

两淮地区采煤沉陷区水体污染特征的研究进展

吴为, 卫洲, 李佳, 张万*

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年12月4日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月11日

摘要

采煤沉陷区是指地下煤炭被开采后, 采空区塌陷导致地面下沉, 积水后形成的特殊水域。这种封闭、半封闭的水域极易受到人类活动的影响, 导致周围环境中的污染物不断向采煤沉陷区内汇集, 造成采煤沉陷区水体的污染, 给周围环境和人类健康带来了一定的危害。为了了解采煤沉陷区水体的污染特征, 对两淮地区采煤沉陷区有机污染物, 氮磷, 重金属以及溶解性有机物的研究进展进行了综述, 对采煤沉陷区水体中的污染物进行了生态风险评价, 给沉陷区内污染物的治理提供了方向。

关键词

采煤沉陷区, 持久性有机污染物, 重金属, 氮磷, 溶解性有机物

Research Progress of Water Pollution Characteristics in Coal Mining Subsidence Area of Huainan, Huaibei

Wei Wu, Zhou Wei, Jia Li, Wan Zhang*

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Dec. 4th, 2022; accepted: Jan. 4th, 2023; published: Jan. 11th, 2023

Abstract

Coal mining subsidence area refers to the special water area formed by the ground subsidence caused by the collapse of gob after underground coal mining. The closed and semi-closed water area is easily affected by human activities, resulting in the pollution in the surrounding environment continuing to gather in the mining subsidence area, causing the water pollution in the min-

*通讯作者。

ing subsidence area, and bringing certain harm to the surrounding environment and human health. In order to understand the characteristics of water pollution in subsidence, the research progress of organic pollutants, nitrogen, phosphorus, heavy metals and dissolved organic matter in coal mining subsiding areas of Huainan and Huaibei area was reviewed, and the ecological risk assessment of pollutants in water in coal mining subsidence area is carried out, which provides a direction for the treatment of pollutants in the subsidence area.

Keywords

Coal Mining Subsidence Area, Persistent Organic Pollutants, Heavy Metal, Nitrogen and Phosphorus, Dissolved Organic Matter

Copyright © 2023 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

我国一直以来都是能源大国，煤炭作为主要的能源原料，使得我国的煤产量巨大，年产量超过 3.6×10^{10} t，从 21 世纪开始已是世界第一产煤大国[1]。煤炭资源的开发和使用，推动了我国经济的快速发展。同时，煤炭的开采给我国的地表环境也带来了巨大的破坏。井工开采是我国煤炭开采的主要方式，在煤炭资源被开采后，地底会形成较大范围的煤炭采空区。部分采空区塌陷会导致地面下沉，积水后形成“采煤沉陷区”。根据研究，我国采煤沉陷区面积预测将达到 60000 km^2 ，这会导致我国大量的土地将失去其原有的应用价值[2]。

除此之外，采煤沉陷区污染物赋存量偏高的现象屡见不鲜。Chen 等采集了徐州 6 个矿山共 26 个样品，发现矿井水、矿区煤和地下污泥中 16-PAHs 浓度平均值分别为 $0.82 \text{ } \mu\text{g/L}$ 、 $15.87 \text{ } \mu\text{g/L}$ 和 $10.63 \text{ } \mu\text{g/L}$ ，矿井水中多环芳烃普遍处于高危水平[3]。黄肖萌等对淮南谢桥矿采煤沉陷区土壤中的 Cd、Hg、Cr、Ni、Zn、Fe、Cu、Pb 这几种重金属进行研究，发现 Zn、Cd 的污染情况最为严重[4]。

淮南市位于安徽省中部，地处两淮地区，是我国重要的能源城市。其主要产出的能源就是煤炭资源。据统计，目前两淮地区因采煤而导致地面沉陷的面积已近 600 km^2 ，淮南地区的沉陷面积超过 300 km^2 [5]。淮南地区煤层厚度较大，地下水位埋藏浅，区域降水丰沛，地表水系发达。在地面塌陷后，由于地下水和雨水的补给，沉陷区形成了一个独立的，或相互连通的湖泊[6]。

根据沉陷区水域水环境特征，以及区域人为活动的影响，沉陷区水域承担着不同的生态功能，使其发挥出一定的生态价值[7] [8]。同时，由于人类活动的影响，导致采煤沉陷区周围的污染源增多。采煤沉陷区地势低洼，会导致周围环境中大量的污染物质不断向采煤沉陷区汇集，造成采煤沉陷区的污染[9]。本文内容是对两淮采煤沉陷区主要污染物的特性进行综述，包括持久性有机污染物、重金属污染物、氮磷以及溶解性有机质等。

2. 采煤沉陷区水体污染物

水体中主要污染物按照化学性质可分为有机污染物和无机污染物。其中有机污染物包括可生物降解和难生物降解污染物。可生物降解污染物降解过程消耗水中的溶解氧，引起水体缺氧及水生生物死亡，破坏水体功能，厌氧条件下有机物被微生物降解产生硫化氢、氨气、低级脂肪酸等有害或恶臭物质。难

