

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事	(522)
《环境科学》征稿简则	(722)
信息	(748, 899, 924)

张家口清水河拦沙坝对磷输移-滞留的影响

王维^{1,2}, 李叙勇^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 磷在河流中的输移-滞留过程是河流生态系统中营养物质循环的基本组成,也是评价河流生态系统健康的重要指标之一。为探究拦沙坝对磷输移-滞留过程的影响,选取张家口清水河流域内拦沙坝河段为研究区域,在4个代表性断面对地表水中各形态磷质量浓度和径流过程进行监测,并收集当地实时降雨数据。结果表明:① 拦沙坝下游与上游的总磷(TP)、总溶解态磷(TDP)、总颗粒态磷(TPP)和悬浮物(TSS)的质量浓度平均值之比分别为50%、79%、47%和58%,表明拦沙坝对磷和泥沙有明显的滞留作用。② 在非降雨期TP、TDP和TPP在拦沙坝河段表现为滞留,而在降雨期TP、TDP和TPP在拦沙坝河段既有滞留也有输移,其中发生滞留的降雨场次占总降雨场次之比分别为63.6%、9%和81.8%,拦沙坝对磷的输移-滞留过程受降雨事件的时间间隔、持续时间和强度影响。③ 在单次降雨或连续降雨的降雨量超过56 mm后,拦沙坝对磷滞留作用明显下降。

关键词: 磷; 输移; 滞留; 拦沙坝; 空间变化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0681-07 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202006160

Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City

WANG Wei^{1,2}, LI Xu-yong^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The transport and retention of phosphorus is a key process in nutrient cycling in river ecosystems and one of the main indicators used to evaluate river health. To explore the effect of check dams on the transport and retention of phosphorus, water samples were collected from four representative monitoring sections of a check-dammed reach of the Qingshui River in Zhangjiakou City. Various forms of phosphorus and runoff process were monitored, and local real-time rainfall data were also collected. The results showed that: ① The average concentration ratios of total phosphorus (TP), total dissolved phosphorus (TDP), total particulate phosphorus (TPP), and total suspended solids (TSS) downstream to upstream of the dam were 50%, 79%, 47%, and 58%, respectively, indicating that the check dam has a retention effect on phosphorus and sediment. ② During non-rainfall periods, TP, TDP, and TPP were retained in the check dam reach, while these forms of phosphorus were both retained and transported in the check dam reach during period of rainfall; the ratio of TP, TDP, and TPP retaining rainfall events to total rainfall events was 63.6%, 9%, and 81.8%, respectively, indicating that the transport-retention process was affected by the time interval, duration, and intensity of rainfall events. ③ When a single rainfall event or continuous event exceeded 56 mm, the retention effect of the check dam notably decreased.

Key words: phosphorus; transport; retention; check dam; spatial variation

磷是河流生态系统的必要元素,也是引发水体富营养化的重要原因^[1]。拦沙坝能拦蓄从上游下泄的泥沙,导致河水的含沙量在流过拦沙坝后变小。由于河流中磷质量浓度与水体含沙量具有显著正相关性^[2],所以拦沙坝附近往往是磷富集区^[3],这使得拦沙坝对磷具有一定的滞留作用。目前,研究水坝或拦沙坝对磷滞留的工作主要集中在湖泊和大型河流系统^[4],国内以黄河和长江为主^[5,6],国外集中在欧洲^[7]和北美地区^[8],研究山区支流中拦沙坝对磷滞留的机制和有效性的成果相对较少。山区支流受降雨-径流影响严重,容易形成富含磷的山洪,引发河流下游水体富营养化,所以研究拦沙坝对磷的滞留作用对于降低山区支流汇入的河流富营养化风险具有理论和实践意义。

清水河为典型的山区性河流,流域内植被稀疏,水土流失严重,径流含沙量高。为防止下游城市景

观河道淤积,在清水河河道内修筑有多道拦沙坝。因上游流域土壤侵蚀、农业非点源污染输入以及规模化养殖场,导致清水河水体中磷质量浓度较大。本文以清水河干流拦沙坝为研究对象,探究拦沙坝对磷输移-滞留过程的影响及其调控机制。本文主要讨论以下3个问题:①拦沙坝是否对磷有滞留作用;②不同降雨事件中拦沙坝拦截磷的效果对比;③拦沙坝对磷滞留失效的临界降雨量。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

清水河是洋河的主要支流之一,为典型的山区

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771531)

作者简介: 王维(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为流域生态系统模型, E-mail: weiwang_st@rcees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: xlyli@rcees.ac.cn

性河流,全长 109 km,流域总面积2 380 km². 其发源于崇礼区和张北县交接处的桦皮岭,主要有东沟、正沟和西沟三条支流,主干道流经张家口市中心后注入洋河[如图 1(b)]. 西沟汇水区內山区植被稀

少,水土流失严重,径流含沙量较高. 冬、春季节河道内流量较小,夏、秋季节时常暴发山洪. 由于用水增加和气候变化等原因,河道内的水量越来越少,时常有断流发生.

