

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布

韩谓, 潘保柱*, 陈越, 刘亚平, 侯易明

(西安理工大学西北旱区及生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 黄河是我国西北和华北地区重要的供水水源, 由于地形和降雨等自然因素以及频繁的人类活动影响, 黄河流域水环境问题日渐凸显. 为明确黄河干流水环境特征、水质现状以及流域氮磷负荷时空分布, 本研究于2019年的4~5月和10~11月对黄河干流全河段水环境进行了调查研究. 基于野外采样研究结果以及室内实验数据, 结果发现: ①从源区至河口多个水体理化参数逐渐上升的趋势反映了越来越频繁的人类活动以及中下游水土流失等的共同作用, 此外, 水库对溶质的截留与沉积具有显著的效果; ②两个季节水质差异较小, 从源区至河口水质等级由“优秀”下降至“一般”; ③降雨是黄河流域氮磷赋存形态及其负荷具有季节性差异的关键因素; ④黄河流域内氮磷赋存形态及其负荷所具有的空间差异性主要受控于人类活动与水土流失的影响. 本研究结果可为控制黄河流域入河氮磷负荷以及改善水质提供科学依据.

关键词: 黄河流域; 水环境; 氮磷负荷; 时空分布; 人类活动; 水土流失

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5786-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104004

Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River

HAN Xu, PAN Bao-zhu*, CHEN Yue, LIU Ya-ping, HOU Yi-ming

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The Yellow River is the important water supply source for Northwest China and North China, whereas natural factors such as topography, rainfall, and intense human activities have brought about prominent water environment problems in the Yellow River basin. The main stream of the Yellow River was investigated from April to May and October to November of 2019 to clarify characteristics of the water environment, the current water quality status, and the spatiotemporal distribution of nitrogen and phosphorus loads. On the basis of observations and a laboratory analytical experiment, it was found that: ① The multiple parameter values increased from the source area to the estuary, which is the reflection of the combined effects of increasingly frequent human activities and soil erosion in the middle and lower reaches. Furthermore, reservoirs have significant effects on the retention and deposition of solutes; ② There is not much difference between water quality in the two seasons, and the water quality level dropped from “excellent” to “ordinary” from the source area to the estuary; ③ Rainfall played a critical role in the temporal difference in the occurrence forms of nitrogen and phosphorus and their load in the Yellow River basin; ④ The spatial difference in the occurrence forms and load of nitrogen and phosphorus in the Yellow River basin is mainly controlled by the effects of human activities and soil erosion. The study is expected to lay a scientific basis for controlling nitrogen and phosphorus load and improving water quality in the Yellow River basin.

Key words: Yellow River basin; water quality; nitrogen and phosphorus load; spatiotemporal distribution; human activities; soil erosion

河流是人类生活、生产以及生态用水的重要来源,同时也是输送维系陆生和水生生态系统的氮磷等营养元素的重要纽带.随着经济的快速增长,工农业废水随排放及降雨径流进入河流,而这些废水中所携带的过量营养物质会破坏水体原有平衡,从而导致水质下降和水生生态系统退化等问题^[1,2].而河流的水质也是自然过程与人类生产和生活综合作用的结果^[3,4].同时,研究河流中营养物质的季节动态既可以反映水体的质量状况,也可为营养物质的溯源及调控提供关键线索^[5].

黄河是世界第五大河流,也是我国西北和华北地区的重要水源,然而其水资源却较为紧缺^[6].近年来,由于地形和降雨等自然因素以及频繁的人类活动影响,黄河流域水生态问题日渐凸显^[7],其水质状况一直备受关注^[8,9].而对于横跨9个省份和自治区的黄河流域,各个河段所面临的问题都不相同:源区湿地萎缩^[10],上游甘宁

蒙段工农业污染^[11],中下游水土流失以及缺水危机^[12].因此,黄河水质现状与污染物调查与治理已刻不容缓.

目前,关于黄河营养物质的调查主要集中于中下游地区^[13~15],大尺度的全流域调查较少^[16].鉴于此,本文以黄河为研究对象,分析了2019年春秋两季黄河干流自然河段及水库的水环境特征,并对黄河干流水质进行评价,探讨了黄河干流主要营养盐的季节性差异和空间分布特征,科学地计算了黄河流域入河氮磷负荷,以期为水土流失和人类活动双重作用下黄河流域氮磷污染的治理提供科学依据.

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51939009)

作者简介: 韩谓(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为淡水生态, E-mail: xuhan_0906@163.com

* 通信作者, E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山脉北麓,流域地处 32°~42°N,95°~120°E 之间,全长 5 464 km,覆盖 9 个省区,地势高低起伏显著^[17]. 黄河属于典型的季风气候区,降雨主要集中于 7~10 月,上、中游位于干旱和半干旱地区,下游地区较为湿润^[18]. 流域内陆表水空间分布不均,上游占 60.3%,而中下游属于人口密集地,陆表水域面积仅占总面积的 39.7%^[19].

本研究分别于 2019 年 4~5 月(春季)和 2019 年 9~10 月(秋季)采样 2 次,从黄河源区至河口沿

程向下游采样(图 1),采样断面设置如表 1. 综合考虑河道地形和水文环境等因素,本研究共设置 45 个断面,其中包含龙羊峡、刘家峡、青铜峡、万家寨、三门峡和小浪底这 6 个水库,且每个水库取其库首、库中和库尾 3 个断面进行调查. 目前,对于黄河干流河段划分最常用的是黄河水利委员会根据水文特征将其河源至河口镇划分为上游,河口镇至桃花峪为中游,桃花峪以下为下游^[20],由于上游河段较长(3 472 km)和落差较大(3 496 m),且通常将唐乃亥水文站上游地区定义为黄河源,因此本文将黄河上游划分为源区(本研究中玛多-唐乃亥段)和上游甘宁蒙段(本研究中龙羊峡水库-头道拐段)两段,以此更科学地体现黄河干流水环境特征^[21].

