

皖北采煤沉陷区水域周边土壤磷赋存形态分布特征研究

徐富强¹, 洪钦慧¹, 石 在¹, 李子恒¹, 余 浩^{1,2}, 任 杰³, 任 逸⁴, 李致春^{1,2*}

¹宿州学院资源与环境工程学院, 安徽 宿州

²宿州学院国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 安徽 宿州

³淮北市金鳊湖水产养殖有限公司, 安徽 淮北

⁴淮北师范大学生命科学院, 安徽 淮北

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月27日

摘 要

采煤沉陷区水域属于特殊的水生态系统, 其周边土壤与沉陷区水环境质量存在紧密联系。土壤中不同形态的磷通过径流和淋溶等方式进入采煤沉陷区水域, 导致水域富营养化。本研究选取皖北矿区9个采煤沉陷区水域周边土壤为研究对象, 包括祁南矿(QNK)、卧龙湖矿(WLHK)、桃园矿(TYK)、钱郢孜矿(QYZK)、芦岭矿(LLK)、孟庄矿(MZK)、刘桥二矿(LEQK)、朱仙庄矿(ZXZK)和杨庄矿(YZK)。采用SMT法(Standard Measurements Testing)测定土壤中总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和钙结合态磷(Ca-P)的含量, 旨在评估周边土壤中磷的生态风险。结果表明: 土壤中的TP的平均含量为563.33 mg·kg⁻¹, IP是TP的主要形态(60.80%~86.38%), Ca-P可能是IP主要形态(54.11%~86.79%), 人为活动可能是驱动磷形态空间分布的主要因素。YZK和QYZ沉陷区周边土壤的磷污染指数均已超过1.2, 这些区域磷负荷较高, 受人为活动影响较大, 高污染的地区易随径流进入水体而造成水域富营养化风险。OP与TP存在正相关($r = 0.67, p < 0.05$), 但与其他磷形态的相关性较低, 说明OP主可能是外源输入为主。TP与Ca-P存在正相关($r = 0.70, p < 0.05$), Ca-P易随雨水迁移进入水体, 形成潜在的释放源, 导致水体富营养化的产生。因各采煤沉陷区水域所处地理位置不同, 以及农业活动、生活污水和工业废水等人为活动, 导致其污染状况呈现出地方性分布差异。本研究成果为采煤沉陷区后续治理及控制采煤沉陷区水域水体富营养化提供了科学依据, 并对生态安全维护与风险管理提供理论支撑。

关键词

皖北矿区, 采煤沉陷区水域周边土壤, 磷赋存形态, 分布特征

*通讯作者。

Distribution Characteristics of Phosphorus Speciation in Soils around the Subsidence Waterlogging Area in Coal Mining Area in Northern Anhui Province

Fuqiang Xu¹, Qinhui Hong¹, Zai Shi¹, Ziheng Li¹, Hao Yu^{1,2}, Jie Ren³, Yi Ren⁴, Zhichun Li^{1,2*}

¹School of Resources and Environmental Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²National Coal Mine Hazard Prevention Engineering Technology Research Center, Suzhou University, Suzhou Anhui

³Huaibei Golden Mandarin Fish Lake Limited Company, Huaibei Anhui

⁴College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei Anhui

Received: May 29, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

The subsidence waterlogging area in coal mining area is a special water aquatic ecosystem, with the surroundings soil forming important sources and sinks. Different forms of phosphorus in the soil enter the subsidence waterlogging area in coal mining area through runoff and leaching, leading to eutrophication of the water. This study focuses on 9 the subsidence waterlogging area in coal mining area in the northern Anhui mining region, including Qinan Mine (QNK), Wolong Lake Mine (WLHK), Taoyuan Mine (TYK), Qian Yingzi Mine (QYZK), Luling Mine (LLK), Meng Zhuang Mine (MZK), Liuqiao No.2 Mine (LEQK), Zhu Xianzhuang Mine (ZXZK), and Yang Zhuang Mine (YZK). Using the Standard Measurements Testing (SMT) method to testing the contents of total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP), organic phosphorus (OP), iron-aluminum unite phosphorus (Fe/Al-P), and calcium unite phosphorus (Ca-P) in the surrounding soil, aiming to evaluate the ecological risks of phosphorus in the surrounding soil. The results showed that the average content of TP in the soil was 563.33 mg·kg⁻¹. IP was the main form of TP (60.80% to 86.38%), Ca-P likely was the main form of IP (54.11% to 86.79%), human activities may be the primary factor driving the spatial distribution of phosphorus forms. The pollution index of YZK and QYZ had exceeded 1.2, these areas had a high phosphorus load and were more influenced by human activities, highly polluted areas were prone to enter water bodies through runoff, posing a risk of eutrophication in the water areas. OP had a positive correlation with TP ($r = 0.67$, $p < 0.05$), but had a lower correlation with other forms of phosphorus, further explanation: OP was likely dominated by exogenous inputs. There was a positive correlation between TP and Ca-P ($r = 0.70$, $p < 0.05$). Ca-P was prone to move into water with rainwater, forming potential release source and leading to eutrophication of water. Due to the different geographical locations of the subsidence waterlogging area in coal mining area, and human activities such as agricultural activities, domestic sewage and industrial sewage, these results in local differences in pollution conditions. The findings of this study provide a scientific basis for the subsequent management and control of eutrophication in the subsidence waterlogging area in coal mining area, and offer theoretical support for ecological security maintenance and risk management.