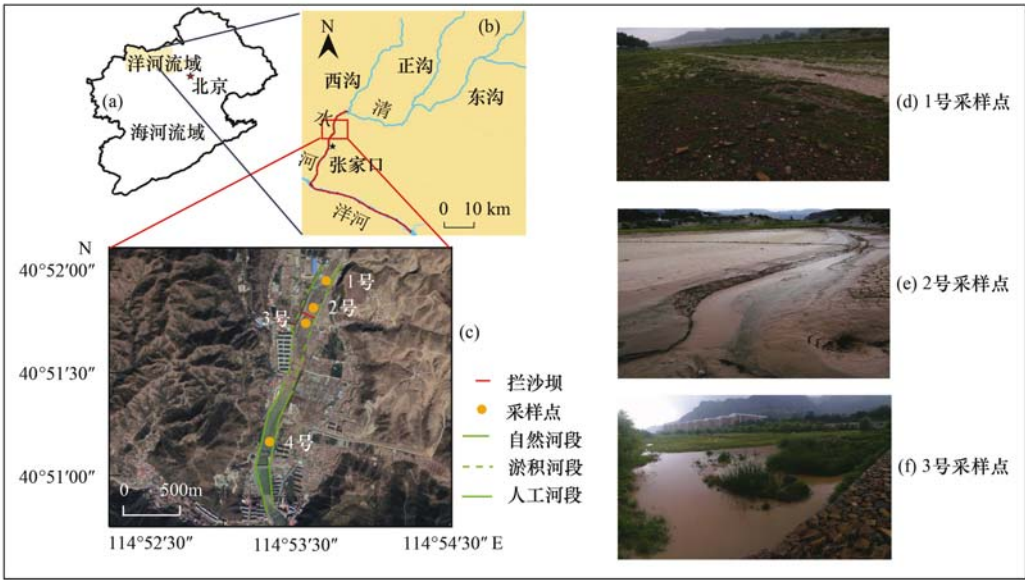


图1 清水河拦沙坝和采样点示意
Fig. 1 Location of the study check dam and monitoring sites in the Qingshui River

自 2008 年以来,清水河完成了大规模的综合整治:在干流河道上修建了拦沙坝和橡胶坝. 目前,该河段的污染主要以上游流域土壤侵蚀和农业非点源污染输入为主,其次还有崇礼区污水处理厂退水的补给和污染输入,以及规模化养殖场的污染影响. 自渠道化以来,该河流就出现严重的泥沙淤积和水体富营养化问题:春夏季大型水生植物(菹草 *Potamogeton crispus*, 沉水植物)和浮游藻类交替繁殖、暴发,严重影响水质健康和城市河流景观.

1.2 样品采集与现场观测

沿清水河拦沙坝河段设置 4 个采样点分别标

记为 1、2、3 和 4 号,其中 1 号点位于拦沙坝上游 0.4 km 处,2 号点位于拦沙坝上游,3 号点位于拦沙坝下游,4 号位于拦沙坝下游 1.4 km 处. 上述采样点间河段特性如表 1 所示,采样点位置如图 1(c) 所示. 从 2019 年 4 月底到 8 月中下旬在河道中泓线处取样,不同流量条件下,河道中泓线位置变化不明显. 在降雨期的雨前、雨中和雨后分别于 4 个采样点采集表层水,在非降雨期,每隔 3 d 分别于采样点采集表层水. 所有采样点均用 2.5 L 有机玻璃采水器采集表层水. 观测期间共采集水样 104 份,每个采样点采集水样 26 份.