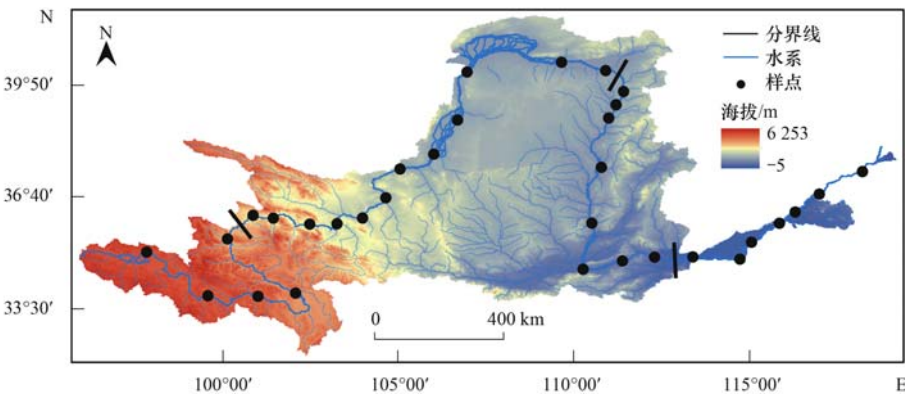


图 1 黄河流域主要水系及样点分布示意

Fig. 1 Distribution of main river systems and sample points in the Yellow River basin

表 1 黄河干流源区至河口采样断面信息

Table 1 Sampling section information from source region to estuary of the Yellow River mainstream

断面编号	断面名称	断面编号	断面名称
MD	玛多	TDG	头道拐
JM	吉迈	WJZKW	万家寨库尾
MT	门堂	WJZKZ	万家寨库中
MQ	玛曲	WJZKS	万家寨库首
TNH	唐乃亥	HQ	河曲
LYXKW	龙羊峡库尾	FG	府谷
LYXKZ	龙羊峡库中	WB	吴堡
LYXKS	龙羊峡库首	LM	龙门
GD	贵德	TG	潼关
XH	循化	SMXKW	三门峡库尾
LJXKW	刘家峡库尾	SMXKZ	三门峡库中
LJXKZ	刘家峡库中	SMXKS	三门峡库首
LJXKS	刘家峡库首	XLDKW	小浪底库尾
LZ	兰州	XLDKZ	小浪底库中
AND	安宁渡	XLDKS	小浪底库首
XHY	下河沿	HYK	花园口
QTXKW	青铜峡库尾	JHT	夹河滩
QTXKZ	青铜峡库中	GC	高村
QTXKS	青铜峡库首	SK	孙口
SZS	石嘴山	AS	艾山
BYGL	巴彦高勒	LK	滦口
ZJF	昭君坟	LJ	利津

1.2 实验与数据处理

1.2.1 参数测定

水环境参数测定:电导率(EC)、溶解氧(DO)和 pH 采用哈希 HQ40D 便携式多参数水质监测仪测定,浊度(Turb)采用哈希 2100Q 便携式浊度分析仪测,用多参数控制器(美国 YSI ProPlus, YSI, USA)现场测量总溶解固体(TDS). 将采集的水样处理后带回实验室,用以水体各理化参数的测定,本研究中室内所测参数浓度为上清液中数值^[22]. 总氮(TN)和溶解态总氮(DTN)采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)和亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)采用紫外分光光度法测定. 沉积物中有机碳总量(S-TOC)采用重铬酸钾氧化法-硫酸外加热法测定^[23],参照国标半微量开氏法(GB 7173-87)进行沉积物中总氮(S-TN)测定,参照国标碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632-2011)进行沉积物中总磷(S-TP)的测定.

1.2.2 水质指数法

本研究利用水质质量指数(WQI)综合评估法对黄河干流水质进行评价,其计算公式为^[24,25]:

$$WQI = \sum_{i=1}^n C_i \times P_i / \sum_{i=1}^n P_i$$

式中, WQI 为水质综合指数(表 2), C_i 为第 i 种水质

因子的标准化得分, P_i 为第 i 种水质因子的权重, 以此将 WQI 分为 5 个等级: 优秀(90 ~ 100)、良好(70 ~ 90)、一般(50 ~ 70)、差(25 ~ 50)和极差(0 ~ 25)。

表 2 WQI 方法各水质因子分数及权重

因子	权重 (P_i)	标准化分数(C_i)										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	2	<750	<1 000	<1 250	<1 500	<2 000	<2 500	<3 000	<5 000	<8 000	$\leq 12\ 000$	>12 000
$\rho(\text{DO})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4	≥ 7.5	>7	>6.5	>6	>5	>4	>3.5	>3	>2	≥ 1	<1
Turb/NTU	2	<5	<10	<15	<20	<25	<30	<40	<60	<80	≤ 100	>100
$\rho(\text{TDS})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	<100	<500	<750	<1 000	<1 500	<2 000	<3 000	<5 000	<10 000	$\leq 20\ 000$	>20 000
pH	1	7	7~8	7~8.5	7~9	6.5~7	6~9.5	5~10	4~11	3~12	2~13	1~14
$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3	<0.01	<0.05	<0.1	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	<0.75	<1	≤ 1.25	>1.25
$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	<0.5	<2	<4	<6	<8	<10	<15	<20	<50	≤ 100	>100
$\rho(\text{NO}_2^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	<0.005	<0.01	<0.03	<0.05	<0.10	<0.15	<0.20	<0.25	<0.50	≤ 1.00	>1.00
$\rho(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3	<0.1	<0.2	<0.35	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤ 2	>2
$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1	<0.16	<1.6	<3.2	<6.4	<9.6	<16	<32	<64	<96	≤ 160	>160

1.2.3 氮磷赋存形态及负荷计算

颗粒态氮(PN)、溶解态无机氮(DIN)和溶解态有机氮(DON)质量浓度的计算公式如下:

$$\rho(\text{PN}) = \rho(\text{TN}) - \rho(\text{DTN}) \quad (1)$$

$$\rho(\text{DIN}) = \rho(\text{NH}_4^+-\text{N}) + \rho(\text{NO}_3^--\text{N}) + \rho(\text{NO}_2^--\text{N}) \quad (2)$$

总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)和溶解性无机磷(DIP)采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定. 颗粒态磷(PP)和溶解性有机磷(DOP)质量浓度的计算公式如下:

$$\rho(\text{PP}) = \rho(\text{TP}) - \rho(\text{DTP}) \quad (3)$$

$$\rho(\text{DOP}) = \rho(\text{DTP}) - \rho(\text{DIP}) \quad (4)$$

河流 TN 和 TP 的负荷计算公式如下:

$$W_{ij} = c_{ij} \cdot Q_{ij} \quad (5)$$

式中, W_{ij} 为 i 年 j 月河流 TN 或 TP 负荷($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$); c_{ij} 为 i 年 j 月河流 $\rho(\text{TN})$ 或 $\rho(\text{TP})$ 的平均值($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Q_{ij} 为 i 年 j 月水量的平均值($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)^[26].

1.2.4 分析方法

依据行政区划, 收集每个采样点所归属于行政县/区的农业与工业数据, 流量以及各行政区工农业数据来源于水利部黄河水利委员会(<http://www.yellowriver.gov.cn/>)及各省统计年鉴.