Keywords

The Mining Areas of Northern Anhui, Soil around the Subsidence Waterlogging Area in Coal Mining Area, Species and Fractionation of Phosphorus, Distribution Characteristics



1. 引言

采煤沉陷区的形成不仅改变了原有的地形地貌,且改变了区域原有水文条件、土壤性质和生态系统结构[1]。在高潜水位地区这种改变较为突出,间接导致大面积积水,以致演替出独特的沉陷水域生态系统[2]。由于地形封闭塌陷地区水域易积累氮、磷等营养盐,磷作为水体富营养化的关键限制因子,其浓度的升高易加速富营养化进程[3][4]。土壤磷向采煤沉陷区水域转移的途径有侵蚀、淋溶和地表径流三种,其中地表径流为主要途径[5]。由此导致的土壤磷向采煤沉陷区水域释放,其成为驱动水体富营养化的主导因素,对采煤沉陷区水域周边土壤中的形态分布、迁移转化过程对水体环境具有重要影响[6]。随着煤炭开采力度不断扩大,地面沉降问题也逐渐显著[7][8]。采煤沉陷区水域水质状况事关矿业城市的矿区生态环境和生态系统的可持续发展。由于磷形态的吸附性能和稳定性不同,流经土壤的水会使得磷解析,随水流入水体各形态磷释放理化条件不同,对水体富营养化贡献量也不同[6]。因此,研究磷元素在近岸带土壤中的分布,对矿区的生态安全与风险管理具有重要意义。

当前国内外的研究主要采用 SMT (Standard Measurements Testing)分离方法分析沉积物中磷形态,并进行水体生态系统磷负荷评价。学者崔圆[9]在《黄河三角洲湿地表层土壤磷形态分布特征》采用 SMT 连续提取法提取出总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和钙结合态磷(Ca-P)。TP 是所有形态磷的总和,是造成水体富营养化风险的重要指标;IP 易于被植物吸收,活性较高,但易因地表径流而进入水体;Fe/Al-P 相对较易释放,Ca-P 相对稳定,不宜释放[10],但易受雨水冲刷的影响以颗粒态形式进入水域;OP 不能被生物直接利用,却是土壤有效磷的重要潜在来源[11];而磷在土壤中的积累及其稳定性是导致磷流失增加的根本原因[12]。Sharply [13]提出,加剧水体富营养化风险的产生,主要原因是磷通过地表径流等方式进入水域所影响。目前针对土壤磷的研究主要集中在湖泊和河口湿地,且磷在土壤中的分布受到环境和人为因素的共同干扰,是当前国内外研究的热点[14][15]。然而,对于采煤沉陷区水域周围土壤磷元素的赋存形态分布特征研究仍属空白,以及磷元素进入水体所引起的采煤沉陷区水域富营养化问题的研究及讨论较为匮乏。

基于此,本研究以皖北采煤沉陷区为研究对象,通过野外对沉陷区水域周边土壤实地调查,采用 SMT 法分析土壤总磷及各磷形态含量,并利用单因子标准指数来评估研究区水域周边土壤磷的富集状况,通过相关性分析探究水域富营养化的潜在风险因素。本研究旨在为采煤沉陷区水域周边土壤磷的赋存形态分布特征及后续治理采煤沉陷区水域水体富营养化提供科学依据,同时对皖北采煤沉陷区水域生态治理与风险管理具有重要参考作用。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

本研究以皖北矿区为研究对象,安徽省北部地区简称皖北,包括安徽省的六市:蚌埠、淮南、阜阳、淮北、宿州和亳州,其总面积占整个安徽省总面积的三分之一。且皖北煤田是安徽省重要的煤炭生产基地,包括淮北、皖北两大煤炭企业,煤炭保有资源储量超过 150 亿 t,年开采量超过 5000 万 t[16],为安徽省经济发展做出了突出贡献。因煤炭开采规模不断扩大,采煤沉陷区水域面积也逐渐扩增。且多数采煤沉陷区封闭式存在,加上人类活动的影响,治理难度较大。皖北矿区中存在祁南矿、卧龙湖矿、桃园

矿、钱郢孜矿、芦岭矿、孟庄矿、刘桥二矿、朱仙庄矿以及杨庄矿等采煤沉陷区，其周围分布居民生活区、工业生产区、农业灌溉区、景区等。这些采煤沉陷区水域具有典型的代表性，不同人文活动的影响对采煤沉陷区水域周边土壤及周围景观产生多样化的特征。

2.2. 样品采集及处理

本研究于 2022 年 8~9 月对皖北采煤沉陷区水域周边土壤进行采样，共布设 9 个采样矿区，分别位于祁南矿、卧龙湖矿、桃园矿、钱郢孜矿、芦岭矿、孟庄矿、刘桥二矿、朱仙庄矿以及杨庄矿，各采样矿区位置如图 1 所示。根据采煤沉陷区水域周边土壤地形地貌，采用非均匀布点方法采集土壤样品，基于水域面积大小，每个水域周边布设 3~5 个采样点，对研究区域各采样点进行表层土壤(0~10 cm)的采集，每个采样点采集三个土壤平行样品，采集的各矿区采样点土壤样品装入干净的聚乙烯自封袋中，后续在实验室中倒入大号的聚乙烯自封袋中并充分摇匀混合，随即放入 4℃冷藏箱中低温保存，为后续冷冻干燥做准备。土壤样品冷冻干燥后，去除贝类、动植物残体等杂质后研磨，过 100 目筛后做好标记，置于干燥皿保存待测。