生物降解污染物如农药、卤代烃、芳香族化合物等，一般毒性大、化学及生物稳定性强、易于在生物体内富集。而无机污染物包括氮、磷、非金属(如砷、氰等)、金属与重金属(如汞、镉、铬)。氮、磷是导致封闭性水体富营养化的主要物质。许多重金属对人体和水生生物有直接毒害作用。

2.1. 持久性有机污染物

POPs (Persistent organic pollutant, POPs)是指一类能在环境中长距离迁移富集，具有高毒性，生物积累性，半挥发性，对环境和人类带来严重危害的持久性有机污染物。其主要有四类：多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)、多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)、有机氯农药(Organochlorine pesticides, OCPs)、多溴联苯醚(Poly brominated diphenyl ethers, PBDEs) [10]。

淮南地区煤炭开采的主要方式是井工挖掘。由于煤层在含水层以下，煤炭开采过程中就会产生大量的矿井水[11]。矿井水中含有大量的 PAHs，这些矿井水会流入采煤沉陷区内，导致沉陷区水体受到污染[12]。邓诗慧等对淮南杨庄塌陷区中表层沉积物进行分析，发现两淮地区采煤沉陷区周围的矿井水，煤矸石山以及化石燃料的不完全燃烧是 POPs 的主要来源[13]。邱增羽等通过采集淮南杨庄采煤沉陷区 2014~2016 年水体、土壤以及底泥样品，分析整个沉陷区 PAHs 的时空分布特征，发现沉陷区周围土壤中存在一定浓度的 PAHs，这些 PAHs 主要来源于草木，煤等物质的燃烧[14]。Ouyang 等采集了淮南谢桥采煤沉陷区的土壤样本，使用气相色谱 - 质谱仪进行检测和分析，发现沉陷区的 PAHs 来自于混合污染，包括煤炭燃烧、交通污染以及石油的燃烧[15] [16]。在某些地区，人们使用煤矸石作为填充物，去充填采煤沉陷区[17]。这种方法在一定程度上能够恢复地表的形态。但在另一方面，由于处理不当，再加上雨水的淋溶作用，可能会导致煤矸石中的 PAHs 直接进入沉陷区内，造成沉陷区以及土壤的污染。

PCBs 是一类具有持久性、难降解性、脂溶性以及高毒性的持久性有机污染物。环境中 PCBs 主要来源包括增塑剂中挥发的 PCBs，废弃物的焚烧以及含有 PCBs 的工业容器的泄露[18]。PCBs 主要出现在工业副产品中[19] [20] [21]。Ouyang 等采集了淮南杨庄沉陷区水体，使用 GC-MS 进行分析和检测，发现淮南杨庄地区的采煤沉陷区中 PCBs 的来源包括大气传播源和非预期源[22]。PCBs 会汇集到土壤、河流和沉积物中。沉陷区地势低洼，周围土壤以及沉积物中的 PCBs 会随着雨水以及地表径流进入沉陷区水体中，最终导致沉陷区受到 PCBs 的污染。

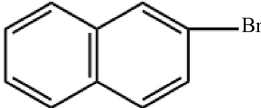
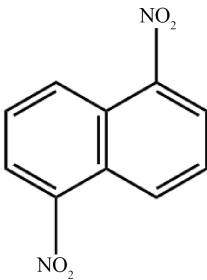
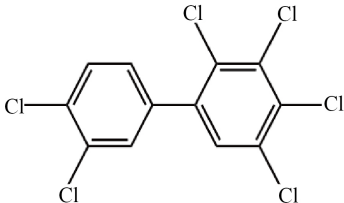
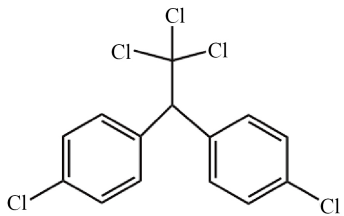
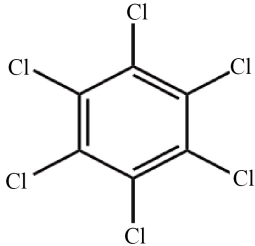
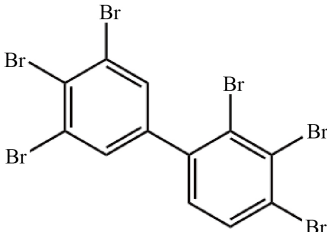
我国曾经大量使用 DDT、六氯苯、六六六等农药。使用这些农药在帮助农民去除害虫，增加农作物产量的同时，还导致我国的河水，土壤，大气以及动植物都受到了 OCPs 功能，形成特殊的沉陷区水生生态环境，在这个特殊的生态环境中，部分物质会释放 OCPs，导致水体受到一定程度的污染。