采用回归和相关分析, 以 P 值为 0.05 检验变量之间的关系, 以确定显著性. 数据的整理及回归分析在 Origin 2018 软件中完成, 相关性分析及变差分解在 R 3.6.0 中完成, 氮磷负荷时空分布图在 ArcGIS 10.6 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 黄河干流水环境

由图 2 可知, 电导率在 308 ~ 1 063 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 范

围之内, 溶解氧在 6.05 ~ 11.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, pH 在 7 ~ 8.5 之间, 呈碱性. 水体中电导率、pH 和总氮等参数春季的浓度高于秋季; 水体中溶解氧、浊度和总磷等参数秋季浓度高于春季; TDS 呈现出青铜峡水库以上秋季浓度高于春季, 以下秋季浓度低于春季; 沉积物中总磷秋季含量高于春季, 而沉积物中总有机碳和总氮的两个季度含量差异较小. 电导率、溶解氧、浊度、TDS 和总氮均表现为从源区至下游呈逐渐升高的趋势. 同时, 水库的浊度明显低于周围样点, 而沉积物中的总有机碳与总氮含量均表现出在水库处有明显升高的规律, 在刘家峡水库、万家寨水库、三门峡水库和小浪底水库均出现此现象.

如图 3(a) 所示, 春季电导率与水体中除 TP 外的参数都有着显著的正相关性, 而秋季电导率与这些参数却不具有显著性关系[图 3(b)]. 同时, 由图 3(a) 和 3(b) 可知, 有多个参数的相关性关系在时间上呈现出相同的规律. 两个季度水体 TDS 与电导率和总氮均存在显著正相关关系, 总氮与溶氧和 pH 之间存在显著正相关关系, 水体的总磷与浊度皆呈极显著的正相关. 在沉积物中, 总有机碳、总氮和总磷之间具有显著正相关关系, 但沉积物总有机碳和沉积物总氮含量与水体浊度和水中总磷浓度之间具有负相关关系, 且此种负相关关系在秋季更加显著.

图 4 展示了黄河干流春秋两季的水质时空特征. 结果表明, 2019 年黄河干流水质 WQI 值在春季(WQI 值为 52.58 ~ 92.27, 均值为 69.09)和秋季(WQI 值为 56.36 ~ 95.30, 均值 72.41)差异较小, 均在 50 以上, 整体水质为“一般”及以上. 根据 WQI 结果, 黄河干流水质类别主要为“良好”和“一般”, 分别占总体的 34.38% 和 53.13%. 从空间上来看, 春秋两季黄河干流水质从源区至河口呈逐步下降的趋势, 其中, 源区段水质(70 ~ 100)多为“良好”及

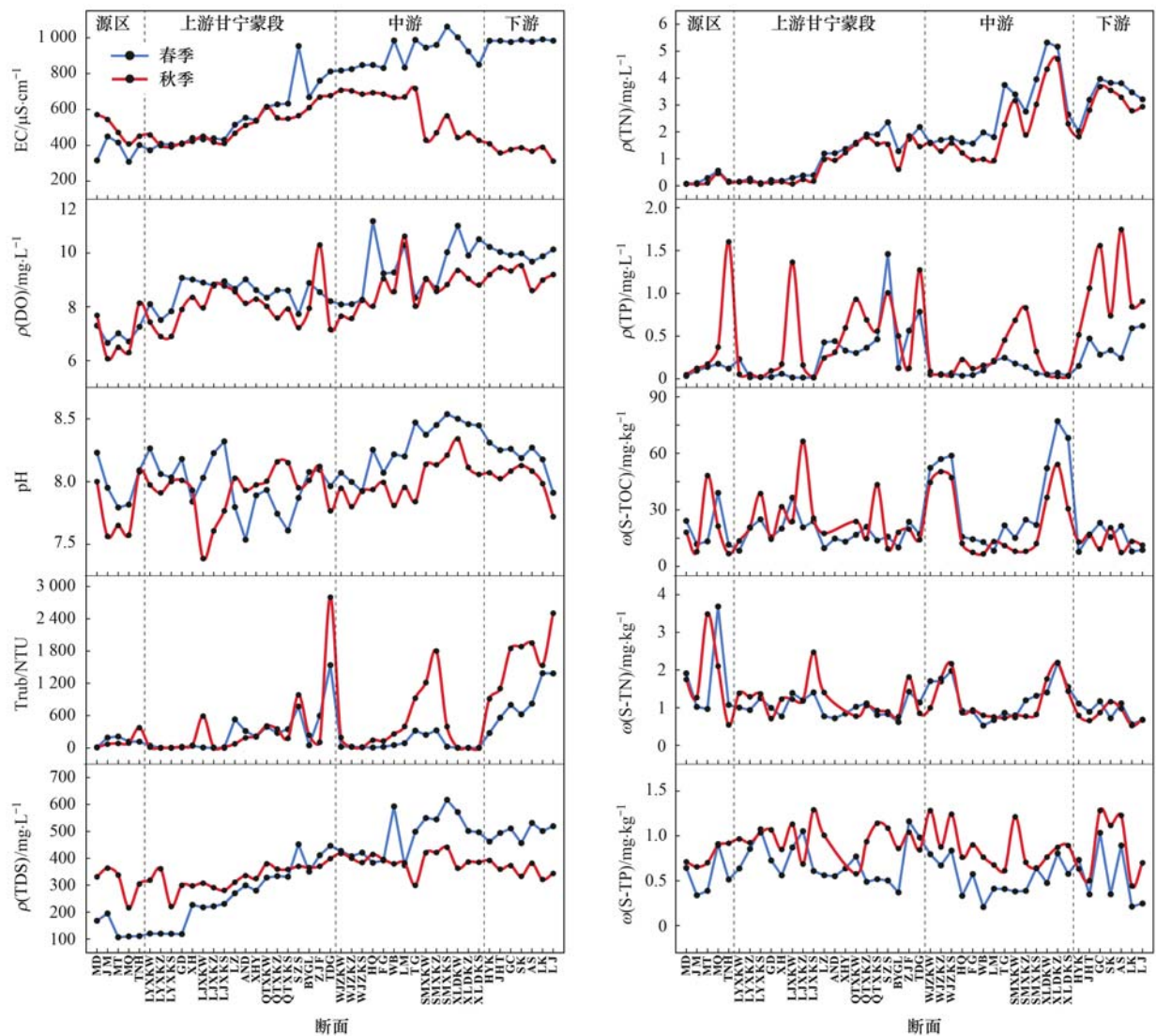
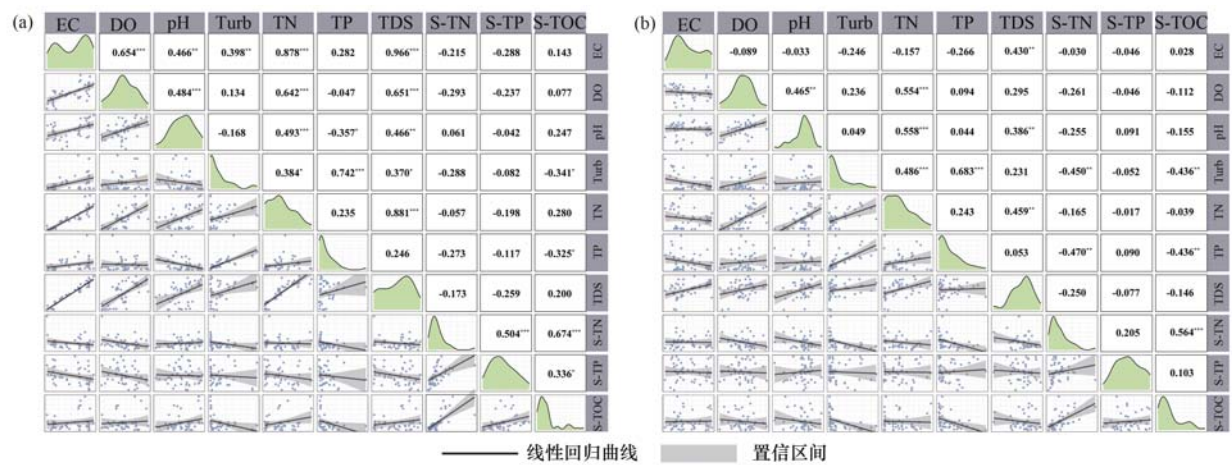