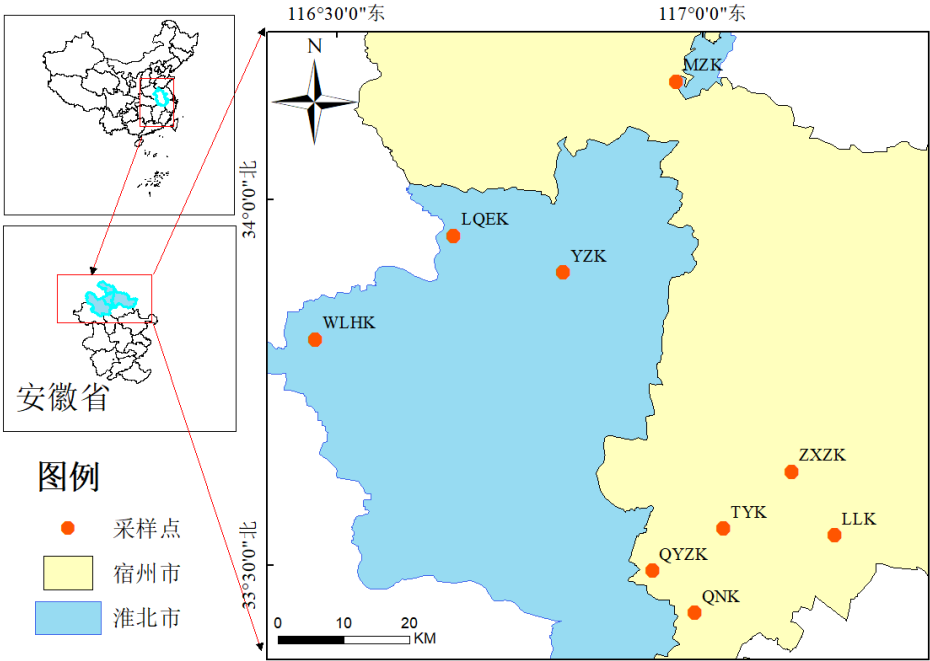


Figure 1. Distribution map of sampling points
图 1. 采样点位置分布图

2.3. 分析测试方法

2.3.1. 磷形态测定

研究采用 SMT 法提取土壤态[9]。将土壤中的磷分为总磷(TP)、有机磷(OP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)、钙结合态磷(Ca-P) [17]，具体操作步骤如图 2 所示。提取比色管上清液采用钼锑抗分光光度法测定磷的吸光度和浓度，最终得出磷的含量。

2.3.2. 磷富集评价方法

采用单因子指数法[18] [19]进行对磷的生态风险评估，计算公式为：

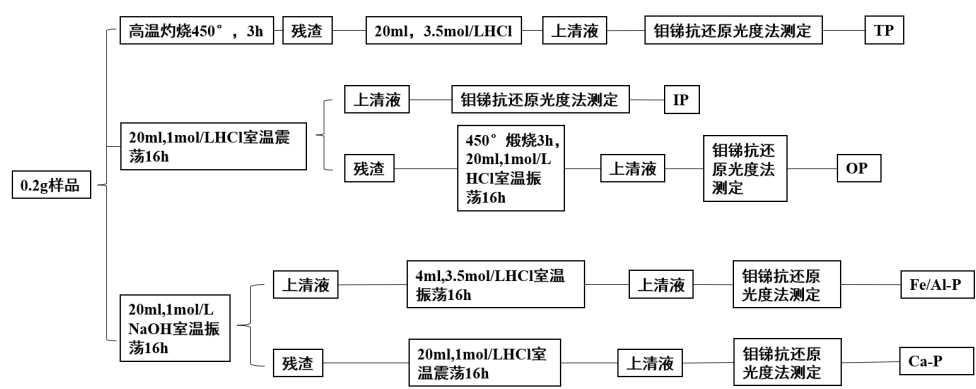


Figure 2. Soil phosphorus forms grade and determination [20]
图 2. 土壤磷形态分级和测定[20]

$$S_i=C_i/C_s$$

式中， S_i 为单项评价指数或标准指数，当 $S_i > 1$ 时表明含量超过评价标准； C_i 为评价因子 i 实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)； C_s 为评价因子 i 标准值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，本研究以 1992 年加拿大所发布的标准，采用沉积物中会引起最低级别生态风险效应的 TP 浓度($600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) [19] [21] [22]。污染指数等级划分如表 1 所示。

Table 1. Classification of pollution index levels
表 1. 污染指数等级划分

等级	污染指数(S_{TP})	类型
I	<0.5	清洁
II	$0.5\sim1.0$	轻度污染
III	$1.0\sim1.5$	中度污染
IV	≥1.5	重度/有机污染

2.4. 数据分析

实验所有数据采用 Excel 2019 (Microsoft, 美国)进行整理，使用 Origin2024 (OriginLab, 美国)制作箱线图和不同磷形态的柱状图及分析不同磷形态之间的相关性($p < 0.05$ 表示差异显著， $p < 0.01$ 表示差异极显著)。

3. 结果与讨论

3.1. 近岸带土壤各种磷形态的分布特征

采煤沉陷区水域周围土壤各形态磷含量如图 3 所示。土壤中 TP 含量占比较高，TP 含量在 $295.93\sim754.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，平均含量为 $563.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；IP 含量的变化范围在 $238.41\sim588.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，平均含量为 $419.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，据图 4 可知，IP 是 TP 的主要形态，占比介于 $60.81\%\sim87.80\%$ 之间；OP 含量变化范围在 $52.72\sim295.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，平均含量为 $143.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在各采样点中 OP 含量占 TP 含量的 $11.12\%\sim39.19\%$ ，土壤中的 Fe/Al-P 含量在矿区周边土壤普遍较低，变化范围为 $6.18\sim77.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均含量为 $28.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，所有采煤沉陷区水域周围土壤中的 Fe/Al-P 含量且其占比极低，仅占 IP 含量的 $1.05\%\sim15.80\%$ ，占 TP 含量更低，在 $0.92\%\sim11.44\%$ 之间；Ca-P 含量变化范围在 $152.06\sim517.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，平均含量为 $325.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。采煤沉陷区水域周边土壤中 Ca-P 的含量占比较显著，占 IP 含量的

54.13%~87.97%; 占 TP 含量的 39.22%~77.24%, 且其含量与 IP 含量分布高度相似, 从占比图可以说明采煤沉陷区水域周围土壤 Ca-P 是无机磷的主要存在形式。

通过对比分析, QYZ、WLHK 和 YZKTP 含量相对较高。采煤沉陷区水域周围土壤 TP 含量存在差异, 可能与不同人为活动干扰强度有关[23] [24]。其中 YZK 周围土壤中 TP 含量最高, TP 最大含量达到 $754.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, TYK 处 TP 含量值最低, 最小含量仅为 $295.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由于 YZK 人口比较密集, 植被覆盖率低[25]且周围建有煤炭发电厂, 继而易受生活污水和工业废水双重影响, 导致土壤部分参数和结构的改变, 使该水域的周围土壤中的 TP 含量高于其他区域土壤 TP 含量; TYK 周边有灌溉水渠, 而采煤沉陷导致的地表坡度的改变, 增强了径流汇聚能力, 经灌水冲刷加速土壤磷随水流进入水域[26], 使 TYK 处 TP 含量较低。且在酸性条件下, TP 有较大的释放强度[10], 高 TP 含量的土壤具有更高的磷流失潜在风险, 在后续的风险管理中, 土壤中磷含量较高的周围采煤沉陷区水域中富营养化程度应当尤为关注。

