

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM_{2.5}时空分布特征 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO₂ 及 δ¹³C(CO₂) 本底变化 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe₃O₄@SiO₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究

李蕾^{1,2}, 王铁宇^{2*}, 王晓军^{3*}, 肖荣波⁴, 李奇锋², 彭驰², 韩存亮⁴

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 4. 广东省环境科学研究院生态环境与土壤修复研究所, 广州 510045)

摘要: 本研究综合考虑水源地沿岸土壤环境质量、水体污染现状、环境脆弱性和污染源压力这 4 个方面, 探索建立了河流型水源地土壤环境保护优先区划分的技术方法, 并以广东省佛山市顺德水道作为实证案例, 结合当地自然-社会-经济条件, 选取土壤污染程度、沉积物污染程度、土壤特性、地下水敏感性、植被覆盖度、污染源类型、污染源分布作为评价因子, 构建了水源地土壤环境保护优先区分等级评价指标体系。将实地采样分析与遥感影像解译相结合获取数据, 采用层次分析法(AHP)确定指标权重, 通过加权求和与图层叠加完成空间分析与制图, 编制了顺德水道土壤环境保护优先区分级图。其中, 污染区、风险区、安全区的面积分别占区域总面积的 6.37%、60.90%、32.73%, 且污染区和风险区集中在河道两岸的乐从镇、龙江镇和勒流街道, 分布于该区域的家具制造、塑料建材、纺织服装等产业的长期发展, 以及水产养殖等农业活动应是主要的污染来源, 并据此提出了有针对性的差异性管控措施。本研究对水源地土壤环境保护和可持续开发利用具有重要指导意义。

关键词: 土壤环境保护优先区; 划分方法; 水源地; 评价指标体系; 实例研究

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1584-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.051

Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration

LI Lei^{1,2}, WANG Tie-yu^{2*}, WANG Xiao-jun^{3*}, XIAO Rong-bo⁴, LI Qi-feng², PENG Chi², HAN Cun-liang⁴

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. Institute of Eco-Environment and Soil Remediation, Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China)

Abstract: Based on comprehensive consideration of soil environmental quality, pollution status of river, environmental vulnerability and the stress of pollution sources, a technical method was established for classification of priority area of soil environmental protection around the river-style water sources. Shunde channel as an important drinking water sources of Foshan City, Guangdong province, was studied as a case, of which the classification evaluation system was set up. In detail, several evaluation factors were selected according to the local conditions of nature, society and economy, including the pollution degree of heavy metals in soil and sediment, soil characteristics, groundwater sensitivity, vegetation coverage, the type and location of pollution sources. Data information was mainly obtained by means of field survey, sampling analysis, and remote sensing interpretation. Afterwards, Analytical Hierarchy Process (AHP) was adopted to decide the weight of each factor. The basic spatial data layers were set up respectively and overlaid based on the weighted summation assessment model in Geographical Information System (GIS), resulting in a classification map of soil environmental protection level in priority area of Shunde channel. Accordingly, the area was classified to three levels named as polluted zone, risky zone and safe zone, which respectively accounted for 6.37%, 60.90% and 32.73% of the whole study area. Polluted zone and risky zone were mainly distributed in Lecong, Longjiang and Leliu towns, with pollutants mainly resulted from the long-term development of aquaculture and the industries containing furniture, plastic constructional materials and textile and clothing. In accordance with the main pollution sources of soil, targeted and differentiated strategies were put forward. The newly established evaluation method could be referenced for the protection and sustainable utilization of soil environment around the water sources.

Key words: priority area for soil environmental protection; classification method; water source; evaluation index system; case study

随着我国工农业的迅猛发展和城镇化进程的加快, 污染物排放量逐年增加, 给土壤环境保护造成巨大压力。2013年1月23日国务院办公厅发布《近期土壤环境保护和综合治理工作安排》中提出要建立严格的土壤环境保护制度, 在集中式水源地和重点保护耕地建立土壤环境保护优先区, 并分级划定实施差异性管控措施。目前, 已开展的土壤环境保

护优先区划定工作多集中在耕地质量综合评价及其

收稿日期: 2015-12-24; 修订日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571478); 科技部科技基础性工作专项(2013FY11110); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-12)

作者简介: 李蕾(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水源地生态保护与可持续, E-mail: pingerqing@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangty@rcees.ac.cn; xjwang@sxu.edu.cn

分级方法,形成了相对完整的理论和方法体系^[1~3]。但是,针对水源地的土壤环境分级保护的技术方法与实践经验仍较为匮乏。近年来,众学者多从水源地水质安全调查^[4,5]、突发性水污染事故应急处置技术^[6]和水质健康风险评价^[7,8]等方面开展研究,对水源地的保护多是关注水体本身,忽视了沿岸土壤与水体的交互作用以及土壤环境保护对水源质量养护的重要功能^[9~11]。水源地土壤环境保护的核心内容是降低土壤中污染物迁移至水环境的可能性。因此,对于水源地土壤环境保护等级的划分,除了需要重点考虑土壤和水体环境质量状况外,还需综合考虑各环境介质中污染物的迁移转化、沿岸土地利用现状等因素,以建立更加全面的分级评价方案。本研究综合考虑水源地沿岸土壤环境质量、水体污染现状、环境脆弱性和污染源压力这4个方面,构建水源地土壤环境保护等级综合评价指标体系,建立水源地土壤环境保护优先区划分技术方法,并以广东省佛山市顺德水道为案例,开展实证研究,通过测算水源地沿岸土壤环境保护的压力指数来划分保护等级,以期水源地土壤环境保护和可持续开发利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 案例区状况及评价指标选取