图 2 黄河各环境参数浓度时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal variation in environmental parameter concentration of each sample point in the Yellow River



(a) 春季, (b) 秋季; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 3 黄河各环境参数之间相关性热图

Fig. 3 Heatmap of correlations among environmental parameters in the Yellow River

“优秀”,上游甘宁蒙水质变化差异较大(50 ~ 100), 中游及下游 WQI 值主要集中于 50 ~ 70. 同时,龙羊峡、刘家峡、万家寨和小浪底这 4 个水库的 WQI 值较高于邻近的自然河段.

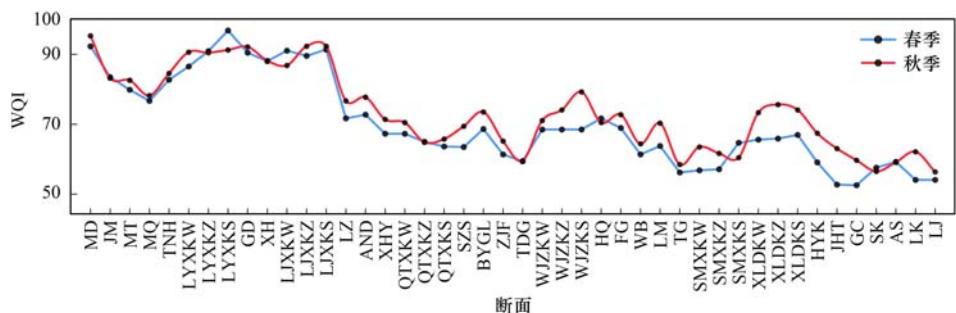


图 4 黄河水质指数 (WQI) 值时空分布

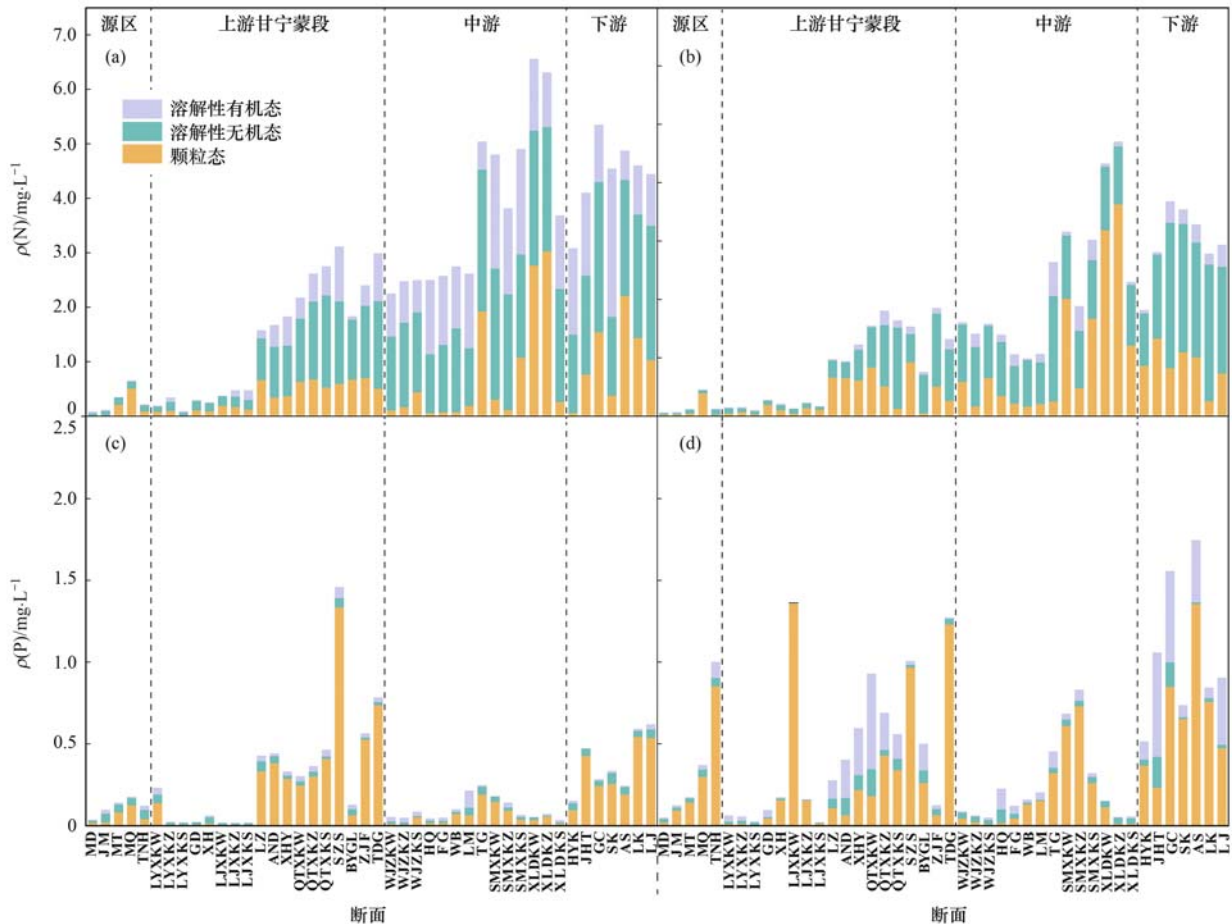
Fig. 4 Spatiotemporal distribution of WQI values in the Yellow River

2.2 黄河氮、磷浓度的时空变化

从氮的不同赋存形态来看[图 5(a)和 5(b)],黄河水体中氮是以溶解态为主,且有机氮占比最高,秋季有机态氮显著下降.春秋两季黄河中氮的总浓度在兰州以上较低,且无明显的差异,而在兰州之后浓度显著升高,并在此之后呈现出逐渐升高的趋势.从磷的不同赋存形态来看[图 5(c)和 5(d)],黄河水体中颗粒态的磷占据绝对优势;在兰州—昭君坟段以及黄河的下游段,秋季有机态的磷含量占比相比于春季有所升高.两次调查期间,磷含量较高的断面均主

要集中于兰州—昭君坟段以及黄河的下游段.