对于 IP 和 OP 的分布中, QYZ 处 IP 含量最高, OP 含量较低, IP 含量整体上高于 OP 含量, 在趋势上出现 LQEK、YZK 和 WLHK 处 OP 含量较高, IP 含量较低的现象, 可能主要与 OP 矿化有关。初步分析认为, QYZ 地处农田, 农业生产过程中施用的磷肥, 富集在土壤中, 即提高了土壤无机磷水平, 也增加了有机磷的含量[27], 导致 QYZIP 含量偏高; 同时 LQEK 周围农场养殖的存在导致 OP 含量偏高[28] [29]。TYK 和 LLK 地处农田, 但是周围有灌溉水渠, 部分磷会随灌溉水的灌溉进入沉陷区水域, 使土壤中的磷元素残留较少[30], 使其 IP 含量较低。大部分研究表明, 有机磷主要来源于微生物体内的磷素[31]以及农田的耕作[32] [33]等原因; YZK 和 WLHK 采样点受周边的生活污水和工业废水排放的影响, 会进一步影响有机磷向无机磷的矿化过程, 如改变土壤 pH 和土壤结构, 有利于矿化的发生, 使不同研究区域 IP、OP 呈现出不同的分布趋势, 同时本研究采样时间天气较热, 且采集水域周围土壤, 较高的温度和土壤含水率条件下, 间接促进矿化过程的矿化[11] [34]。进一步说明人为活动对采煤沉陷区水域周边土壤 IP 和 OP 的相互转化和输入起着较为重要的作用。控制采煤沉陷区水域周围人为活动等因素对采煤沉陷区水域及其周边土壤生态环境的保护具有重大意义。土壤 IP 随地表径流进入水体是造成水体富营养化的主要的潜在因素[12], 同时反馈出对于采煤沉陷区水域周边是否含有灌溉水渠的灌溉及降水程度的强弱会对采煤沉陷区水域水体富营养化做出一定贡献[30] [35]。

采煤沉陷区水域周围土壤中 Fe/Al-P 含量在 WLHK 较为突出。WLHK 采样点 Fe/Al-P 偏高可能是因为施用的磷肥增加了土壤中磷元素的来源, 与土壤中铁铝氧化物结合, 同时受工业活动影响导致污染物的输入, 进一步导致 Fe/Al-P 含量的增加[36] [37], 而在还原条件下, Fe^{3+} 更容易还原成 Fe^{2+} , 导致 Fe/Al-P 解离[38] [39], 当其溶解时随地表径流而进入水体导致富营养化, Fe/Al-P 随吸附而被土壤截留时, 但可能会随地表径流以及降雨而发生迁移进入水体导致富营养化加剧[40]-[42]。因此, 在不同氧化还原条件下, 对 Fe/Al-P 的分布以及潜在造成沉陷区水域富营养化的风险具有不同影响。人为活动等因素可能会因改变土壤磷形态, 而随地表径流以及降雨进入水体产生富营养化的风险, 控制人为活动等因素也是减少采煤沉陷区水域富营养化风险的潜在方式。

从柱状图(图 3(e))可知, LQEK 土壤中的 Ca-P 含量最高, LLK 土壤中的 Ca-P 含量最低。经调查分析, 磷肥施入石灰性土壤中后才会造成 Ca-P 的转化[43]-[46]。Ca-P 是土壤磷组分中性质相对稳定、不易释放的一种磷[10]。在碱性条件下稳定存在, 较难被分解而参与磷循环, 释放风险较小[9], 可能因采煤沉陷的影响使土壤偏碱性, 但其靠近灌溉水渠且人为输入的 Ca-P 来源较少, 磷污染物可能随着地表径流的运动迁移而逐渐被净化[30]。且在因暴雨及雨水冲刷的条件以颗粒态的形式进入水体间接成为造成水体富营养化的潜在释放源头[35] [42], 但 Ca-P 在采煤沉陷区水域周边土壤中存在空间性的差异, 可能是采矿活动直接破坏了原有的地质和生态环境, 导致土壤结构破坏以及农田等人为活动的进一步影响导致出现的差异[47]。