PBDEs 是一类含溴原子的芳香族化合物，由于其分子中溴原子数量和位置的不同，PBDEs 的同系物达到了 209 个[23] (如表 1)。研究表明，每年大约有 3.9%的物品会挥发五溴联苯醚进入环境中[24]。PBDEs 具有优秀的阻燃性能，被广泛应用于家具家电，纺织品以及电器电子产品中[25]。PBDEs 作为一种新型的持久性有机污染物，在水体，土壤，大气颗粒物以及人体中广泛存在[26]。杨雪等发现两淮地区的采煤沉陷区的 PBDEs 主要来源于沉陷区周围的生活与工业垃圾，其通过淋溶作用或地下水进入沉陷区水体[27]。陈泽秋等研究发现 PBDEs 进入大气的主要方式是垃圾燃烧，之后通过沉降进入沉陷区内[23]。

采煤沉陷区的 POPs 通过地表径流，大气沉降等方式进入沉陷区的水体中，造成水体的污染[28]。POPs 进入水体后，化学行为会受到多种因素的影响，如温度，浮游植物，腐殖质含量，微生物等[29] [30] [31]。当 POPs 进入水体当中，会被浮游植物大量吸收和吸附，随后随着浮游植物不断向水体底泥转移，使沉积物中 POPs 的浓度增加[29]。所以，水体中的底泥是 POPs 的主要富集场所。同时，腐殖质的含量与类型也影响着 POPs 的浓度[32]。水体中腐殖质含量增加，POPs 的浓度就会下降。

Table 1. Diagram of the main types of POPs and their molecular structures

表 1. POPs 主要类型及其分子结构图

序号	名称	类型	分子结构图	参考文献
1	2-溴萘	PAHs		[10]
2	1, 5-二硝基萘	PAHs		[10]
3	六氯联苯	PCBs		[20]
4	双对氯苯基三氯乙烷	OCPs		[14]
5	六氯苯	OCPs		[28]
6	多溴联苯	PBDEs		[29]

2.2. 氮磷

采煤沉陷区是由于采煤导致地面塌陷,引起地下水突出,从而形成一种特殊的水体[33] [34] [35]。地表沉陷后,由于地表径流和降雨的作用,使沉陷区周围农田中大量的氮磷营养物质进入沉陷区水体,导致水体中氮磷的含量不断增加,最终导致水体富营养化[36] [37]。水体富营养化是指水体受到大量氮磷等植物营养元素的污染,导致水体中藻类大量繁殖,鱼类大量死亡,水质不断恶化的一种水体污染现象。氮磷是造成水体富营养化的主要营养元素,也是导致湖泊水质恶化的主要元素[38]。它们通过各种途径进入沉陷区水体,大部分进入水体的沉积物中。在水体沉积物中,氮主要以有机氮和无机氮两种形式存在,无机氮又能分为可交换态氮和固定态氮[39]。其中,可交换态氮是能被植物直接吸收,进行光合作用的,主要是氨态氮和硝酸盐态氮两种形式[40]。有机氮是水体沉积物中氮素的主要形态,经过矿化后,转化为无机氮,从而被水生生物吸收。当水体中无机氮的含量较多时,就会使水生生物大量快速繁殖。生物的残体以及排泄物进入沉积物中,使得沉积物中有机质的含量增加,形成氮汇,这会对水体富营养化产生抑制作用[41]。

近年来,不断有学者对两淮地区采煤沉陷区的氮、磷营养盐进行研究。孟庆俊等对淮南潘北沉陷区的水体进行研究,发现,水体中的氮、磷浓度变化具有季节性规律[42]。谢凯等采用改进的 Pesner 分级提取方法,对淮南潘一矿沉积物中的磷的赋存特征进行研究分析,发现沉积物中的磷的形态多以无机态为主,并且自表层往下,磷的含量不断减少[43]。王婷婷、张维翔等研究了两淮采煤沉陷区水体中的氮磷限制因素,发现两淮采煤沉陷区大部分水体中,磷元素比氮元素少,水中藻类生长受到磷元素的限制[44] [45]。但是在部分水体中,氮元素比磷元素少,氮元素成为了藻类生长的限制因子[46]。

沉陷区的氮、磷污染分为外源污染和内源污染[47]。外源污染是指工业废水与生活污水引起的污染;内源污染是指塌陷区水体底泥中氮、磷等营养物质向水体中释放而引起的二次污染。刘响等研究发现,两淮沉陷区水体中氮、磷的外源污染与周围农田施肥有密切关系[48] [49]。沉陷水域周围大量的农业活动与渔业活动,使大量有机肥料、复合肥、尿素和养殖饲料中未被利用的氮,随着地表径流和地下径流进入沉陷区水体,导致沉陷区水体中氮含量增加[50]。同时,部分沉陷区水力交换条件差,加之夏季气温高,蒸发量大,致使农业面源污染等引起的氮浓度相应升高,难以扩散[51]。

