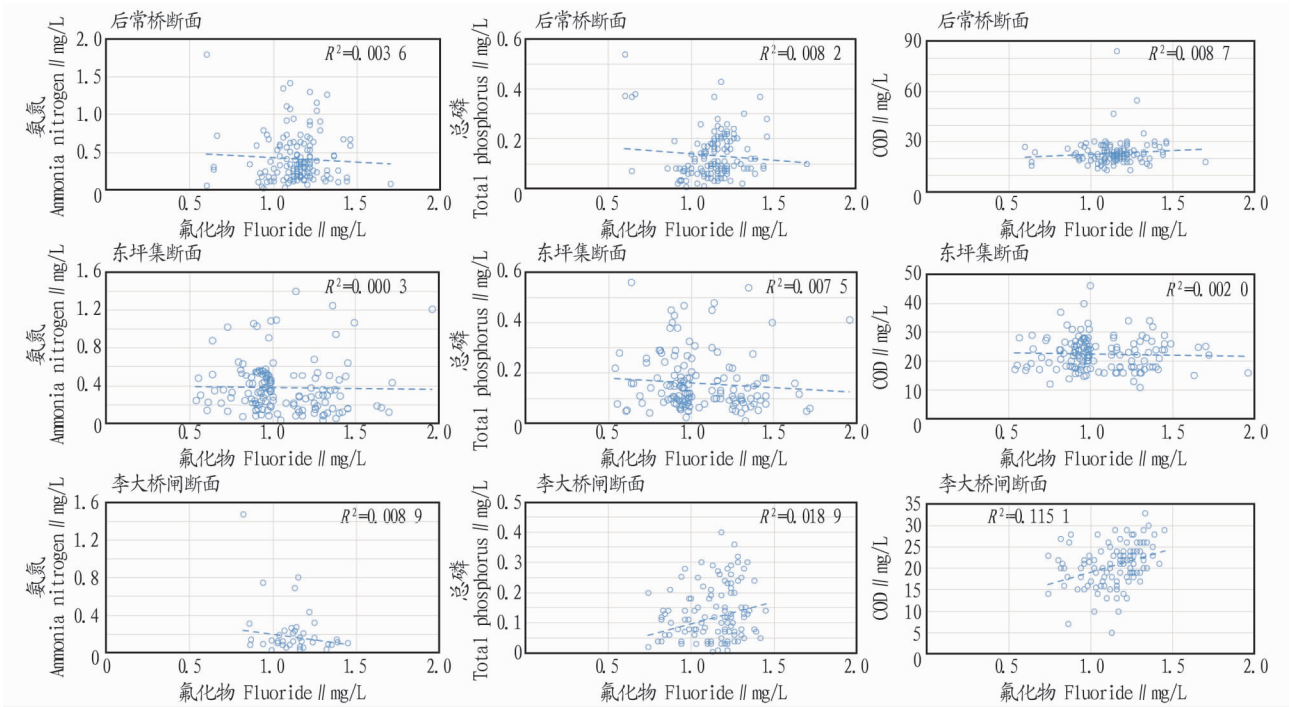


图4 淮北市重点断面氟化物与其他水质指标的相关性  
Fig.4 Correlation between fluoride and other water quality indexes in key sections of Huaibei City

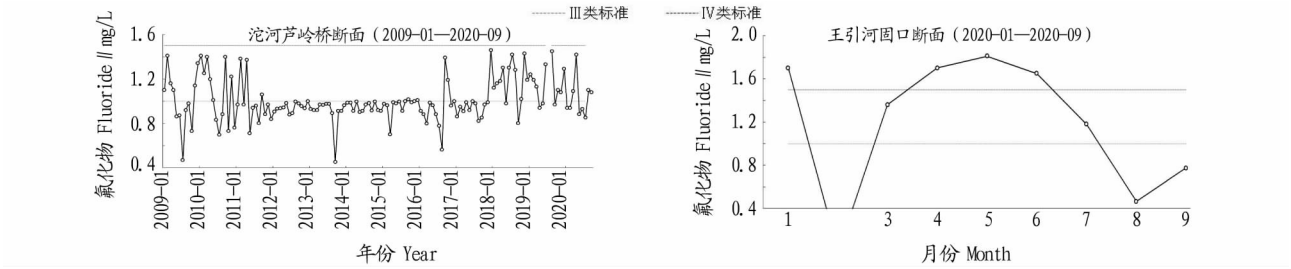


图5 宿州市2个重点断面氟化物浓度  
Fig.5 Fluoride concentration in two key sections of Suzhou City