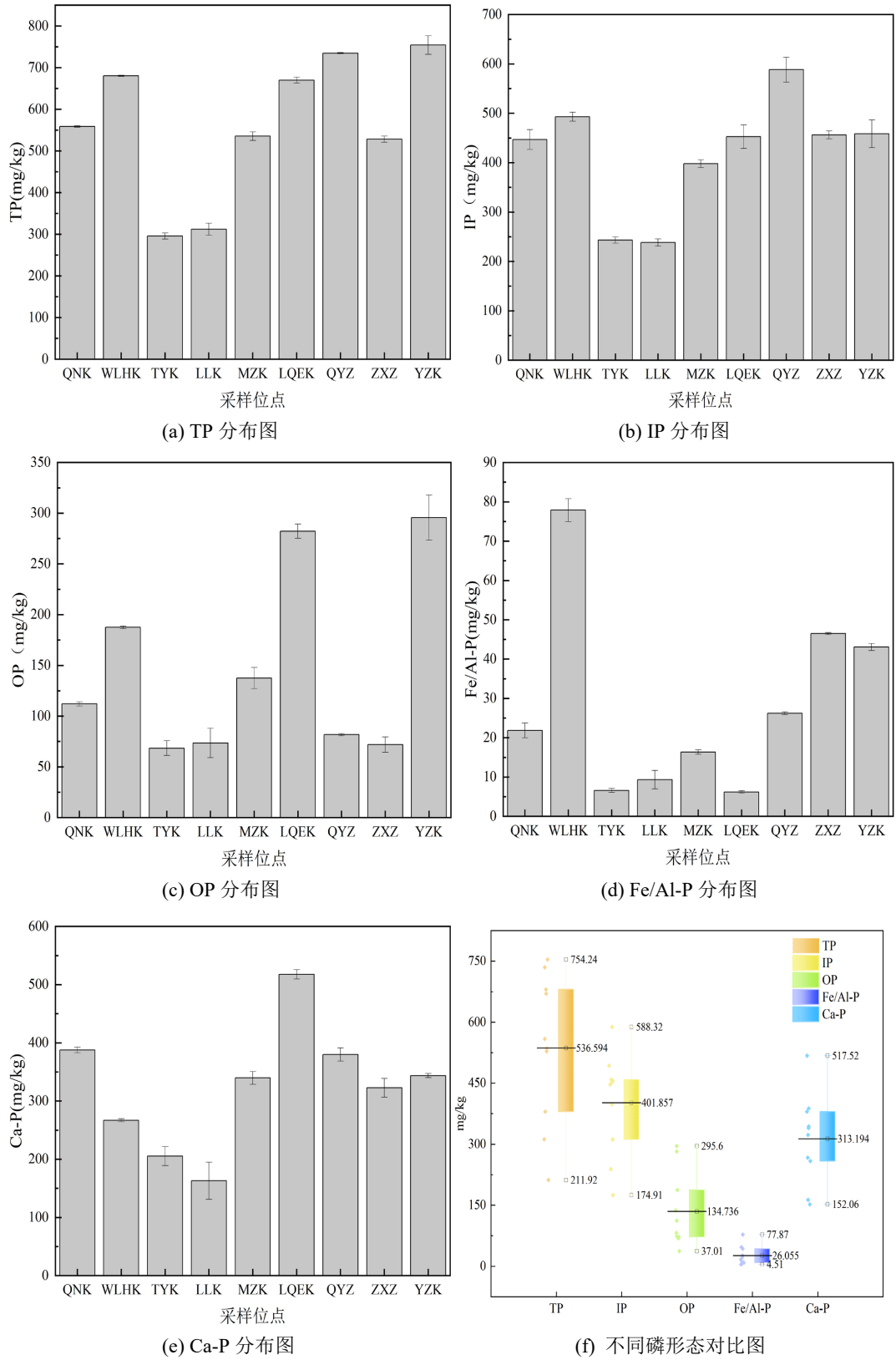


Figure 3. Distribution of phosphorus content in various forms in surrounding soil
图 3. 周围土壤中各形态磷含量分布

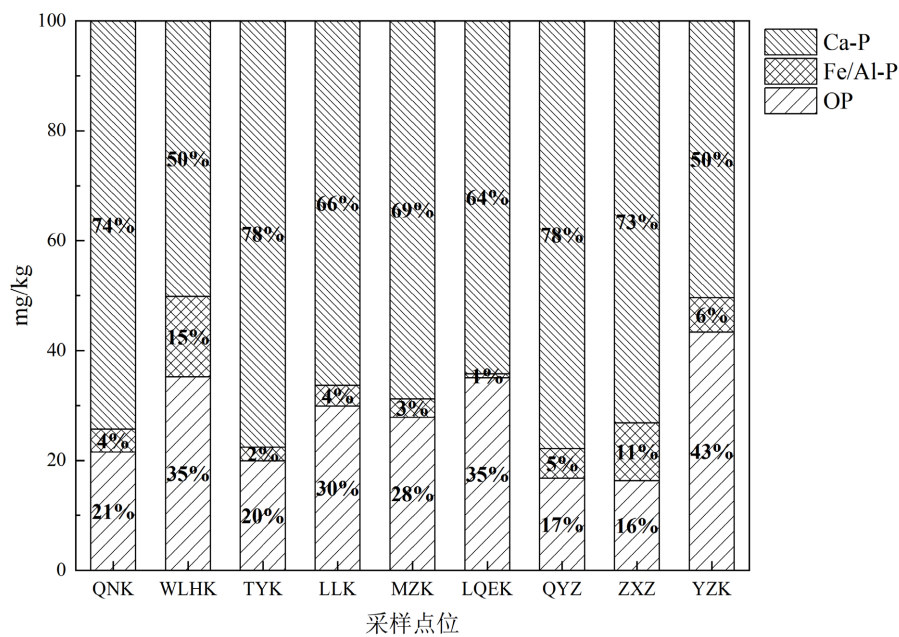


Figure 4. Percentage of various forms of phosphorus in nearshore soil
图 4. 近岸带土壤中各形态磷的占比图

3.2. 磷的污染风险评估

采煤沉陷区水域周围土壤的磷污染指数如图 5 所示，皖北矿区采煤沉陷区水域近岸带土壤的磷污染指数范围为 0.493~1.257，平均值为 0.938，采煤沉陷区水域周围土壤整体属于轻度污染，部分土壤呈现中度污染。皖北矿区采煤沉陷区水域近岸带土壤中污染指数呈现 YZK > QYZ > WLHK > LQEK > QNK > MZK > ZXZ > LLK > TYK。其中 WLHK、LQEK、QYZ 和 YZK 采样点污染指数大于 1，YZK 和 QYZ 的污染指数均已超过 1.2，污染指数最大为 YZK，磷污染较为严重。初步分析和调查，这可能与矿区周围存在农田及工厂有关[48]-[50]，使其土壤磷含量较高；同时改变了土壤磷的形态，导致其稳定性发生改变。据表 2 可知，本研究土壤 TP 及 IP 较高，人为活动影响可能为主要驱动因素。且本研究主要以采煤沉陷区水域周边土壤为对象，高含量的磷更容易通过降水和地表径流进入水体[5] [42]，进一步加大水体富营养化的风险。因地表变形、土壤侵蚀等，会引起采煤沉陷区水域周围土壤磷形态具有空间差异性[51]，而且采煤沉陷区又是一个特殊的且脆弱的生态系统，人为活动干扰下，可能会影响土壤 pH 和氧化还原条件的变化，从而影响土壤磷的空间分布。因此，针对人为活动影响较大的采煤沉陷区，对工厂污染源源头治理，加强防护措施[52]，对农田实施精准施肥，保护性种植，减少土壤侵蚀和地表径流[5]，对采煤沉陷区水域的管理和生态保护具有重要作用。

Table 2. Phosphorus forms content in soils of partially mined subsidence areas
表 2. 部分采煤沉陷区土壤磷形态含量

部分沉陷区	TP 平均值(mg·kg ⁻¹)	IP 平均值(mg·kg ⁻¹)	参考文献
潘集、顾北	72.7	/	[53]
潘一矿	248.47	130.25	[10]
淮北矿区	563.33	419.48	本研究