表1 各采样点间河段特性

Table 1 Characteristics of the reaches between sampling sites

采样点编号	河段类型	河道宽度 /m	河道深度 /m	表层沉积物中值粒径 /mm	河道植被
1	自然河段	4	0.5	0.007	草地
2	拦沙坝上游河段	15	1.0	0.018	无
3	拦沙坝下游河段	4	0.5	0.014	草地和树林
4	人工硬化河段	90	3.0	0.016	无

1.3 样品处理与数据分析

考虑水体中可沉降固体影响,从混合均匀的水样中取样测定总磷(TP)的质量浓度 C_{TP} . 用 0.45 μm 孔径的玻璃纤维滤膜过滤混合均匀的水样,滤液用于测定总溶解态磷(TDP)的质量浓度 C_{TDP} ,滤膜用于测定总悬浮颗粒物(TSS)的质量浓度 C_{TSS} . 水样分析前在 4℃ 条件下保存不超过 30 h, TP、

TDP 和 TSS 的质量浓度测定采用标准方法^[9,10]. 水样中总颗粒态磷(TPP)的质量浓度 C_{TPP} 等于 C_{TP} 与 C_{TDP} 之差. 降雨量由放置于 4 号采样点的美国 ONSET HOBO 雨量计获得,各采样点流量数据由 OTT ADC 便携式声学流速仪在现场获得. 在采集水样一个月内,使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪分析水样中沉积物中值粒径.

根据质量守恒,将河段的流入断面与流出断面的日磷通量(M)的差值称为此河段磷日滞留量(M_R),计算方法见式(2).将 M_R 与1号采样点磷通量(M_1)称为此河段日滞留率(R_p),计算方法见式(3):

$$M = 0.001 \times C \times Q$$

(1)

$$M_R = M_{in} - M_{out}$$

(2)

$$R_p = 100 \times \frac{M_R}{M_1}$$

(3)

式中, C 为水样中磷的质量浓度,单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q 为采样点日流量,单位为 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; M_R 为河段的日滞留量,单位为 $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$, M_{in} 是河段流入断面的日磷通量, M_{out} 则是河段流出断面的日磷通量, M_1 为1号采样点的日磷通量; R_p 为河段的日滞留率,单位为%. M_R 和 R_p 为正表示磷滞留于该河段, M_R 和 R_p 为负表示磷流出该河段.

2 结果与分析

2.1 拦沙坝对磷的滞留作用

各采样点的 TP、TPP、TDP 和 TSS 质量浓度平

均值和离散程度如表 2 和图 2 所示,可以看出自然河段(1号)TP、TPP、TDP 和 TSS 的质量浓度平均值均高于拦沙坝下游河段(3号),拦沙坝上游河段(2号)的 TP、TPP 和 TSS 质量浓度平均值是所有采样点中最大的. 3号 TP、TDP、TPP 和 TSS 的质量浓度平均值分别为 2号的 50%、79%、47%和 58%,表明拦沙坝对颗粒态磷和泥沙具有滞留作用,而对溶解态磷的滞留作用相对较差. 从1号到人工硬化河段(4号),TP、TPP 和 TSS 的质量浓度平均值先变大后变小,显示出拦沙坝影响了磷在河流纵向上的输移-滞留过程,磷质量浓度在河流纵向的分布不满足连续河流的质量浓度指数变化^[11],而接近于非连续河流的质量浓度突变模型^[12]. 从 TPP 在 TP 中的占比来看,2号的占比最大,1号略大于3号,4号的占比最小,从1号到3号 TPP 在 TP 中的占比减少了 0.9%,从3号到4号 TPP 在 TP 的占比减少了 21.4%. 从各采样点 TDP 在 TP 中的占比来看,2号的占比最小,1号略小于3号,4号的占比最大. 从1号到3号 TDP 在 TP 中的占比增加了 0.9%,从3号到4号 TDP 在 TP 的占比增加了 21.4%.

表 2 水体各形态磷质量浓度及总悬浮颗粒物质量浓度

Table 2 Concentrations of phosphorus contents and total suspended solids at each sampling site

采样点 编号	站位介绍	TP (Mean ± SD) /mg·L ⁻¹	TPP (Mean ± SD)		TDP (Mean ± SD)		TSS (Mean ± SD) /mg·L ⁻¹
			/mg·L ⁻¹	占 TP/%	/mg·L ⁻¹	占 TP/%	
1	自然河段	0.51 ± 0.38	0.44 ± 0.35	85.4 ± 10.4	0.07 ± 0.06	14.6 ± 10.5	499.75 ± 268.44
2	拦沙坝上游河段	0.64 ± 0.52	0.60 ± 0.51	87.9 ± 7.2	0.06 ± 0.04	12.1 ± 7.2	740.19 ± 396.2
3	拦沙坝下游河段	0.33 ± 0.36	0.28 ± 0.35	84.5 ± 15.5	0.05 ± 0.05	15.5 ± 1.32	425.91 ± 391.77
4	人工硬化河段	0.16 ± 0.11	0.11 ± 0.08	63.1 ± 14.9	0.06 ± 0.04	36.9 ± 14.9	38.32 ± 18.71