内源污染是由于土地塌陷前多为农田,施肥等活动使土壤内累计了一定量的氮、磷元素。当塌陷土地被地下水淹没时,被淹没土壤中的氮、磷元素就会以内源的形式释放,从而导致水体的氮、磷负荷增加[52]。沉陷区的氮污染物多数以有机氮的形式存在,水生生物无法直接吸收,使得有机氮大多数进入水体沉积物中。在底栖生物扰动或者理化性质发生改变时,氮素就会从沉积物中释放出来,以满足水生生物的生长需要,将其吸收转化为有机氮。生物的排泄物以及死亡分解,使得氮元素重新返回水体或者沉积物中,实现了氮的循环,水体沉积物就成为了水体富营养化的内源[53]。

2.3. 重金属污染物

由于重金属在水体中具有难降解、易积累、毒性大等特性,使其成为了地表水体的重要污染物质之一[54]。水体中的重金属污染物部分以离子的形态存在,部分经物理化学沉淀后进入沉积物中[55]。不同的水环境中重金属离子的价态不同,其表现出的毒性也不同[56]。采煤沉陷区的重金属污染物主要来源于:煤炭开采时排放的大量粉尘,经过沉降而进入土壤中[57];煤矸石中的各种高浓度重金属,通过降雨淋溶的作用下而进入沉陷区内[58];煤炭开采时排放的酸性废水溶解周围矿石,并释放出大量金属元素,通过灌溉进入土壤中[59]。

大量的国内外学者对采煤沉陷区的重金属的含量以及分布特征进行了研究[60]-[68]。白建峰等从淮南矿区 7 条不同开采历史的矿井区,分别采集了煤矸石堆附近的土样,并使用电感耦合等离子体全谱直读

光谱仪(ICP-AES)对土壤主要有害物质进行分析,发现煤矸石的风化作用和淋滤作用会导致土壤中重金属的富集,最终这些重金属会随着地表径流进入沉陷区水体[69]。Li 等对淮北朱仙庄煤矿沉陷区水体中的重金属来源进行分析和健康风险评估,认为 Cr 是主要的致癌风险元素[70]。Zheng 等以淮北林还矿沉陷区作为研究矿区,使用氧同位素法追踪了河水和沉陷区水体中硫酸盐的来源,发现沉陷区水体中的硫酸盐主要来源于河水以及当地的采矿废水[71]。Liu 等对淮南潘集采煤沉陷区地表沉积物中的 Pb 污染情况进行了研究,研究认为:人为原因产生的 Pb 是地表沉积物的主要污染物,地表沉积物中的 Pb 主要来源于土壤,车辆尾气以及煤渣[72]。Sun 等收集了淮北地区海子煤矿周围大量的土样,分析了 Cu、Fe、Zn、Co、Ni、Mn 和 Pb 等重金属元素的浓度,发现除了 Fe、Co 和 Ni 之外,其余重金属元素均受到了多种因素的影响[73]。此外,还有其他学者发现农药,化肥,除草剂的大量使用,也使得沉陷区周围农田中重金属的含量超标最后通过地表径流或地下水进入沉陷区水体[74] [75]。

采煤沉陷区水体与土壤中的重金属离子会在不同的环境因素影响下发生不同的化学变化。如无机汞在微生物的作用下会发生甲基化,形成甲基汞或者二甲基汞[76]。在不同的酸碱条件下,甲基汞和二甲基汞也可以相互转化,表现出更高的毒性[77]。所以,沉陷区的环境不同,会使重金属离子表现出不同的特性,对环境以及人体的危害也不同。同时,重金属在沉陷区土壤、水体以及生物中会不断积累,导致其浓度数倍于环境背景值,对人类以及周围环境造成伤害和影响[78] [79]。

2.4. 溶解性有机质

溶解性有机物(Dissolved Organic Matter, DOM)是一种脂肪族和芳香族的有机化合物,其粒径一般小于 0.45 μm 。DOM 在环境中广泛存在,一般来自于植物的凋零分解,以及土壤中的腐殖质。水体中的 DOM 主要由腐殖质和非腐殖质两部分构成。腐殖质是指有机物被微生物分解而形成的物质,主要包括胡敏酸和富里酸;非腐殖质主要指碳水化合物、氨基酸、蛋白质等小分子有机物[80] [81]。DOM 对于水体的理化性质具有重要的作用,能够影响水体的酸碱平衡。同时,水体中的 DOM 含有羟基,羧基等官能团,能够与不同的有机污染物结合,从而影响有机污染物的生物有效性。