结合黄河水体氮、磷及其形态的时空变化特征(图 6),可以看出,两个季度中,溶解态和颗粒态氮都与总氮存在显著的正相关性.相比于春季,秋季的溶解态氮与总氮间的相关性下降,而颗粒态的相关性升高.对于磷,溶解性磷与总磷也存在一定的相关性,但相比于溶解态氮与总氮,相关系数小得多,而两个季度中颗粒态磷与总磷存在极显著的正相关关系.两个季度颗粒态磷与总磷的相关系数均较高,说明悬浮颗粒物吸附态的磷是黄河水体中磷的主要贡



(a)和(b): 春季,(c)和(d): 秋季

图 5 黄河水体中氮、磷浓度时空变化

Fig. 5 Spatiotemporal variation in nitrogen and phosphorus concentrations in the water of the Yellow River

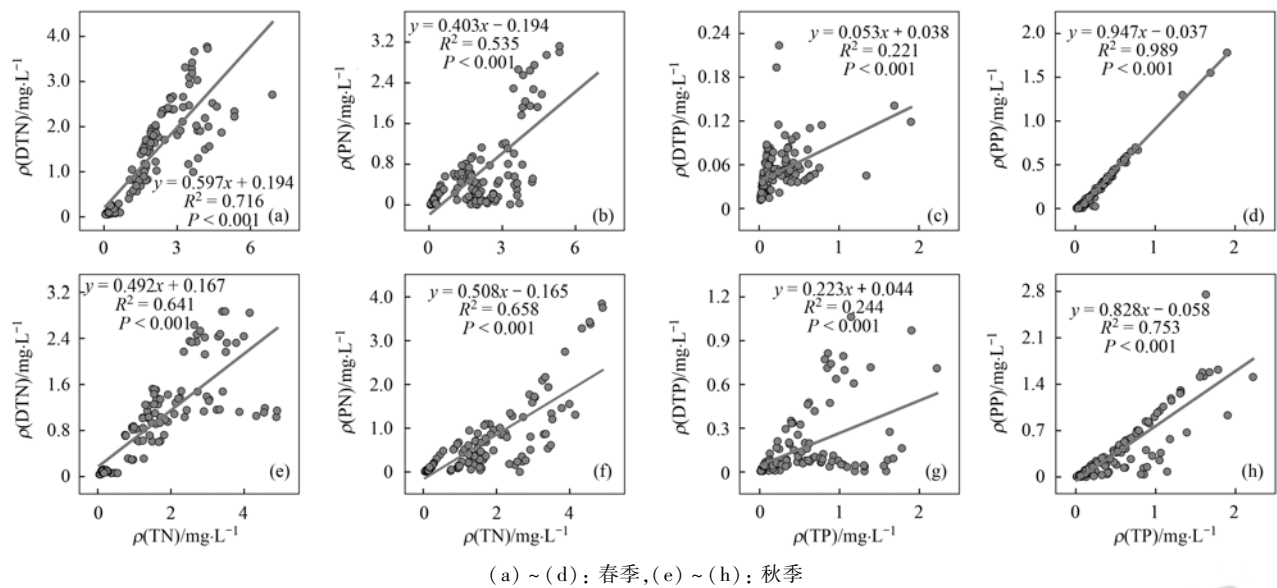


图 6 氮、磷不同赋存形态相关性分析

献者.

2.3 黄河氮、磷负荷

由氮、磷负荷时空分布可知(图 7):在时间上,氮负荷秋季高于春季,磷负荷秋季高于春季.在空间上,氮负荷呈现出:下游 > 中游 > 上游甘宁蒙段 > 源区的规律,磷负荷呈现出:下游 > 上游甘宁蒙段 > 中游 > 源区的规律.黄河中游段的磷负荷相比于上游甘宁蒙段有所下降,在下游花园口处逐渐上升.氮磷

负荷均于兰州开始显著升高,这与总氮和总磷浓度变化规律相符合.

由图 8 可知,农业与工业对氮负荷有着显著地影响,并且农业相比于工业有着更为显著的影响.此外,秋季农业对氮负荷的影响比春季更高.而农业与工业无论在春季与秋季对于磷的贡献都极小.由图 9 可知,氮负荷与农业、工业均呈显著正相关,从时间上看,两个季度农业与氮负荷的显著性均高于工

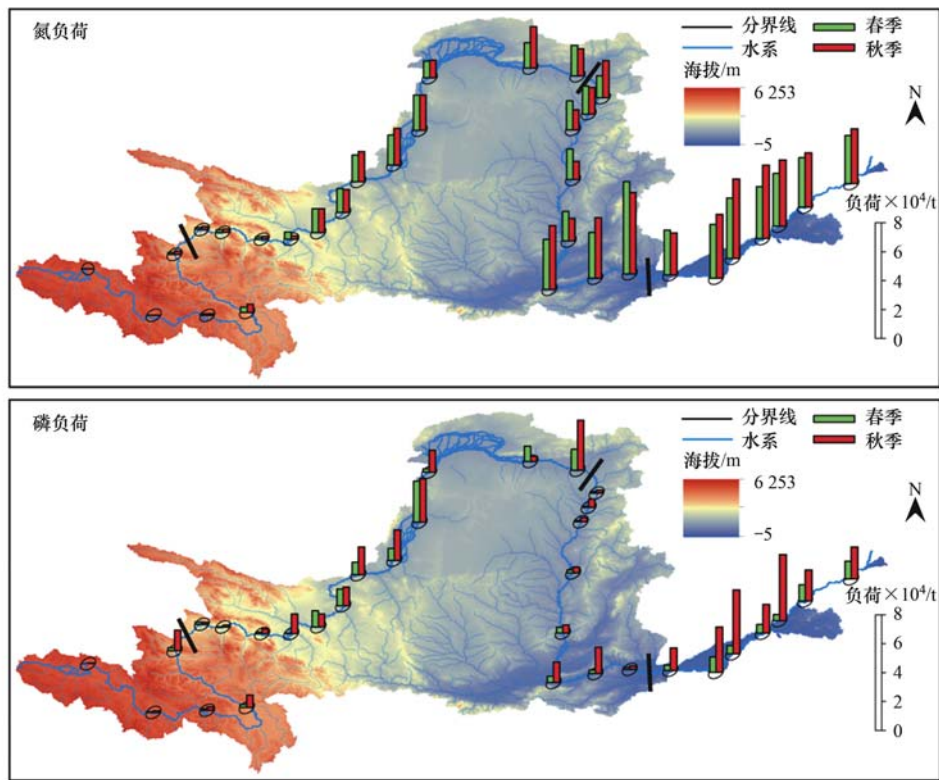
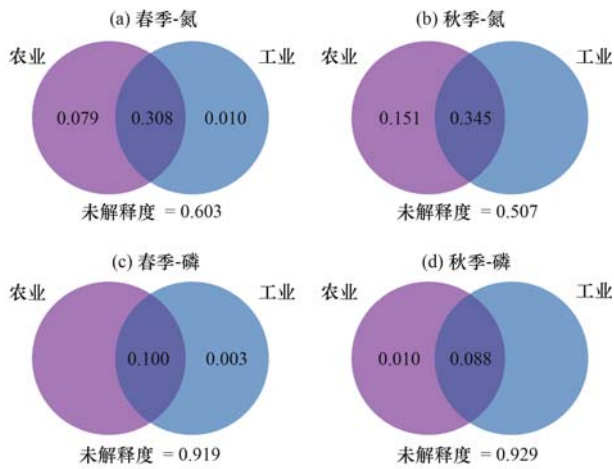