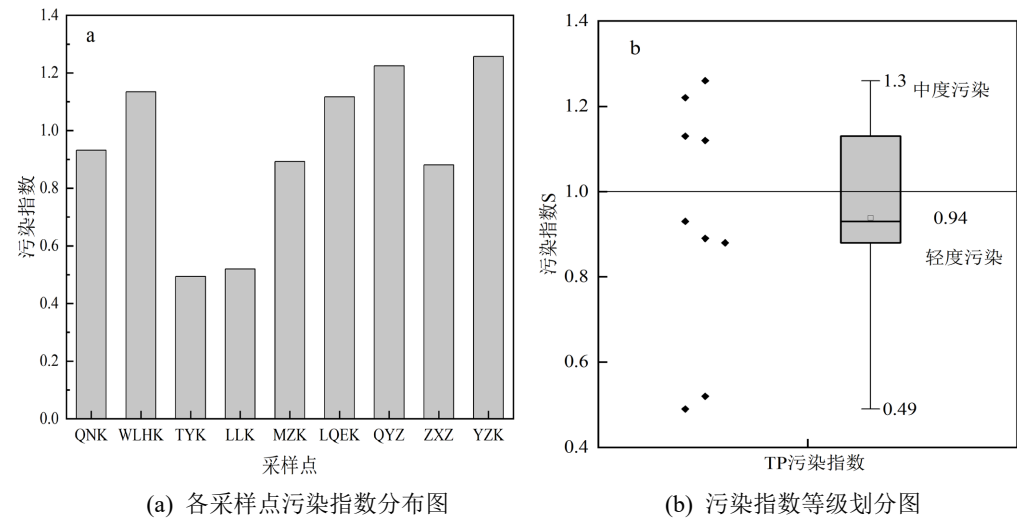
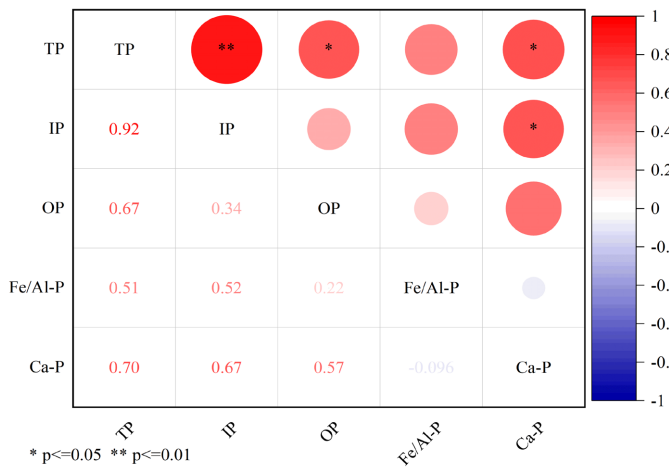


Figure 5. Distribution of soil TP pollution index
图 5. 土壤 TP 污染指数分布

3.3. 矿区采煤沉陷区水域富营养化潜在影响

如图 6 所示为矿区采煤沉陷区水域近岸带中 TP、各形态磷含量间的相关性分析结果，TP 与 Fe/Al-P 相关性较差，与各形态磷之间都有较强的相关性，与 IP 的相关性最强($r = 0.92, p < 0.01$)，结合不同磷形态的占比图(图 4)可以看出，IP 是土壤中磷的主要赋存形态，对采煤沉陷区水域周围土壤中 TP 的含量可能具有主导作用；且 TP 与 Ca-P 存在正相关($r = 0.70, p < 0.05$)。同时，IP 与 Ca-P 也表现出相关性($r = 0.67, p < 0.05$)，通过占比图说明 Ca-P 可能是 IP 的重要来源，进一步说明 Ca-P 可能是控制 IP 变化趋势的主要因素，且对 TP 分布的影响较大。而 OP 除了与 TP 具有正相关($r = 0.67, p < 0.05$)之外与其他形态磷的相关性较低，说明 OP 可能主要是外源输入为主[39]。在一定条件下，各磷形态之间的相互转化对 TP 含量有一定影响，而 OP 和 Ca-P 对 TP 含量有重要的贡献[24] [54] [55]，对采煤沉陷区水域周围土壤 TP 含量起关键因素。



**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。*在 0.05 级别(双尾)，相关性显著。

Figure 6. Correlation heatmap of soil phosphorus forms
图 6. 土壤磷形态相关性热力图

分析各磷形态与 TP 的关系, 可以针对采煤沉陷区水域制定科学的生态修复方案。综上分析, IP 对 TP 起主导作用, 其活性较高, 易因地表径流而进入水体, 有较高的释放风险, 但 Ca-P 可能是 IP 的重要来源, 在土壤中较稳定, 无外源因素的影响, 对水域造成富营养化风险较低, 但在暴雨条件下可能会进入水体是造成富营养化的潜在因素[35][42]。同时采煤沉陷区这种特殊的环境中, 因土壤结构的改变以及在人为活动的外在的双重影响下, 易造成 OP 与 IP 的相互转化, 也是造成水体富营养化潜在的风险之一。因此, 对沉陷区周边地形进行修整, 减缓地表径流速度, 延长径流路径促进磷在土壤中的截留对降低水体富营养化风险起关键治理效果, 以及控制沉陷区周边农业活动, 工业等人为活动向水域过度排放含磷废水, 从源头降低磷负荷也是必不可少的手段。

4. 结论

1) 本研究揭示了采煤沉陷区水域周围土壤磷形态的分布情况, 其中 TP 含量较高(平均含量 $563.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), IP 含量次之(平均含量 $419.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 且土壤磷形态主要以 IP 为主导(占 TP 60.81%~87.80%), 其中 IP 主要形式是 Ca-P (54.13%~87.97%), 采煤沉陷区周围土壤可能是偏碱性环境; 不同矿区磷形态也具有差异性: YZK TP 和 OP 含量较高, QYZ IP 含量较高, LQEK OP 含量偏高。人为活动可能是驱动磷形态空间分布的主要因素。