目前,国内外学者主要利用荧光光谱技术对水体中的 DOM 进行了大量研究。主要以地下水、湖泊、河流、海洋等水体为研究对象,探究水体中 DOM 的主要组分[82] [83] [84] [85] [86]。对于采煤沉陷区水体内 DOM 的研究,主要集中于:冯启言等通过荧光滴定实验,研究了矿井水和生活污水中 DOM 对铜的结合性,发现淮南矿区矿井水中溶解性有机质以腐殖酸为主[87]。张彦等研究发现 DOM 能加快 Cu 的迁移速度,并能改变 Cu 的化学形态,使沉陷区内的 Cu 表现出不同的价态和毒性[88]。韩佳明等对煤矿地下水库 DOM 来源进行解析,发现 DOM 的来源表现为内源、陆源输入共同作用,以内源输入为主[89]。周学年等利用三维荧光光谱对淮南新集矿区地下水 DOM 特征进行分析,发现地表水中的有机质含量最高,极有可能来自于地表污染源[90]。孟庆俊等使用三维荧光光谱仪分析了褐煤、烟煤和无烟煤中的 DOM 的荧光光谱特征,发现低阶煤中腐殖酸含量更高,褐煤中 DOM 的种类比烟煤和无烟煤更丰富[91]。赵丽等通过淋滤实验,研究室温条件下煤矸石中 DOM 溶出的动力学变化,证实煤矸石中的 DOM 主要是以微生物源有机质为主,且和细菌的活动密切相关[92]。

3. 结论

通过对采煤沉陷区水体中污染物特征现有研究的总结,可以将污染物主要来源归结为以下几个方面:采煤沉陷区靠近矿区,煤矸石、矿井水等物质释放出来的污染物是采煤沉陷区污染物的主要来源;在地面沉陷前土壤内残留大量的化肥,农药等释放出大量的氮磷等物质,形成内部污染源;部分采煤沉陷区水体承担着一定的生态功能,如灌溉、养殖、工业、渔业等,这些人类活动产生的生活、工业垃圾会释

放出大量的污染物质，最终进入沉陷区水体内，导致采煤沉陷区水体受到污染。

4. 展望

为了更好地治理采煤沉陷区水体内的污染物，改善沉陷区水体水质，保护周围居民身体健康，未来可以从以下几个方面对沉陷区内的污染物进行治理：

1) 对采矿过程中产生的煤矸石、矿井水等进行预处理，减少污染物质向环境中的排放。

2) 对沉陷面积较小的沉陷区域，可以人工挖掘底泥沉积物，进行水体深层曝气；对于沉陷面积较大的沉陷区，可以向水体中加入石灰等物质，将水体中的磷酸盐转化为难溶的沉淀物。

3) 使用新型的监测技术对沉陷区内的污染物进行监测，确保污染物的浓度水平保持在一定的范围；对沉陷区内的污染物进行生态风险评价，保证周围居民的身体健

康。采煤沉陷区内也可能受到其他污染物质的污染，例如人类活动产生的塑料垃圾进入沉陷区内，在一些环境因素影响下，发生老化破碎，形成微塑料(MPs, Microplastics)，这些微塑料可能会与其他污染物质发生理化反应，在环境中释放出更大的毒性，对环境造成更大的危害，也可能会不断在生物体内聚集，并在食物链内传递，最终危害人类的健康。所以要对沉陷区内存在的其他污染物进行更加深入地研究。

项目基金

安徽自然科学基金(1808085ME139)；2020年度高校优秀人才支持计划项目(gxyq2020012)。

参考文献

- [1] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
- [2] 李佳泓, 余建辉, 张文忠. 中国采煤沉陷区空间格局与治理模式[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 867-880.
- [3] Chen, D., Feng, Q., Liang, H., *et al.* (2019) Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Underground Coal Mining Environment of Xuzhou. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25, 1564-1578. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1489715>
- [4] 黄肖萌. 采煤沉陷区水域环境 OCPs 多介质归趋模型研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [5] 徐翀. 两淮煤矿沉陷区生态环境综合治理关键技术的集成与示范[C]//第四届中国矿区土地复垦与生态修复研讨会论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2015: 9.
- [6] 孙鹏飞, 易齐涛, 许光泉. 两淮采煤沉陷积水区水体水化学特征及影响因素[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1345-1353.
- [7] 李兵, 陈晨, 安世凯, 等. 淮南潘谢采煤沉陷区水生态环境评价与功能区划[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(3): 15-20.
- [8] 李慧, 易齐涛, 章磊, 等. 采煤沉陷区农田-水域生态系统变化前后服务价值评估[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S1): 354-361+404.
- [9] 吕影. 张集矿采煤沉陷区环境质量问题及其重建对策[J]. 绿色科技, 2014(7): 222-223.
- [10] 谢武明, 胡勇有, 刘焕彬, 等. 持久性有机污染物(POPs)的环境问题与研究进展[J]. 中国环境监测, 2004, 20(2): 58-61.
- [11] Guo, L., Zhang, L., Hu, C., *et al.* (2014) Status Analysis and Measures Taken for Mine Water Management in China. *Journal of China Coal Society*, 39, 484-489.
- [12] 郝春明, 黄越, 黄玲, 等. 废弃煤矿矿井水中多环芳烃菲分布特征和来源解析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 99-103.
- [13] 邓诗慧. 采煤沉陷区沉积物 POPs 组成特征及源解析——以潘集杨庄塌陷区为例[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [14] 邱增羽. 采煤沉陷区持久性有机污染物时空分布规律研究——以 PAHs 为例[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [15] Ouyang, Z., Gao, L. and Yang, C. (2018) Distribution, Sources and Influence Factors of Polycyclic Aromatic Hydro-