图 7 调查期间黄河水体中氮和磷负荷时空分布

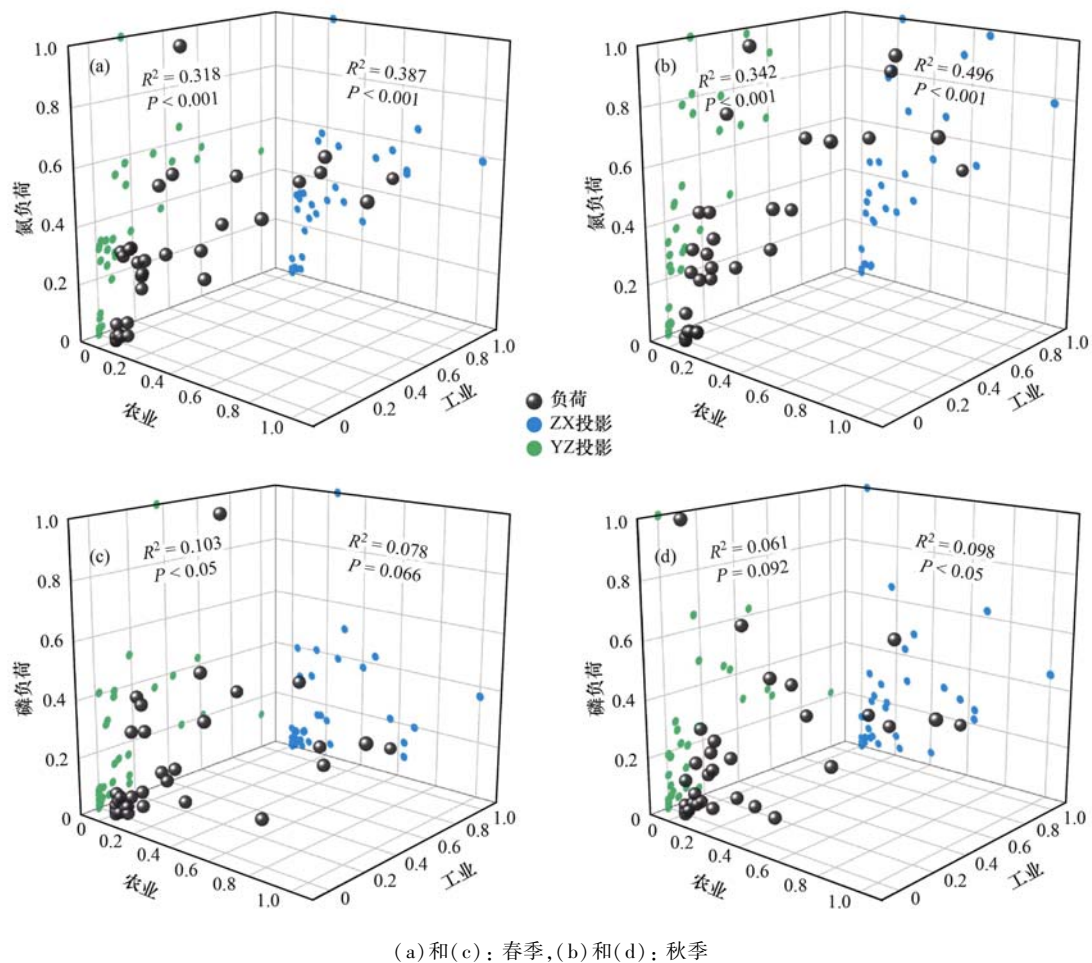
Fig. 7 Spatiotemporal distribution of nitrogen and phosphorus loads in the water of the Yellow River during the survey



解释度小于0的未显示

图8 黄河氮磷负荷与工农业的变差分解

Fig. 8 Variation partitioning of nitrogen and phosphorus loads and industry and agriculture in the Yellow River



(a)和(c): 春季, (b)和(d): 秋季

图9 氮磷负荷与工农业相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of nitrogen and phosphorus loads with industry and agriculture

是因为水体中扰动较强时,浊度增大,此时沉积物中碳氮磷再悬浮释放较多^[29],水体中碳氮磷浓度升高.因此,水中碳氮磷的浓度与沉积物中的含量的负相关关系也会在秋季更显著.

业.而磷负荷与农业、工业之间不存在显著的关系.

3 讨论

黄河作为我国重要的水源地,其流域状况一直备受关注,通过对黄河干流自然河道与水库调查显示,其水环境特征与氮磷负荷均表现出时空差异.黄河干流从源区至河口多个参数整体呈逐渐上升的趋势,水库的浊度相对于黄河干流河道较低,这是因为水库相比于自然河道流速低,泥沙易沉降淤积^[27].且刘家峡、万家寨和小浪底水库沉积物中总氮含量是临近自然河段的1.5~2倍,总有机碳含量是临近自然河段的2~3倍,这也是因为水库相比河流对溶质的截留与沉积具有更加显著的效果^[28],导致水库中沉积物的碳和氮含量相对高于自然河段中的含量.而黄河沉积物中的总氮和总有机碳含量与水体中总磷浓度以及水体浊度呈显著负相关,这可能

综合多个水质参数对黄河水质进行了分析与评价.根据WQI值,黄河水质两个季度差异较小,而在空间上存在差异性.2019年春秋两季黄河干流水质等级由源区至河口呈逐渐下降趋势,其中,黄河源区