2) 采煤沉陷区水域周围土壤磷大部分处于污染和中度污染, YZK 和 QYZ 的污染指数均已超过 1.2, 相较于其他矿区该研究磷污染较高, 说明污染程度与矿区周边人为活动等影响关系较为密切, 且高污染负荷地区水域富营养化风险可能更高。各采煤沉陷区水域所处地理位置不同, 因人为活动导致其污染状况呈现出地方性的分布差异。因此, 针对采煤沉陷区水域富营养化防控需分区、不同污染源进行分类的精准治理措施。

3) OP 与 TP 存在正相关($r=0.67, p<0.05$), 与其他形态磷相关性低, 说明 OP 主要源于外源输入, 且 OP 与 IP 的相互转化, 也是造成水体富营养化潜在的风险之一。TP 与 Ca-P 存在正相关($r=0.70, p<0.05$), 各磷形态之间的相互转化对 TP 含量有一定影响, 且 OP 和 Ca-P 对 TP 含量有重要的贡献。Ca-P 可能成为水体富营养化风险的潜在因素。对沉陷区周边地形进行修整, 减缓地表径流速度, 延长径流路径、增强土壤截留能力以及减少附近人为活动等方式, 对降低采煤沉陷区水域富营养化风险起重要作用。

基金项目

国家自然科学基金(42107280); 安徽省高校中青年教师培养行动项目(DTR2024048); 国家级大学生创新创业训练项目(202510379052); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202510379182)。

参考文献

- [1] 苏佳慧. 采煤沉陷对土壤、植被的影响及防护管理: 以神东矿区为例[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [2] 陈浮, 朱燕峰, 马静, 等. 东部平原采煤沉陷区降污固碳协同修复机制与关键技术[J]. 煤炭报, 2023, 48(7): 2836-2849.
- [3] Schindler, D.W., Carpenter, S.R., Chapra, S.C., Hecky, R.E. and Orihel, D.M. (2016) Reducing Phosphorus to Curb Lake Eutrophication Is a Success. *Environmental Science & Technology*, **50**, 8923-8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- [4] 段金铭, 陈孝杨, 周育智, 等. 采煤沉陷区水质季节性变化特征及富营养化关键驱动因子研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2025, 43(6): 169-172.
- [5] 单艳红, 杨林章, 王建国. 土壤磷素流失的途径、环境影响及对策[J]. 土壤, 2004, 36(6): 602-608.
- [6] Yi, Q., Sun, P., Niu, S. and Kim, Y. (2015) Potential for Sediment Phosphorus Release in Coal Mine Subsidence Lakes

- in China: Perspectives from Fractionation of Phosphorous, Iron and Aluminum. *Biogeochemistry*, **126**, 315-327. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0158-4>
- [7] 程琛, 刘佳俊, 杨凝, 等. 宿州煤矿塌陷水域水质评价及污染源解析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(4): 24-31+65.
 - [8] 马金玉, 罗千里, 王文才, 等. 华阳河湖群表层沉积物磷形态及生物有效性[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(12): 2962-2971.
 - [9] 崔圆, 张振明, 王晨, 等. 黄河三角洲湿地表层土壤磷形态分布特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 59-68.
 - [10] 姚健健, 高良敏, 姚素平, 等. 采煤塌陷区土壤磷赋存形态及其释放规律[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 33-36.
 - [11] 张万年, 杨子, 严玉鹏. 土壤有机磷的矿化及其调控研究进展[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 334-347.
 - [12] 姜婧, 刘琳. 土壤磷、氮与水体富营养化[J]. 农村实用技术, 2020(1): 177-178
 - [13] Sharpley, A.N. (2003) Soil Mixing to Decrease Surface Stratification of Phosphorus in Manured Soils. *Journal of Environmental Quality*, **32**, 1375-1384. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1375>
 - [14] Prastka, K., Sanders, R. and Jickells, T. (1998) Has the Role of Estuaries as Sources or Sinks of Dissolved Inorganic Phosphorus Changed over Time? Results of a Kd Study. *Marine Pollution Bulletin*, **36**, 718-728. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(98\)00052-6](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(98)00052-6)
 - [15] Shrestha, S. and Kazama, F. (2007) Assessment of Surface Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study of the Fuji River Basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 464-475. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001>
 - [16] 杜佩君, 王孟, 杨梦娇, 等. 皖北矿区采煤沉陷区水域营养盐分布特征研究[J]. 环境生态学, 2025, 7(4): 133-141.
 - [17] Onianwa, P.C., Oputu, O.U., Oladiran, O.E. and Olujimi, O.O. (2015) Distribution and Speciation of Phosphorus in Sediments of Rivers in Ibadan, South-Western Nigeria. *Chemical Speciation & Bioavailability*, **25**, 24-33. <https://doi.org/10.3184/095422913x13583453680586>
 - [18] Yuan, H., Chen, P., Liu, E., Yu, J., Tai, Z., Li, Q., *et al.* (2023) Terrestrial Sources Regulate the Endogenous Phosphorus Load in Taihu Lake, China after Exogenous Controls: Evidence from a Representative Lake Watershed. *Journal of Environmental Management*, **340**, Article 118016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118016>
 - [19] 刘威, 胡俊栋, 范晨子, 等. 云南安宁磷矿区水系沉积物磷赋存形态及分布特征[J]. 岩矿测试, 2024, 43(1): 177-188.
 - [20] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流表层沉积物中磷形态的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1804-1811.
 - [21] 王若凡, 刘雨欣, 李佩钢, 等. 黄河兰州段河岸带沉积物磷的形态分布及释放风险[J]. 干旱区研究, 2024, 41(12): 2035-2044.
 - [22] 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 等. 乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5598-5607.
 - [23] 许琛, 沈素素, 何竹, 等. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2506-2514.
 - [24] 樊海, 齐海涛, 陈永友, 等. 化肥减施对茎瘤芥生长和土壤水溶性氮、磷含量及组分的影响[J]. 地球与环境, 2026, 54(1): 21-32.
 - [25] 孙奔奔, 郭靖. 光合碳驱动根际过程对植物磷吸收的影响研究进展[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(11): 53-57.
 - [26] Fu, Y., Hu, Z., Zhu, Q. and Rong, Y. (2023) Characteristics of Labile Organic Carbon Fractions under Different Types of Subsidence Waterlogging Areas in a Coal Mining Area: A Case Study in Xinglongzhuang Coal Mine, China. *CATENA*, **232**, Article 107398. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107398>
 - [27] 路鹏, 冯佳, 李莉, 等. 长期施肥小麦根际与非根际土壤的磷组分及其有效性[J]. 中国农业科学, 2025, 58(12): 2382-2396.
 - [28] Mackay, J.E., Macdonald, L.M., Smernik, R.J. and Cavagnaro, T.R. (2017) Organic Amendments as Phosphorus Fertilisers: Chemical Analyses, Biological Processes and Plant P Uptake. *Soil Biology and Biochemistry*, **107**, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.008>
 - [29] 黄源鸿, 张春龙, 黄容, 等. 猪粪投入量对土壤有机磷组分及微生物系统稳定性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(1): 100-111.
 - [30] 张艳灵. 汾河水库周边土壤氮磷污染风险评价及关键源区识别[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2014.