- carbon at Different Depths of the Soil and Sediments of Two Typical Coal Mining Subsidence Areas in Huainan, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **163**, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.024>
- [16] Ouyang, Z., Gao, L., Chen, X., *et al.* (2016) Distribution, Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Coal Mining Subsidence Waters. *RSC Advances*, **6**, 71441-71449. <https://doi.org/10.1039/C6RA11286B>
- [17] 徐良骥, 黄璨, 朱小美, 等. 一种基于煤矸石的采煤沉陷区充填复垦方法[P]. 中国, CN105165164A. 2015-10-13.
- [18] 聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 等. 松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3434-3442.
- [19] 李娜. 多氯联苯在水生食物链中的生物毒性及富集效应研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2012.
- [20] 史永富. 多氯联苯在生物体内羟基化代谢研究及其代谢产物毒理探索[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [21] 曹先仲, 陈花果, 申松梅, 等. 多氯联苯的性质及其对环境的危害[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(5): 375-381.
- [22] Ouyang, Z., Gao, L. and Yao, S. (2019) Concentrations, Possible Sources and Influence Factors of Dissolved Polychlorinated Biphenyls in the Water of Yangzhuang Coal Mining Subsidence Area, China. *Water Resources*, **46**, 278-285. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020192>
- [23] 陈泽秋, 陈家长, 孟顺龙. 多溴联苯醚在环境中的污染现状与毒理效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(31): 91-98.
- [24] 王志增. 河口水环境中多溴联苯醚(PBDEs)生态风险评价研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [25] 薛铮然, 李海静. 高效溴系阻燃剂十溴联苯醚生产工艺研究[J]. 山东化工, 2002(4): 31-32.
- [26] 张娴, 高亚杰, 颜昌宙. 多溴联苯醚在环境中迁移转化的研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 761-770.
- [27] 杨雪, 穆肃, 陈素兰. 多溴联苯醚的环境归趋研究[J]. 安徽农业科学, 2014(34): 12256-12257.
- [28] 胡晴晖. 湄洲湾水体中持久性有机污染物的污染特征与风险评估[J]. 中国环境科学, 2014(10): 2536-2544.
- [29] Larsson, P., Collvin, L., Okla, L., *et al.* (1992) Lake Productivity and Water Chemistry as Governors of the Uptake of Persistent Pollutants in Fish. *Environmental Science & Technology*, **26**, 346-352. <https://doi.org/10.1021/es00026a016>
- [30] Dachs, J., Eisenreich, S.J., Baker, J.E., *et al.* (1999) Coupling of Phytoplankton Uptake and Air-Water Exchange of Persistent Organic Pollutants. *Environmental Science & Technology*, **33**, 3653-3660. <https://doi.org/10.1021/es990168o>
- [31] Dachs, J., Eisenreich, S.J. and Hoff, R.M. (2000) Influence of Eutrophication on Air-Water Exchange, Vertical Fluxes, and Phytoplankton Concentrations of Persistent Organic Pollutants. *Environmental Science & Technology*, **34**, 1095-1102. <https://doi.org/10.1021/es990759e>
- [32] Carter, C.W. and Suffet, I.H. (1982) Binding of DDT to Dissolved Humic Materials. *Environmental Science & Technology*, **16**, 735-740. <https://doi.org/10.1021/es00105a003>
- [33] 张发旺, 赵红梅, 宋亚新, 等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 521-527.
- [34] 张锦瑞, 陈娟浓, 岳志新, 等. 采煤塌陷引起的地质环境问题及其治理[J]. 中国水土保持, 2007(4): 37-39.
- [35] 吴德富, 王本敏. 采煤塌陷区环境整治与矿区可持续发展[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(5): 177-178.
- [36] 陈晓晴, 高良敏, 卓利玲. 谢桥采煤塌陷水域氮、磷时空分布特征[J]. 环境化学, 2013(3): 446-450.
- [37] 王振红, 桂和荣, 方文惠, 等. 夏季采煤塌陷塘水质影响因素分析[J]. 能源环境保护, 2005, 19(3): 61-64.
- [38] Torre, M., Rebillard, J., Ayphassorho, H., *et al.* (1992) *In Situ* Assessment of Denitrification in Running Waters: Example of the Charente River (Etude experimentale de denitrification *in Situ* en eaux courantes: Application a la riviere Charente). *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology*, **28**, 263-271. <https://doi.org/10.1051/limn/1992023>
- [39] 何清溪, 张穗, 方正信, 等. 大亚湾沉积物中氮和磷的地球化学形态分配特征[J]. 热带海洋, 1992(2): 38-45.
- [40] 王雨春, 万国江, 黄荣贵, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 301-309.
- [41] Berelson, W.M. (2001) The Flux of Particulate Organic Carbon into the Ocean Interior: A Comparison of Four US JGOFS Regional Studies. *Oceanography*, **14**, 59-67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.07>
- [42] 刘思, 孟庆俊. 淮南潘北矿塌陷湿地土壤退化评价[J]. 中国环境监测, 2011, 27(5): 6-10.
- [43] 谢凯, 张雁秋, 易齐涛, 等. 淮南潘一矿塌陷水域沉积物中磷的赋存和迁移转化特征[J]. 中国环境科学, 2012,