利用式(1)和式(2)分别计算从1号到3号河段内 TP、TPP 和 TDP 的日滞留量(M_R)和日滞留率(R_p),结果如图 3 所示. 从1号流入拦沙坝河段的 TP 和 TPP 平均每日分别有 29.7% 和 30% (即分别为 5.54 kg 和 4.87 kg)滞留于拦沙坝内, TDP 平均每日有 30% (即 0.28 kg)从拦沙坝内流出. TP 和 TPP 日滞留量绝对值大于 TDP,但是 TDP 日滞留率绝对值大于 TP 和 TPP. 从计算结果看出 TDP 日滞留量 60% 为正,均发生在非降雨期; 40% 为负,均发生在降雨期. TPP 日滞留量 80% 为正,降雨期和非降雨期均会发生; 20% 为负,均发生在降雨期. 随着降雨结束, TDP 和 TPP 日滞留量逐日增加. 降雨期的 TDP 和 TPP 变化较为复杂,一般来说降雨强度越大, TDP 和 TPP 日滞留量越低,降雨持续时间越长, TDP 和 TPP 日滞留量越低. 对比 TDP 和 TPP 日滞留率,降雨事件对 TDP 的影响更显著.

2.2 不同降雨事件中拦沙坝磷滞留效果对比

降雨-径流过程对山区河流的磷输运-滞留过程有重要影响,降雨-径流过程的时间间隔、持续时间

和强度影响了河流中悬浮颗粒物的粒径和磷的形态组成,决定了河道中悬浮颗粒物和磷的输移量和输移距离^[13]. 从图 3 可以看出,拦沙坝对 TP、TDP 和 TPP 的滞留过程明显受降雨-径流影响. 在无降雨条件下, TP、TDP 和 TPP 在拦沙坝河段滞留量皆为正值,而统计不同降雨事件拦沙坝处(1~3号)磷滞留量和滞留率(见表 3)可以发现, TP、TDP 和 TPP 在拦沙坝处滞留量为正的场次占比分别为 63.6%、9%和 81.8%,这表明降雨-径流过程降低了拦沙坝对 TP、TDP 和 TPP 的滞留作用.

在不同降雨事件中,拦沙坝对 TDP 和 TPP 输运-滞留特性有不同的影响. 降雨一般会导致 TDP 从拦沙坝区域释放(即日滞留量小于零),在连续降雨期(从 7月 16~29日)随着降雨历时增加 TDP 的释放量先增加后减少,在非连续降雨期 TDP 的释放量随降雨强度的增加而增加. 相比而言,连续降雨更容易释放 TDP,短时的强降雨有可能造成 TDP 释放量的极值. 如 7月 18日与 6月 20日降雨历时和降雨强度类似,但前者处于连续降雨中,后者处于非