段以及上游刘家峡水库以上区域水质等级为“优秀”。而从兰州断面开始 WQI 值出现明显的下降,这是因为从此处出现了黄河流域内第一个较大规模的城市,人为影响加重。而黄河中下游的水质逐渐下降,基本处于“一般”等级,这可能是中下游黄河流域内水土流失加剧^[30]以及点源排放增多^[31]所导致的。同时,龙羊峡、刘家峡、万家寨和小浪底这 4 个水库的 WQI 值较高于邻近的自然河段,也表明了水库可以截留与沉积水中溶质,对水质具有一定的清洁作用。本研究中 2019 年春秋两季黄河干流总体水质较好,水质的结果整体上与水质生物评价结果相符合^[21]。

季节上,氮磷负荷都存在着显著的差异,这是因为河流中氮磷一般主要来自于点源与面源,点源的输入随季节气候的变化差异较小。在雨季期间,降雨是面源污染的主要驱动力^[32],降水形成地表径流携带更多的氮磷元素入河是导致秋季氮磷负荷更高的主要原因^[33]。黄河流域内季节性降水变化差异显著,降雨量呈现出春夏下降、秋季增加的规律^[34],其降雨主要集中于 7~10 月,占全年降雨量的 60%~80%^[35]。本研究中两个季度颗粒态氮差异较小,而秋季溶解性氮的占比比重下降,且其与总氮间的相关性下降,这是由于秋季流域内拥有较高的流量,随着黄河流量的增大,氮浓度则逐渐减小^[36],此时水量稀释作用对其质量浓度产生了明显影响。而秋季有机态磷升高,这可能与农田中有机肥和有机农药进入水体中有关^[37]。因此,降雨引起的径流量变化是黄河流域内氮磷赋存形态及其负荷具有季节性差异的关键因素。

氮磷的输入除了受降雨影响,还与流域内氮磷的来源有关。本文研究发现,黄河流域内工业点源与农业面源对氮素的输入具有关键的影响,工农业作用的加剧是导致氮负荷从源区至河口逐渐升高的原因。但农业与工业对黄河磷负荷贡献均不明显,这是因为黄河流域总磷的输送主要受流域土壤侵蚀的影响^[16],流域降雨径流在汇入河流的过程中,磷大部分是吸附在泥沙颗粒上运移进入到河流的^[38]。相关性分析也表明了黄河总磷与浊度有着极显著的正相关性,两个季度颗粒态磷与总磷之间均存在极显著的正相关关系,且颗粒态磷为磷的主要赋存形态^[39]。因此,受河流泥沙的干扰,黄河水体中磷负荷未观察到与工农业之间的明显规律,这与以往研究相似^[40]。同时,本研究中黄河中游的磷负荷低于上游甘宁蒙段与下游,与马永星等^[16]的研究相似,此种现象可能是由以下原因造成的。本研究所测得磷含量为静置后水体上清液中含量^[22],以往研究可

知,当悬移质泥沙粒径小于 0.15 mm 时,粒径越小则吸附能力越强^[41,42],此时悬移质吸附磷越多,则水中磷含量越少。而黄河中游悬移质泥沙粒径主要分布在 0.038 mm 以下^[43],下游悬移质泥沙粒径主要分布在 0.03~0.05 mm^[44],而由图 5(d)也可知,颗粒态的磷在黄河中游总磷中占比高于上游甘宁蒙段以及下游。而以往的研究也表明了,黄河中磷的输入主要被颗粒物吸附后沉积到河床或库区^[45],导致中游水体中磷含量较低。因此,黄河流域内氮磷赋存形态及其负荷所具有的空间差异性主要受控于人类活动与水土流失的影响。

4 结论

(1) 从源区至河口多个参数逐渐上升的趋势反映了越来越频繁的人类活动以及中下游水土流失等的共同作用,同时,水库对溶质的截留与沉积具有较为显著的效果。

(2) 两个季节水质差异较小,从源区至河口水质等级由“优秀”下降至“一般”。

(3) 降雨的影响是黄河流域内氮磷赋存形态及其负荷具有季节性差异的关键因素,而黄河流域内氮磷赋存形态及其负荷所具有的空间差异性主要受控于人类活动与水土流失的影响。

参考文献:

- [1] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(4): 464-475.
- [2] Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 7-21.
- [3] Ouyang Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis[J]. *Water Research*, 2005, 39(12): 2621-2635.
- [4] Zeinalzadeh K, Rezaei E. Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 13: 1-10.
- [5] Hale R L, Grimm N B, Vörösmarty C J, et al. Nitrogen and phosphorus fluxes from watersheds of the northeast U. S. from 1930 to 2000: role of anthropogenic nutrient inputs, infrastructure, and runoff[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(3): 341-356.
- [6] 王国庆,王云璋,史忠海,等. 黄河流域水资源未来变化趋势分析[J]. *地理科学*, 2001, 21(5): 396-400.
Wang G Q, Wang Y Z, Shi Z H, et al. Analysis on water resources variation tendency in the Yellow River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(5): 396-400.
- [7] 潘保柱,韩谓. 长江与黄河两大流域水生态问题剖析[J]. *风景园林*, 2020, 27(8): 18-23.
Pan B Z, Han X. Analysis of aquatic ecological issues in the Yangtze and Yellow River basins[J]. *Landscape Architecture*, 2020, 27(8): 18-23.
- [8] Hou W, Sun S H, Wang M Q, et al. Assessing water quality of