- 32(10): 1867-1874.
- [44] 王婷婷, 易齐涛, 胡友彪, 等. 两淮采煤沉陷区水域水体富营养化及氮、磷限制模拟实验[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 916-926.
- [45] 张维翔, 姜春露, 郑刘根, 等. 淮南采煤沉陷区积水中氮、磷分布特征及变化趋势[J]. 环境工程, 2019, 37(9): 62-67+73.
- [46] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1676-1683.
- [47] 卓利玲. 采煤塌陷区水体底泥中氮磷赋存形态与释放特征研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [48] 刘响响, 程桦, 郑刘根, 等. 淮南采煤沉陷区水体中氮磷的分布特征及环境意义[J]. 中国科学技术大学学报, 2014(11): 926-932.
- [49] 程丽巍, 许海, 陈铭达, 等. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展[J]. 环境保护科学, 2007, 33(1): 18-21,38.
- [50] Foy, R. and Rosell, R. (1991) Loadings of Nitrogen and Phosphorus from a Northern Ireland Fish Farm. *Aquaculture*, **96**, 17-30. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90136-U](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90136-U)
- [51] 谷得明, 严家平, 范廷玉, 等. 淮南潘集采煤沉陷积水区渔业水环境评价[J]. 环境工程, 2014, 32(9): 134-138.
- [52] 孟庆俊. 采煤塌陷地氮磷流失规律研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [53] 王少梅. 武汉东湖沉积物中氮和磷释放试验[J]. 水生生物学报, 1991, 15(4): 379-380.
- [54] Gao, X. and Chen, C.-T.A. (2012) Heavy Metal Pollution Status in Surface Sediments of the Coastal Bohai Bay. *Water Research*, **46**, 1901-1911. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.007>
- [55] 周建民, 党志, 蔡美芳, 等. 大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 5-10.
- [56] 杨碧莹, 杨金香, 杨阳, 等. 巢湖水体中重金属污染特征及评价[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2020, 40(5): 64-69.
- [57] 王旭琴, 李立军. 煤矿区周边土壤重金属污染研究进展[J]. 环境与发展, 2014, 26(4): 49-51.
- [58] 王丽, 王力, 和文祥, 等. 神木煤矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8): 1343-1347.
- [59] 申万墩, 吴永贵, 黄波平, 等. 贵州兴仁废弃煤矿区表层土壤重金属污染及其土壤酶活性[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(3): 111-116.
- [60] Dang, Z., Liu, C. and Haigh, M.J. (2002) Mobility of Heavy Metals Associated with the Natural Weathering of Coal Mine Spoils. *Environmental Pollution*, **118**, 419-426. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00285-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00285-8)
- [61] Pietrzykowski, M., Socha, J. and Van Doorn, N.S. (2014) Linking Heavy Metal Bioavailability (Cd, Cu, Zn and Pb) in Scots Pine Needles to Soil Properties in Reclaimed Mine Areas. *Science of the Total Environment*, **470**, 501-510. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.008>
- [62] Samecka-Cymerman, A. and Kempers, A. (2001) Concentrations of Heavy Metals and Plant Nutrients in Water, Sediments and Aquatic Macrophytes of Anthropogenic Lakes (Former Open Cut Brown Coal Mines) Differing in Stage of Acidification. *Science of the Total Environment*, **281**, 87-98. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00838-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00838-5)
- [63] Fang, T., Liu, G., Zhou, C., et al. (2014) Distribution and Assessment of Pb in the Supergene Environment of the Huainan Coal Mining Area, Anhui, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **186**, 4753-4765. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3735-4>
- [64] Shi, G.L., Lou, L.Q., Zhang, S., et al. (2013) Arsenic, Copper, and Zinc Contamination in Soil and Wheat during Coal Mining, with Assessment of Health Risks for the Inhabitants of Huaibei, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **20**, 8435-8445. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1842-3>
- [65] Tozsın, G. (2014) Hazardous Elements in Soil and Coal from the Oltu Coal Mine District, Turkey. *International Journal of Coal Geology*, **131**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.05.011>
- [66] Bhuiyan, M.A., Parvez, L., Islam, M., et al. (2010) Heavy Metal Pollution of Coal Mine-Affected Agricultural Soils in the Northern Part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, **173**, 384-392. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.085>
- [67] Lattuada, R., Menezes, C., Pavei, P., et al. (2009) Determination of Metals by Total Reflection X-Ray Fluorescence and Evaluation of Toxicity of a River Impacted by Coal Mining in the South of Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, **163**, 531-537. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.003>
- [68] Strömberg, B. and Banwart, S. (1994) Kinetic Modelling of Geochemical Processes at the Aitik Mining Waste Rock Site in Northern Sweden. *Applied Geochemistry*, **9**, 583-595. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(94)90020-5)
- [69] 白建峰, 史永红, 崔龙鹏, 等. 煤矸石堆积对矿区土壤中重金属的影响[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),