由图6可知,沱河芦岭桥断面氟化物与氨氮、COD和总磷均不存在显著相关性, $R^2$ 均小于0.1,由于上述氨氮、COD和总磷3个指标均不同程度受到人为污染物排放的影响,该分析结果可间接说明淮北市氟化物与其他主要水质污染指

标的污染来源不同,并非受人为污染源的影响。

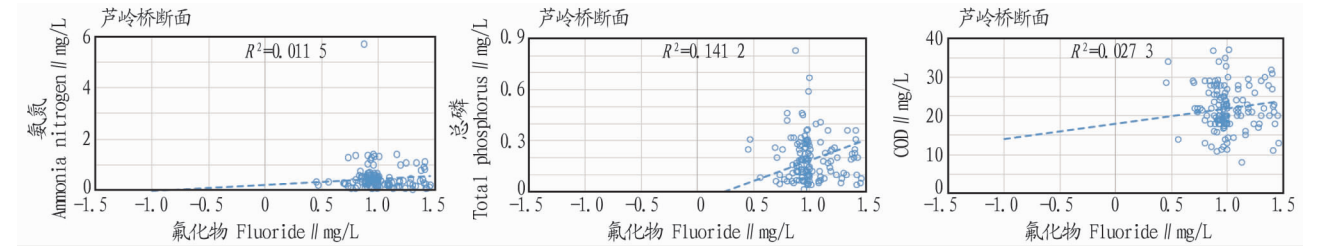


图 6 2009 年以来芦岭桥断面氟化物与其他水质指标的相关性

Fig.6 Correlation between fluoride and other water quality indexes in Luling Bridge section since 2009

3 原因分析

通过对淮河流域皖北地区亳州、淮北、宿州 3 市 10 余年地表水中氟化物浓度变化的研究,可以分析得出导致上述 3 市氟化物超标的主要原因。

3.1 区域土壤母质氟化物和碳酸钙的含量高于全国平均值 上述皖北地区 3 市均位于淮北平原,其地层基岩主要是第四系寒武系、奥陶系、石炭系和二迭系等,并且淮北平原地区土壤类型主要是钙质结核土以及黄河改道在此地区冲积形成的新近沉积粉土,土壤母质都含有较多的碳酸钙和氟化物<sup>[6]</sup>。土壤调查结果显示,淮北平原地区土壤中氟含量明显较高,质量比平均值为 457 mg/kg。而我国土壤中氟含量平均值为 440 mg/kg,世界土壤中氟含量平均值为 200 mg/kg。这为淮北地区上述 3 市的高氟水提供了物质来源。表 2 为淮北平原不同土层中氟的质量比。

表 2 淮北平原不同土层中氟的质量比

Table 2 Mass ratio of fluorine in different soil layers in Huaibei Plain

| 土层<br>Soil<br>layer                    | 全氟<br>质量比<br>Perflu-<br>orinated<br>mass ratio | 可溶氟<br>质量比<br>Soluble<br>fluorine<br>mass ratio |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 河湖相沉积物 Fluvial and lacustrine sediment | 453.7                                          | 9.05                                            |
| 黄泛沉积物 Huangfan sediment                | 412.6                                          | 8.12                                            |
| 淮泛沉积物 Huaifan sediment                 | 314.6                                          | 2.97                                            |
| 基岩风化物 Bedrock weathering               | 289.7                                          | 1.91                                            |

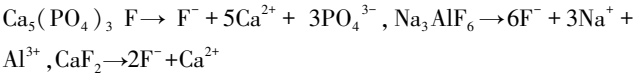
土壤中氟含量特别是水溶态氟含量与水中氟含量呈现正相关,碳酸钙的存在为氟的迁移和富集提供了有效载体。碳酸钙是一种强电解质,其在水中的水解反应方程式为:



碳酸钙在水解过程中产生的 OH<sup>-</sup>使地下水呈现出弱碱性,且碱性环境更有利于氟的富集,进一步加剧了这一趋势的产生。

3.2 区域地下水氟化物浓度本底值偏高 皖北平原地区基岩供水的主要层位是奥陶系灰岩。区域内的地下水类型可分为松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水两大类型。含水层组地壳中普遍含有较高含量的氟矿物,黏土矿物中富含高岭石、蒙脱石及水云母,砂层中含有云母、磷灰石、萤石及角闪石等矿物,它们在风化淋溶产污过程中,经过溶滤或水合作用转入地下水中,这成为天然水中氟的重要来源。主

要反应如下:



根据安徽省生态环境厅组织编写的《安徽省 2011—2015 地下水环境基础状况调查报告》结果显示,安徽省淮北平原浅层地下水的氟离子含量为 0.36 ~ 3.39 mg/L,均值为 1.06 mg/L,高于安徽省浅层孔隙水元素背景值的 0.14 ~ 1.42 mg/L。淮北平原是我国氟病发生地区之一,地下水中氟含量高于安徽省其他地区,地下水中氟含量总体上呈现自西北部高,向东南部低的渐变特征,浓度较高的区域主要集中在安徽省西北部的亳州市。

根据《“七五”安徽省土壤环境背景值调查研究分报告汇编》结果显示,pH 决定土壤中氟的活性,也影响土壤中的羟基释放量。在 pH 为 6.0 时,氧化铁的羟基释放量是 pH 为 7.5 时的 5 倍。pH 较低时,对氟的吸附能力强,酸性土壤对氟的吸附能力远大于碱性土壤。安徽省淮北平原土壤的 pH 一般处于 6.7~8.5,有利于氟可溶性盐的分离解析。在同一省份内,与皖南地区相比,淮北地区水溶性氟含量是其 3 倍左右。

皖北地区淮北平原的岩层含高氟矿物及地下水的弱碱性条件,给氟的迁移和在水中的富集创造了必要的外因条件,皖北地区地下水中氟离子浓度普遍较高<sup>[7-10]</sup>。

3.3 气候因素也使得淮北地区地下水中氟化物更容易富集 淮北平原地形平坦、变化不大,多年的平均水面蒸发量处于 1 200~1 500 mm,分布趋势为由西北向东南逐渐减少,降水量与蒸发量的分布趋势恰好相反,导致淮北地区的西北部地下水在含水层中长期滞留。由于地下水的低水头传导,地下水在风化含水层中的滞留时间进一步变长。这些自然条件促进了含氟矿物溶解,并促使风化产物中 F<sup>-</sup>和 OH<sup>-</sup>之间离子交换作用,致使地下水中 F<sup>-</sup>进一步富集。宿州、亳州、淮北 3 市位于淮北平原北部区域,气候因素导致地下水中氟化物更容易富集<sup>[11-12]</sup>。

结合淮北平原浅层水中氟的调查分析,浓度为 1.0~2.0 mg/L 高氟水主要与浅层地下水的蒸发浓缩有关;浓度大于 2.0 mg/L 的高氟水主要是地下水对含氟矿物的溶解所致<sup>[13]</sup>。

3.4 地表水氟化物和高含氟地下水的关系 研究表明,地表水与地下水有一定的水力联系。淮北平原地区土壤、地下水等含氟量均较高,土壤氟化物的淋溶风化及地下水侧向排泄等影响,都导致该地区地表水中氟化物本底浓度较高<sup>[14-15]</sup>。

## 4 结论

采用国家地表水环境质量监测网数据,对 2009 年 1 月—2020 年 9 月淮河流域皖北地区地表水中水污染指标氟化物浓度变化特征进行初步分析,可以得出以下主要结论。

(1)近 10 年来淮河流域皖北 3 市 43 个省控断面中,共有 20 个断面氟化物出现过超地表水Ⅲ类标准,其中 19 个断面氟化物近 10 年均值超标。均值超标断面的氟化物均值为 1.006~1.282 mg/L,月度监测的超标率为 27.0%~95.7%。