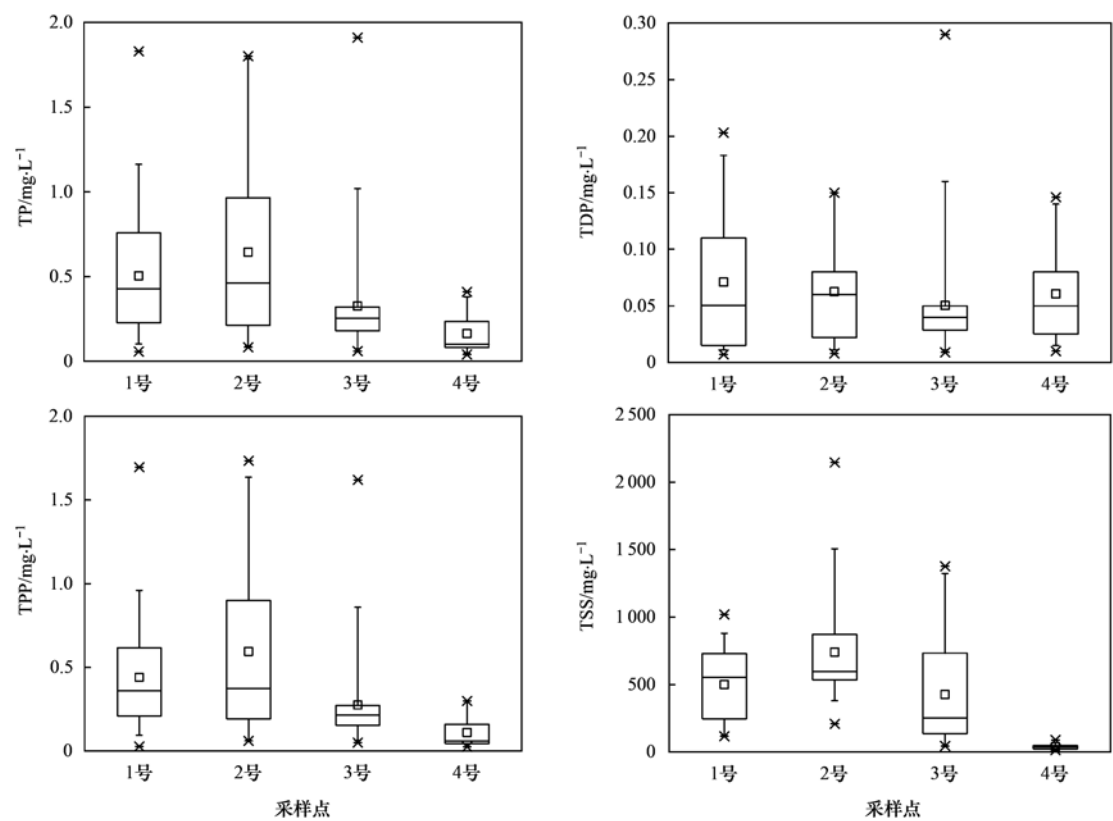
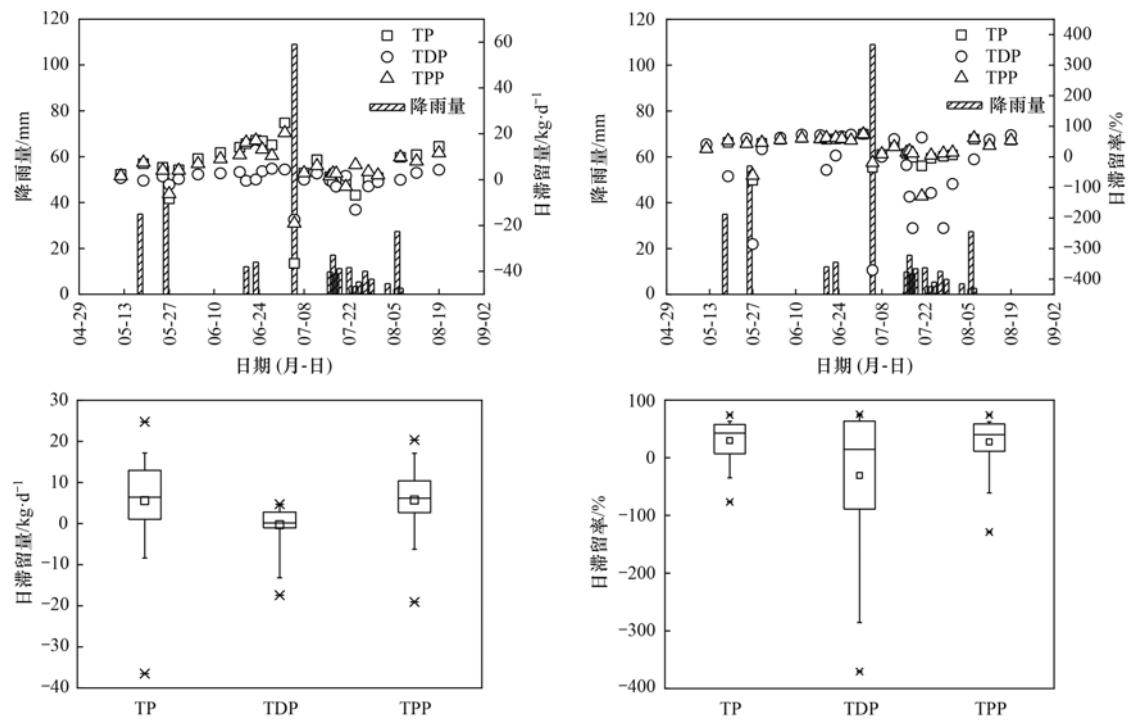


图2 TP、TDP、TPP 和 TSS 质量浓度空间变化
Fig. 2 Spatial variations in TP, TDP, TPP, and TSS



日滞留量和滞留率的正值表示磷滞留,负值表示磷释放,下同
图3 不同形态磷在拦沙坝河段(1~3号)日滞留量和滞留率

Fig. 3 Daily phosphorus retention loads and retention efficiency in the segment along the check dam (from No. 1 to No. 3)

连续降雨中,前者 TDP 的释放量大于后者.