- 2004, 24(z1): 10-15.
- [70] Li, J., Gui, H., Hu, R., *et al.* (2020) Analysis of Heavy Metal Sources and Health Risk Assessment of Typical Coal Mine Collapsed Lakes in Huaibei Coalfield, Anhui Province, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, **29**, 3193-3202. <https://doi.org/10.15244/pjoes/114062>
- [71] Zheng, L., Liu, X., Tang, Q., *et al.* (2019) Lead Pollution and Isotope Tracing of Surface Sediments in the Huainan Panji Coal Mining Subsidence Area, Anhui, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **103**, 10-15. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02558-5>
- [72] Liu, H., Zhang, M., Su, L., *et al.* (2021) A Boundary Model of Terrain Reconstruction in a Coal-Mining Subsidence Waterlogged Area. *Environmental Earth Sciences*, **80**, 187. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09508-7>
- [73] Sun, L.H. and Feng, S.B. (2019) Heavy Metals in the Surface Soil around a Coalmine: Pollution Assessment and Source Identification. *Polish Journal of Environmental Studies*, **28**, 2717-2724. <https://doi.org/10.15244/pjoes/94052>
- [74] 冯春婷. 典型煤炭型城市重金属污染特征和健康风险评价[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [75] 欧金萍, 郑刘根, 陈永春, 等. 顾桥采煤沉陷积水区重金属分布与迁移特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(4): 785-792.
- [76] 胡金鑫. 采煤沉陷区土壤中汞的甲基化及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [77] 戴前进, 冯新斌, 唐桂萍. 土壤汞的地球化学行为及其污染的防治对策[J]. 地质地球化学, 2002, 30(4): 75-79.
- [78] 杨涛, 陈欣悦, 刘旭, 等. 淮南潘集采煤沉陷区土壤及煤矸石镉环境地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(S1): 1-5.
- [79] 刘诗敏, 高良敏, 邱增羽, 等. 淮南部分采煤沉陷复垦区土地中植物重金属的富集特征比较研究[J]. 山东工业技术, 2017(2): 80-81.
- [80] Liu, H., Hu, Z., Zhang, J., *et al.* (2016) Optimizations on Supply and Distribution of Dissolved Oxygen in Constructed Wetlands: A Review. *Bioresource Technology*, **214**, 797-805. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.003>
- [81] Li, Y., Wang, S. and Zhang, L. (2015) Composition, Source Characteristic and Indication of Eutrophication of Dissolved Organic Matter in the Sediments of Erhai Lake. *Environmental Earth Sciences*, **74**, 3739-3751. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3964-4>
- [82] Lee, S.-A. and Kim, G. (2018) Sources, Fluxes, and Behaviors of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Nakdong River Estuary, Korea. *Biogeosciences*, **15**, 1115-1122. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1115-2018>
- [83] He, X.-S., Zhang, H., Huang, C.-H., *et al.* (2016) Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause. *Environmental Science*, **37**, 3813-3820.
- [84] Liu, S., Zhao, T., Zhu, Y., *et al.* (2018) Molecular Characterization of Macrophyte-Derived Dissolved Organic Matters and Their Implications for Lakes. *Science of the Total Environment*, **616**, 602-613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.289>
- [85] Ji, N.-Y. and Zhao, W.-H. (2007) Study Progress on Fluorescence Characteristics of Marine Dissolved Organic Matter. *Marine Environmental Science*, No. 1, 95-100.
- [86] Huang, T.-L., Fang, K.-K., Zhang, C.-H., *et al.* (2016) Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC. *Environmental Science*, **37**, 3394-3401.
- [87] 冯启言, 张彦, 孟庆俊. 煤矿区废水中溶解性有机质与铜的结合特性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8): 1433-1441.
- [88] 张彦, 冯启言, 孟庆俊, 等. 溶解性有机质对煤矿区重金属迁移的影响[J]. 中国科技论文, 2013, 8(3): 251-254.
- [89] 韩佳明, 于妍, 郑然峰, 等. 煤矿地下水库 DOM 来源解析[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(5): 575-583.
- [90] 周学年, 朱印兵, 郑刘根, 等. 新集矿区地下水中溶解性有机质荧光特征及其指示意义[J]. 煤炭技术, 2019, 38(10): 66-69.
- [91] 孟庆俊, 李小孟, 高波, 等. 煤中可溶性有机质荧光光谱特征及其对微量元素赋存的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 257-266.
- [92] 赵丽, 田云飞, 王世东, 等. 煤矸石中溶解性有机质(DOM)溶出的动力学变化[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2455-2461.