(2)亳州市淮河流域重点断面近 10 年氟化物浓度均值为 0.882~1.101 mg/L,月度监测的超标率为 11.1%~71.6%;淮北市淮河流域重点断面近 10 年氟化物浓度均值为 1.060~1.136 mg/L,月度监测的超标率为 40.4%~84.6%;宿州市淮河流域重点断面近 10 年氟化物浓度均值为 0.47~1.81 mg/L,月度监测的超标率为 30.5%~71.0%。

(3)安徽省淮河流域除氟化物以外,主要污染指标为氨氮、COD 和总磷,分析各断面氟化物与其他水质指标间的相关性,结果显示淮河流域皖北地区氟化物与氨氮、COD 和总磷均不存在显著相关性, $R^2$  均小于 0.1,由于上述 3 个指标均不同程度受到人为污染物排放的影响,该分析结果可间接说明淮北市氟化物与其他主要水质污染指标的污染来源不同,并非受人为污染源的影响。

(4)淮河流域皖北地区氟化物超标,主要因为区域土壤母质氟化物及碳酸钙含量高于全国平均水平,区域地下水氟

化物浓度本底值偏高,气候因素致使该区域地下水中氟化物更容易富集以及地表水氟化物及高含氟地下水相关等。

## 参考文献

- [1]《中国河湖大典》编纂委员会.中国河湖大典:淮河卷[M].北京:中国水利水电出版社,2010:1-4.
  - [2]张俊明,潘玉生.安徽淮北平原土壤[M].上海:上海人民出版社,1975.
  - [3]嵇晓燕,聂学军,李文攀,等.近十年淮河流域化学需氧量和氨氮浓度变化特征[J].节水灌溉,2016(12):85-88,93.
  - [4]陈善荣,何立环,林兰钰,等.近 40 年来长江干流水质变化研究[J].环境科学研究,2020,33(5):1119-1128.
  - [5]戴向前,刘昌明,李丽娟.我国农村饮水安全问题探讨与对策[J].地理学报,2007,62(9):907-916.
  - [6]樊远彬.安徽淮北芦岭镇地方性氟中毒氟源调查及分析[J].安徽预防医学杂志,2000,6(2):84-86.
  - [7]韩永忠.安徽省地方性氟中毒病区分布及外环境特征[J].安徽预防医学杂志,1995,1(1):25-28.
  - [8]李孝良,陈效民,孙莉,等.安徽省几种不同母质发育的稻田土壤氟含量及其影响因素[J].南京农业大学学报,2009,32(1):73-77.
  - [9]于群英,慈恩,杨林章.皖北地区土壤中不同形态氟含量及其影响因素[J].应用生态学报,2007,18(6):1333-1340.
  - [10]RIJSBERMAN M A, VAN DEVEN F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. Environmental impact assessment review, 2000, 20(3): 333-345.
  - [11]赵宏海,沈传连.宿州矿区浅层地下水中氟的分布及形成机理[J].中国煤田地质,1999,11(3):39-40.
  - [12]ZHAO R, HE H L, ZHANG N. Regional water footprint assessment: A case study of Leshan City[J]. Sustainability, 2015, 7(12): 16532-16547.
  - [13]郑路.安徽省长江以北地区土壤水溶性氟含量及分布特征[J].农村生态环境,1997,13(3):25-27,32.
  - [14]周道斌.宿县地区志[M].北京:中国人民大学出版社,1995.
  - [15]周世厥,张冬英,潘繁.安徽省土壤中氟分布的研究[J].农村生态环境,1999,15(4):34-36.
- (上接第 58 页)
- 影响,另一部分来自汽车轮胎的磨损<sup>[21]</sup>。而是由于 Fe、Al、Mn 为地壳组成元素,降尘中的 Fe、Al、Mn 主要由自然来源(土壤颗粒)贡献。洛川位于延安南部,距离西安、宝鸡、延安等省内一、二线城市较远,工业和交通业较之欠发达,空气污染较轻。但目前,对大气降尘中重金属最大允许浓度尚无统一评价标准。
- ## 3 结论
- (1)2017 年洛川年总降尘量为 58.1 t/(km<sup>2</sup>·a),月均值为 4.8 t/(km<sup>2</sup>·月),月最大值和最小值分别为 24.9 和 0.1 t/(km<sup>2</sup>·月)。洛川大气降尘量季节变化特征明显,春季>冬季>秋季>夏季,依次占年降尘量的 59.7%、27.5%、9.3%和 3.5%。