降雨一般会减弱拦沙坝对 TPP 的滞留作用,但是不同降雨事件中 TPP 在拦沙坝的滞留量变化很

大. 连续降雨会显著降低 TPP 在拦沙坝区域的滞留量,非连续降雨中拦沙坝对 TPP 的滞留过程较为复杂,降雨量超过 56 mm 会导致 TPP 从拦沙坝区域释

表3 不同降雨事件磷滞留对比

Table 3 Comparison of phosphorus retention during different rainfall events

事件编号	降雨日期 (月-日)	与上一场 降雨间隔 /d	降雨历时 /h	降雨量 /mm	降雨强度 / $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	TP		TDP		TPP	
						日滞留量 /mg	滞留率 /%	日滞留量 /mg	滞留率 /%	日滞留量 /mg	滞留率 /%
1	05-18	—	18.2	35	1.92	6.97	47.14	-0.46	-63.64	7.43	52.78
2	05-26 ~ 05-27	8	9.43	56	5.94	-8.39	-76.47	-2.15	-285.71	-6.24	-61.05
3	06-20	24	8.2	12	1.46	15.67	57.47	-0.53	-42.86	16.2	62.21
4	06-23	3	10.1	14	1.39	17.18	58.5	0.08	4	17.1	62.27
5	07-05	12	0.83	109	131.33	-36.49	-34.92	-17.42	-370.59	-19.07	-19.11
6	07-16	11	6.2	10	1.67	1.24	10.2	-0.35	-0.35	1.59	14.6
7	07-17	0.5	6.9	17	2.43	1.59	10.31	-1.17	-130.77	2.76	19.05
8	07-18	0.2	6.2	10	1.67	-0.44	-1.77	-3.09	-233.33	2.65	11.21
9	07-22	4	6.8	11	1.62	-1.45	-29.31	1.63	63.33	-3.08	-128.57
10	07-25	3	0.5	5.5	10.8	-6.8	-4.42	-13.18	-118.05	6.38	4.48
11	07-27	2	0.5	9.8	19.6	0.42	1.37	-2.95	-233.33	3.37	11.43
12	07-29	2	3	6.6	2.2	0.85	5.99	-1.05	-88.89	1.9	14.57

放(即日滞留量为负),而降雨量小于 56 mm 会导致 TPP 在拦沙坝区域滞留(即日滞留量为正)。

在降雨事件中,拦沙坝对 TP 的滞留作用受 TDP 和 TPP 共同影响,在非连续降雨中的变化大,在连续降雨中变化小,与 TPP 的变化规律相似。

3 讨论

人工干预对河流中磷输移-滞留过程的影响日益得到重视^[14,15]。磷在河流中的输移-滞留过程是河流生态系统物质循环的基本组成,也是评价河流生态系统健康的主要指标之一^[16]。以往研究主要侧重于磷在湖泊和大型河流中的动态变化,较少研究磷在受人工干预的山区河流中的输移和滞留。本研究选择的清水河是典型的山区河流,研究区中的拦沙坝是典型的人工干预方式。观测结果表现出明显的统计规律:在河流纵向上,TP、TPP 和 TSS 的平均质量浓度先增加后减小,TDP 的平均质量浓度先减小后增加,这种磷质量浓度的纵向分布规律不满足一般河流的指数变化规律^[11]。上述分布规律源自于河流生态系统对拦沙坝改变河流地形地貌、水文条件以及水动力过程所作出的一种综合响应。自然河段、拦沙坝河段和硬化河段在清水河中形成了不同的景观结构[图 1(d)~1(f)],这些景观结构影响磷在河流内的运移、滞留以及生物交换过程。

3.1 拦沙坝对磷有滞留作用

拦沙坝通过改变河流地形地貌、水文和水动力过程,造成大量颗粒物在上游沉降-淤积,由于 TPP 的滞留方式以颗粒物沉降为主^[17],所以拦沙坝对 TPP 有明显的滞留作用。而 TDP 的滞留方式以颗粒物吸附和生物吸收为主^[18,19],拦沙坝附近的高含沙量抑制了水生生物的生长,所以拦沙坝对 TDP 没有明显的滞留作用。表现为从自然河段(1 号采样点)

到拦沙坝上游(2 号采样点)再到拦沙坝下游(3 号采样点)TPP 和 TSS 平均质量浓度先增加后减少,经过拦沙坝的滞留,TPP 和 TSS 的平均质量浓度减少了 50%。而 TDP 平均质量浓度稳步下降,且 TDP 的滞留率低于 TPP。