- [31] 李慧, 雷沛, 李珣, 等. 天津市北大港湿地沉积物氮磷分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4086-4096.
- [32] Ni, Z., Wang, S., Zhang, B., Wang, Y. and Li, H. (2019) Response of Sediment Organic Phosphorus Composition to Lake Trophic Status in China. *Science of the Total Environment*, **652**, 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.233>
- [33] Wu, X., Ma, T., Du, Y., Jiang, Q., Shen, S. and Liu, W. (2021) Phosphorus Cycling in Freshwater Lake Sediments: Influence of Seasonal Water Level Fluctuations. *Science of the Total Environment*, **792**, Article 148383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148383>
- [34] 李永俊, 王昆. 环境污染对土壤微生物多样性的影响及生态修复技术分析[J]. 工业微生物, 2025, 55(1): 228-230.
- [35] Khan, S., Wang, Y., Milham, P.J., Lin, Z., Qi, X., Gao, H., *et al.* (2025) Effect of Stormwater and Land Use on Biogeochemical Transformations of Dissolved and Particulate Phosphorus in Freshwater Systems. *Water Research*, **284**, Article 124007. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124007>
- [36] 米玮洁, 周易勇, 朱端卫, 等. 养殖污染水体-沉积物中磷的化学行为[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 271-276.
- [37] 赵双菊, 齐维晓, 李静, 等. 水位对密云水库消落区土壤磷通量影响的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2400-2408.
- [38] 李晓瞳, 刘泽辉, 张菊, 等. 东平湖沉积物中磷的赋存形态及其空间分布特征[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 62-67.
- [39] 杨琪昭, 李致春, 黄海燕, 等. 沱湖沉积物磷赋存形态分布特征研究[J]. 地球与环境, 2026, 54(3): 462-473.
- [40] Midgley, A.R. (1941) Phosphate Fixation in Soils—A Critical Review. *Soil Science Society of America Journal*, **5**, 24-30. <https://doi.org/10.2136/sssaj1941.036159950005000c0004x>
- [41] Bhatti, J.S., Comerford, N.B. and Johnston, C.T. (1998) Influence of Oxalate and Soil Organic Matter on Sorption and Desorption of Phosphate onto a Spodic Horizon. *Soil Science Society of America Journal*, **62**, 1089-1095. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040033x>
- [42] 黄倩倩, 饶彤彤, 张雯. 降雨对农业耕作土壤磷形态和流失风险的影响[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(4): 29-40.
- [43] 周文利, 宋盼盼, 吴军. 不同品种磷肥对土壤无机磷组分及磷有效性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 197-203.
- [44] Larsen, S. and Widdowson, A.E. (1970) Evidence of Dicalcium Phosphate Precipitation in a Calcareous Soil. *Journal of Soil Science*, **21**, 364-367. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1970.tb01186.x>
- [45] 蒋柏藩. 磷肥在土壤中的形态转化及其有效性[J]. 土壤学进展, 1981, 9(2): 1-11.
- [46] 尹金来, 曹翠玉, 史瑞和. 磷肥在石灰性土壤中的形态转化及其有效性[J]. 土壤通报, 1989, 20(1): 14-16.
- [47] 董红静, 张俊, 汤禹, 王旭, 陈敏敏. 马鞍山市向山地区生态环境治理问题研究[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1620-1627.
- [48] Fan, T., Wang, Y., Wang, M., Wang, S., Wang, X. and Lu, A. (2024) Effect of Phosphate Rock Powder, Active Minerals, and Phosphorus Solubilizing Microorganisms on the Phosphorus Release Characteristics of Soils in Coal Mining Subsidence Areas. *Polish Journal of Environmental Studies*, **33**, 4071-4082. <https://doi.org/10.15244/pjoes/177435>
- [49] Sun, J., Yang, L., Wei, J., Quan, J. and Yang, X. (2020) The Responses of Soil Bacterial Communities and Enzyme Activities to the Edaphic Properties of Coal Mining Areas in Central China. *PLOS ONE*, **15**, e0231198. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231198>
- [50] 吕明波, 郭成久, 苏芳莉, 等. 造纸废水灌溉对湿地土壤和芦苇中总磷迁移的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 85-93.
- [51] 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.
- [52] 宗维, 李煜, 李定远, 等. 汉江经济带“三磷”企业周边土壤磷与重金属空间分布特征及污染风险评价[J]. 资源环境工程, 2023, 37(2): 191-200.
- [53] 李阳, 郑刘根, 程桦, 等. 采煤沉陷区表层土壤氮、磷和有机质分布特征及相关性分析[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(10): 52-57.
- [54] Yin, Y., Liang, C.H., Xi, F.M., Du, L.Y., Wang, J.Y. and Bing, L.F. (2018) Relationship between Phosphorus Fractions in Paddy Soil and Phosphorus Release to Runoff Amended with Manure. *CLEAN—Soil, Air, Water*, **46**, Article 1700192. <https://doi.org/10.1002/clen.201700192>
- [55] 邵云, 王岚, 王鹏飞, 等. 不同前茬作物和施肥水平下麦田土壤不同形态无机磷含量及其对冬小麦磷累积量的贡献[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 23-31+174.