- (2)2017 年洛川降尘中可溶性盐分沉降总量为 24.548 kg/(hm<sup>2</sup>·a),沉降量从大到小分别为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、Ca、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、Mg、Na、K、S 和 P。降尘中 Fe、Al 及重金属 Cu、Mn、Pb、Zn 的含量平均值分别为 10.889、95.309、10.178、51.164、96.027 和 9.189 mg/kg,均较低。
- ## 参考文献
- [1]杨芸,阮丽,包跃跃,等.城市大气降尘污染研究进展[J].环境与可持续发展,2015,40(4):81-83.
  - [2]朱礼学.城市尘土地球化学调查的意义及构想[J].四川地质学报,2003,23(3):174-175.
  - [3]王明仕,李晗,王明娅,等.中国大气降尘地域性分布特征研究[J].生态环境学报,2014,23(12):1933-1937.
  - [4]张宁,张武平,张萌.沙尘暴降尘对甘肃大气环境背景值的影响研究[J].环境科学研究,2005,18(5):6-10.
  - [5]赖木收,杨忠芳,王洪翠,等.太原盆地农区大气降尘对土壤重金属元素累积的影响及其来源探讨[J].地质通报,2008,27(2):240-245.
  - [6]张春荣,吴正龙,姚春卉,等.青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J].环境科学,2014,35(7):2736-2741.
  - [7]罗莹华,戴塔根,梁凯.广东韶关市大气降尘及尘中金属元素分布特征研究[J].地质调查与研究,2006,29(1):64-68.
  - [8]李晋昌,康晓云,高楠,黄土高原东部大气降尘量的空间和季节变化[J].中国环境科学,2013,33(10):1729-1735.
  - [9]张宁,康颖琦,刘晓文,等.甘肃省大气自然降尘背景值的调查和研究[J].甘肃环境研究与监测,1999,12(2):69-74.
  - [10]屈建军,张伟民,王旭东.敦煌莫高窟大气降尘的初步观测研究[J].甘肃环境研究与监测,1992,5(3):8-12.
  - [11]裴玉芳,祁栋林,张启发.近 10 年来青海省河湟谷地大气降尘量的变化特征[J].青海环境,2017,27(2):69-72,88.
  - [12]高贵生,宋理明,马宗泰.青海省降尘时空分布及其影响因素分析[J].中国沙漠,2013,33(4):1124-1130.
  - [13]杜华,冯胜利.抚顺市大气降尘污染状况及变化趋势分析[J].辽宁城乡环境科技,2005,25(4):18-19.
  - [14]LI J C, DONG Z B, QIAN G Q, et al. Effects of geomorphic conditions, wind speed, and precipitation on dustfall over northern China[J]. Sciences in cold and arid regions, 2010, 2(4): 354-363.
  - [15]文倩,关欣,崔卫国.和田地区大气降尘对土壤作用的研究[J].干旱区研究,2002,19(3):1-5.
  - [16]关欣,李巧云,文倩,等.南疆西部降尘对土壤性质的影响[J].土壤,2000,32(4):178-182.
  - [17]赵妍,依艳丽,贾振文,等.沈阳市春季降尘中氮磷钾及有机碳含量研究[J].安徽农业科学,2007,35(10):3044-3045.
  - [18]李萍,薛粟尹,王胜利,等.兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价[J].环境科学,2014,35(3):1021-1028.
  - [19]HUANG S S, TU J, LIU H Y, et al. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze river Delta, East China[J]. Atmospheric environment, 2009, 43(36): 5781-5790.
  - [20]梅凡民,徐朝友,周亮.西安市公园大气降尘中 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd 的化学形态特征及其生物有效性[J].环境化学,2011,30(7):1284-1290.
  - [21]陶俊,陈刚才,赵琦,等.重庆市大气 TSP 中重金属分布特征[J].重庆环境科学,2003,25(12):15-16,19.