拦沙坝对 TP 的滞留作用不仅体现在上游的淤积过程,下游形成的浅滩也对 TPP 和 TSS 具有显著的滞留作用。由于拦沙坝的掩护,下游的浅滩不仅免于被过强的水动力冲蚀,而且免于被高含沙水体中过量细颗粒泥沙覆盖表面,同时具有一定的水量和营养物质输入,所以容易成为适于水生生物栖息的生境。从拦沙坝上下游地表植被的类型可以看出[图 1(d)~1(f)],拦沙坝上游自然河段是稀疏的草地,拦沙坝上游淤积区河道内没有植被,而拦沙坝下游河道内有草地和树林。经过拦沙坝下游的浅滩,TPP 的平均质量浓度减少了 50%,TDP 的平均质量浓度增加了 20%。

3.2 拦沙坝对磷的滞留受降雨-径流过程影响

降雨-径流过程对山区河流的磷输运-滞留过程有重要影响,降雨-径流过程的时间间隔、持续时间和强度影响了拦沙坝对磷的滞留。清水河存在明显的水位涨落循环:春季融雪期水位上涨,河道流速和流量变大;随着融雪期结束,降雨稀少,水位不断下降,河道流速和流量降低,河道局部出现断流形成水塘,甚至干涸;进入夏季汛期,短时强降雨或连续降雨导致水位快速上升,水塘和干涸的河道被重新连接;秋冬季节,降雨减少,水位下降,直到来年春季融雪期,水位再次上涨。

水位下降导致河道中形成一系列孤立的水塘。这些孤立的水塘可能持续几天、几周甚至几个月,这取决于降雨径流过程。水塘内通常为缺氧或厌氧环境^[20],有研究表明厌氧条件有利于磷酸盐从沉积物

中释放到水体^[21]. 沉积物中磷的质量浓度及其生物地球化学过程也因干燥而发生强烈的变化, 在不同类型的水生生态系统中的野外研究^[22,23]表明: 沉积物的干燥会导致磷结合能力的下降. 所以在此期间的降雨, 会对 TDP 和 TPP 进行短距离搬运, 同时降低拦沙坝对两者的滞留作用, 在降雨结束后, 两者在拦沙坝的滞留量慢慢恢复.

进入夏季汛期, 降雨一方面提高水文连通性, 导致河流表面生物活动快速恢复^[24], 产生富含营养物质的洪峰^[25], 大量的 TDP 和 TPP 被输运到下游; 另一方面, 拦沙坝上游不断升高的水位和流速, 降低了拦沙坝对磷的滞留作用. 在大多数山区河流中, TDP 主要来自潜流带^[26], 以及之前干燥的沉积物^[27]. 干燥持续时间强烈影响再湿后从碎屑和沉积物中释放 TDP 和 TPP^[28]. 因此, 在汛期的连续降雨的作用下, TPP 在拦沙坝的滞留量先增加后减少, TDP 在拦沙坝的滞留量先减少后增加. 连续降雨会降低拦沙坝对 TPP 的滞留量, 会增加 TDP 从拦沙坝的释放量, 当降雨停止后, 拦沙坝对 TPP 和 TDP 滞留作用慢慢恢复.

总的来说, 拦沙坝对磷滞留的作用随着降雨量的增加而减弱. 当单日降雨量超过 56mm 时, 拦沙坝对 TPP 和 TDP 的滞留作用失效, 大量 TPP 和 TDP 被从拦沙坝上游淤积区输移到下游. 在连续降雨中, 拦沙坝对 TDP 的滞留作用也会失效.

4 结论

(1) 拦沙坝对河流水体中的悬浮颗粒物和颗粒态磷有明显的滞留作用, 对溶解态磷的滞留作用不明显. 当河水流过拦沙坝后, TP、TDP、TPP 和 TSS 的质量浓度平均值分别降低 50%、21%、53% 和 42%.

(2) 拦沙坝对磷的输移-滞留受降雨事件时间间隔长度和降雨强度影响. 拦沙坝对磷的滞留主要发生在降雨量较小或降雨事件时间间隔较大的时期, 降雨量较大或连续降雨会减弱拦沙坝对磷的滞留.

(3) 根据 2019 年 4 月~8 月对清水河干流的拦沙坝附近地表水的连续监测, 降雨量超过 56mm 的单场或连续降雨将导致拦沙坝失去对磷的滞留效果.

(4) 自然河段、拦沙坝河段和人工硬化河段在清水河中形成了不同的景观结构, 这些景观结构影响磷在河流内的运移、滞留以及生物交换过程. 这种现象是河流生态系统对拦沙坝改变河流地形地貌、水文条件以及水动力过程所作出的一种综合响应.