- five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China: using a water quality index method [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **61**:309-316.
- [9] Zhao M M, Wang S, Chen Y, *et al.* Pollution status of the Yellow River tributaries in middle and lower reaches [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137861.
- [10] 林春英, 李希来, 张玉欣, 等. 黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3971-3984.
- Lin C Y, Li X L, Zhang Y X, *et al.* Responses of different degradation stages of alpine wetland on soil microbial community in the Yellow River source zone [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3971-3984.
- [11] Zhu Y C, Wang L J, Zhao X Y, *et al.* Accumulation and potential sources of heavy metals in soils of the Hetao area, Inner Mongolia, China [J]. *Pedosphere*, 2020, **30**(2): 244-252.
- [12] 苏茂林. 黄河水资源管理制度建设与流域经济社会的可持续发展 [J]. *人民黄河*, 2015, **37**(11): 1-3, 7.
- Su M L. Water resources management system construction and sustainable socioeconomic development of the yellow river basin [J]. *Yellow River*, 2015, **37**(11): 1-3, 7.
- [13] Tao Y, Wei M, Ongley E, *et al.* Long-term variations and causal factors in nitrogen and phosphorus transport in the Yellow River, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **86**(3): 345-351.
- [14] Liu S M, Li L W, Zhang G L, *et al.* Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **430-431**: 103-110.
- [15] Gong Y, Yao Q Z, Yu Z G. Impact of the water-sediment regulation and a rainstorm on nutrient transport in the Huanghe River [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, **32**(1): 140-147.
- [16] 马永星, 臧家业, 车宏, 等. 黄河干流营养盐分布与变化趋势 [J]. *海洋与湖泊*, 2015, **46**(1): 140-147.
- Ma Y X, Zang J Y, Che H, *et al.* Trend and distributions of nutrient elements in the Huanghe (Yellow) River [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, **46**(1): 140-147.
- [17] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究 [J]. *水利学报*, 2019, **50**(10): 1231-1241.
- Zhou S, Wang Y M, Chang J X, *et al.* Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(10): 1231-1241.
- [18] 陈静生, 王飞越, 何大伟. 黄河水质地球化学 [J]. *地学前沿*, 2006, **13**(1): 58-73.
- Chen J S, Wang F Y, He D W. Geochemistry of water quality of the Yellow River basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(1): 58-73.
- [19] 高吉喜, 王永财, 侯鹏, 等. 近 20 年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究 [J]. *水利学报*, 2020, **51**(9): 1157-1164.
- Gao J X, Wang Y C, Hou P, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of land surface water area in the Yellow River basin in recent 20 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(9): 1157-1164.
- [20] 陈怡平, 傅伯杰. 黄河流域不同区段生态保护与治理的关键问题 [N]. *中国科学报*, 2021-03-02(07).
- [21] 丁一桐, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 黄河干流全河段浮游植物群落特征与水质生物评价 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 891-901.
- Ding Y T, Pan B Z, Zhao G N, *et al.* Phytoplankton in the mainstream of the Yellow River: community characteristics and bioassessment of water quality [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 891-901.
- [22] 李家科, 李怀恩, 刘健, 等. 多泥沙河流水质监测方法探讨 [J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23**(9): 173-178.
- Li J K, Li H E, Liu J, *et al.* Study on the water quality monitoring for water sample from sediment-laden stream [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(9): 173-178.
- [23] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [24] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River [J]. *Water Research*, 2000, **34**(11): 2915-2926.
- [25] Koçer M A T, Sevgili H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **36**: 672-681.
- [26] Xia X H, Yang Z F, Huang G H, *et al.* Nitrification in natural waters with high suspended-solid content: A study for the Yellow River [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(8): 1017-1029.
- [27] 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2137-2148.
- Shi P C, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatial-temporal distribution of suspended solids and its sedimentation flux and nutrients effects in Xin'anjiang Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2137-2148.
- [28] Kaushik A, Kansal A, Santosh, *et al.* Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: Assessment by metal enrichment factor of the sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(1): 265-270.
- [29] 郑西来, 张俊杰, 陈蕾. 再悬浮条件下沉积物内源磷迁移-转化机制研究进展 [J]. *水科学进展*, 2013, **24**(2): 287-295.
- Zheng X L, Zhang J J, Chen L. Advances in the study of migration and transformation mechanisms of endogenous phosphorus via sediment resuspension [J]. *Advances in Water Science*, 2013, **24**(2): 287-295.
- [30] Zhao H G, Tang Y Y, Yang S T. Dynamic identification of soil erosion risk in the middle reaches of the Yellow River Basin in China from 1978 to 2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(2): 175-192.
- [31] Wen Z D, Song K S, Shang Y X, *et al.* Natural and anthropogenic impacts on the DOC characteristics in the Yellow River continuum [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117231.
- [32] Chen C L, Gao M, Xie D T, *et al.* Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small agricultural catchment in the Three Gorges Region [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(4), doi: 10.1007/s10661-016-5260-0.
- [33] 夏星辉, 王君峰, 张翎, 等. 黄河泥沙对氮迁移转化的影响及环境效应 [J]. *水利学报*, 2020, **51**(9): 1138-1148.
- Xia X H, Wang J F, Zhang L, *et al.* Effects and environmental implications of suspended sediment on the transportation and transformation of nitrogen in the Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(9): 1138-1148.
- [34] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征 [J]. *水利学报*, 2020, **51**(9): 1048-1058.

- Huang J P, Zhang G L, Yu H P, *et al.* Characteristics of climate change in the Yellow River basin during recent 40 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(9): 1048-1058.
- [35] Yang T, Xu C Y, Shao Q X, *et al.* Temporal and spatial patterns of low-flow changes in the Yellow River in the last half century [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, **24**(2): 297-309.
- [36] Chen Y P, Fu B J, Zhao Y, *et al.* Sustainable development in the yellow river basin: issues and strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121223.
- [37] 曾阿妍, 郝芳华, 张嘉勋, 等. 内蒙古农业灌区夏、秋浇的氮磷流失变化[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(5): 838-844.
- Zeng A Y, Hao F H, Zhang J X, *et al.* Nitrogen & phosphorus losses caused by the summer & fall irrigation runoff in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(5): 838-844.
- [38] Schilling K E, Kim S W, Jones C S. Use of water quality surrogates to estimate total phosphorus concentrations in Iowa rivers [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, **12**: 111-121.
- [39] 赵瞰, 贾雁翔, 姜兵琦, 等. 黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3666-3672.
- Zhao T, Jia Y X, Jiang B Q, *et al.* Distribution of different phosphorus species in water and sediments from Gaocun to Lijin reaches of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3666-3672.
- [40] 孟伟, 于涛, 郑丙辉, 等. 黄河流域氮磷营养盐动态特征及主要影响因素 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(12): 2046-2051.
- Meng W, Yu T, Zheng B H, *et al.* Variation and influence factors of nitrogen and phosphorus transportation by the Yellow River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(12): 2046-2051.
- [41] 秦宇, 王紫薇, 韩超. 悬移质泥沙粒径对磷吸附的影响 [J]. *中国给水排水*, 2017, **33**(7): 80-83.
- Qin Y, Wang Z W, Han C, *et al.* Effect of different size of suspended sediment on adsorption of phosphorus [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, **33**(7): 80-83.
- [42] Yao Q Z, Du J T, Chen H T, *et al.* Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(4): 3385-3398.
- [43] 胡国华, 赵沛伦, 肖翔群. 黄河泥沙特性及对水环境的影响 [J]. *水利水电技术*, 2004, **35**(8): 17-20.
- Hu G H, Zhao P L, Xiao X Q, *et al.* Sediment characteristics of Yellow River and their influence on water environment [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2004, **35**(8): 17-20.
- [44] 薛博文, 张向萍, 许琳娟, 等. 黄河下游河道泥沙粒径变化对小浪底水库调水调沙的响应规律 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, **41**(2): 55-62.
- Xue B W, Zhang X P, Xu L J, *et al.* Response law of sediment diameter change in the lower Yellow River to water and sediment regulation in Xiaolangdi reservoir [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, **41**(2): 55-62.
- [45] Pan G, Krom M D, Zhang M Y, *et al.* Impact of suspended inorganic particles on phosphorus cycling in the Yellow River (China) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(17): 9685-9692.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)