参考文献:

- [1] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [2] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 310-315.
- [3] Cao C J, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 2310-2315.
- [4] 鲍林林, 李叙勇, 苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(14): 4663-4670.
- [5] Bao L L, Li X Y, Su J J. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of eutrophication in dam-regulated rivers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(14): 4663-4670.
- [6] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2005, **16**(1): 134-140.
- [7] Mao Z P, Wang Y C, Peng W Q, *et al.* Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(1): 134-140.
- [8] 刘宁宁. 近 50 年长江流域建坝与营养盐物质输送研究进展[J]. *环境化学*, 2017, **36**(7): 1579-1587.
- [9] Liu N N. Review on the nutrients transport in Yangtze River with responses to the damming in the drainage basin in the past 50 years [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(7): 1579-1587.
- [10] 高云飞, 郭玉涛, 刘晓燕, 等. 陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J]. *地理学报*, 2014, **69**(1): 73-79.
- [11] Gao Y F, Guo Y T, Liu X Y, *et al.* Failure criteria of the warping dams on sediment interception in the Middle Yellow River in northern Shaanxi[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(1): 73-79.
- [12] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, *et al.* Effect of Danube River Dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. *Nature*, 1997, **386**(6623): 385-388.
- [13] Graf W L. Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts [J]. *Water Resources Research*, 1999, **35**(4): 1305-1311.
- [14] GB 11893-1989, 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S].
- [15] GB 11901-1989, 水质 悬浮物的测定 重量法[S].
- [16] Newbold J D, Elwood J W, O'Neill R V, *et al.* Measuring nutrient spiralling in streams[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1981, **38**(7): 860-863.
- [17] Ward J V, Stanford J A. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, **10**(2-4): 159-168.
- [18] Steward A L, Von Schiller D, Tockner K, *et al.* When the river runs dry: human and ecological values of dry riverbeds [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, **10**(4): 202-209.
- [19] Poff N L, Zimmerman J K H. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(1): 194-205.
- [20] Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, *et al.* The new world of the Anthropocene [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2228-2231.
- [21] Fisher S G, Grimm N B, Martí E, *et al.* Material spiraling in stream corridors: a telescoping ecosystem model [J]. *Ecosystems*, 1998, **1**(1): 19-34.

- [17] Ran X B, Chen H T, Wei J F, *et al.* Phosphorus speciation, transformation and retention in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2016, **67**(2): 173-186.
- [18] Doyle M W, Stanley E H, Harbor J M. Hydrogeomorphic controls on phosphorus retention in streams[J]. *Water Resources Research*, 2003, **39**(6), doi: 10.1029/2003WR002038.
- [19] Jossette G, Leporeq B, Sanchez N, *et al.* Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine basin (France)[J]. *Biogeochemistry*, 1999, **47**(2): 119-146.
- [20] Von Schiller D, Acuña V, Graeber D, *et al.* Contraction, fragmentation and expansion dynamics determine nutrient availability in a Mediterranean forest stream [J]. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(4): 485-497.
- [21] Baldwin D S, Mitchell A M. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: a synthesis[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, **16**(5): 457-467.
- [22] Qiu S, McComb A J. Effects of oxygen concentration on phosphorus release from reflooded air-dried wetland sediments [J]. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 1994, **45**(7): 1319-1328.
- [23] Watts C J. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **431**(1): 27-39.
- [24] Amalfitano S, Fazi S, Zoppini A, *et al.* Responses of benthic bacteria to experimental drying in sediments from Mediterranean temporary rivers[J]. *Microbial Ecology*, 2008, **55**(2): 270-279.
- [25] Wilson J S, Baldwin D S. Exploring the ‘Birch effect’ in reservoir sediments: influence of inundation history on aerobic nutrient release [J]. *Chemistry and Ecology*, 2008, **24**(6): 379-386.
- [26] Butturini A, Bernal S, Hellin C, *et al.* Influences of the stream groundwater hydrology on nitrate concentration in unsaturated riparian area bounded by an intermittent Mediterranean stream [J]. *Water Resources Research*, 2003, **39**(4), doi: 10.1029/2001WR001260.
- [27] Merbt S N, Proia L, Prosser J I, *et al.* Stream drying drives microbial ammonia oxidation and first-flush nitrate export [J]. *Ecology*, 2016, **97**(9): 2192-2198.
- [28] Abril M, Muñoz I, Menéndez M. Heterogeneity in leaf litter decomposition in a temporary Mediterranean stream during flow fragmentation [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **553**: 330-339.



CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)