顺德水道长48 km,河宽500~800 m,水深5~6 m,是广州市和佛山市重要的饮用水源地,沿河道分布着乐从水厂、龙江水厂、羊额水厂、北滘水厂等多个饮用水取水厂,日供水规模分别为25、15、40和15万 m^3 ^[12]。全流域被划入水源地保护区,其水质安全关系着佛山和广州两市的饮水安全和社会经济发展。

在测算顺德水道水源地沿岸土壤环境保护的压力指数时,应当在对当地自然-社会-经济整体调研的基础上,从土壤环境质量、水体污染现状、环境脆弱性和污染源压力的特点出发,依据目的性、重点性、可行性、兼容性及综合性原则^[13]选取评价指标。

(1) 土壤环境质量

调查和评价水源地沿岸土壤环境质量是划分土壤环境保护等级的核心内容。我国现行的《土壤环境质量标准》(GB 15618-2008)^[14]中所罗列的污染物包括重金属与其他无机物、挥发性有机物、多环芳烃类有机物、持久性有机污染物与农药等。区域相关研究显示:顺德区土壤中萘、苊、二氢苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘等多环芳烃和六六六、滴滴涕、硫丹硫酸

盐、七氯、艾氏剂、狄试剂等有机氯农药的污染程度较轻^[15,16];然而该区域土壤中镉、汞、锌、铅、铜、砷、镍和铬的平均浓度远高于背景值,存在普遍污染^[17,18]。因此在评价土壤环境质量时应应对土壤重金属污染情况进行重点关注。加之各类重金属存在不同的来源和分布特征,单一类型不能全面地说明区域重金属污染情况,因此采用污染指数法进行综合评价。

(2) 水体污染现状

对水源地的土壤环境实施优先保护的最终目的是保障水源地的水质安全,且不同河段的污染现状决定了对应区域开展土壤环境保护工作的紧迫性,故而是评价沿岸土壤环境保护压力的重要考虑因素之一。顺德水道杨滘断面、大闸断面、羊额断面、乌洲断面的历史监测数据均表明,无论是高锰酸盐指数、溶解氧、生化需氧量等一般污染物指标,还是重金属、挥发性酚类、硝酸盐等有毒污染物指标,各断面的监测浓度均未超过国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中二级水质标准。虽然顺德水道是开放性的河流型水源地,但是近年来点源输入对水质影响不是特别大,上、中、下游水质状况均满足集中式生活饮用水保护区的水质要求。因此,单纯的水质数据不能很好地反映不同河段间污染程度的分布。

另外,水体不仅包括水,还包括水中的溶解物质、悬浮物质、沉积物等^[19]。排入水体的污染物会通过多种途径汇聚到沉积物中,并可能在化学、物理和生物等作用下,与间隙水发生充分的交换和反应,从而向河道中释放污染物质^[20,21],是反映水体污染的重要指标。区域相关研究表明,顺德水道沉积物中重金属含量偏高,对河道构成潜在生态风险,易于产生二次污染^[22~25]。

因此,针对顺德水道的环境特点,本研究选择河道沉积物中重金属的浓度分布以反映陆源污染物的历史输入和不同河段间的污染情况的分布,同样采用污染指数法予以综合评价。

(3) 环境脆弱性

顺德水道位于亚热带海洋性季风气候区,降水充沛,多年平均降雨量为1 627.8 mm。地下水类型为松散岩类孔隙水,地下水埋深较浅,属感潮河段,河流水体在涨、落潮期受地下水侧向补、排影响较大^[26]。因此,河流沿岸土壤水、地下水及河流水之间交互作用强烈。此外,顺德水道位于珠江三角洲冲积平原中部,除零星分布的残丘台地外,大部分区

域地形平缓,且全流域建有护堤.综合以上特点,本研究在实际评价过程中,重点关注河流沿岸土壤中的污染物垂直入渗进入地下水,进而横向迁移污染河流水体的迁移途径.

顺德水道沿岸主要分布着湿潮土、赤红壤和潴育型水稻土,这三类土壤物理、化学特性的差异决定了其对重金属等污染物的持留和缓冲能力的强弱^[27];顺德水道沿岸地下水埋深、含水层厚度、包气带介质、河网密度等水文地质条件具有空间异质性,使得地下水系统吸附、转化、降解、稀释污染物的能力存在空间差异^[28];顺德水道沿岸的植被覆盖度不均,在植被覆盖度高的地方,植被冠层可以有效地阻止大气沉降带来的污染输入和积累^[29],植物根系可以与土壤和微生物组成复合体系,对重金属等污染物起到吸附、沉淀、离子交换、降解等净化作用^[30].因此在实际评价过程中,应结合顺德水道自然环境条件,从土壤的理化性质、地下水敏感性、植被覆盖情况等区域环境本底条件以及空间分布进行综合分析.

(4) 污染源压力

土地利用直接反映了其所承担的人类活动对土壤重金属空间分布和累积的影响^[31].顺德区以小家电制造业为支柱的工业、以水产养殖为特色的农业和人口密集的各城镇,在其发展过程中造成了生态土壤和沉积物中重金属的持续累积.有学者对研究区不同土地利用类型的土壤污染程度进行了对比,结果表明工业用地的土壤污染程度大于农业用地和城镇用地^[32, 33].另外,污染源所对应的土地利用类型与顺德水道的距离越近,其排放的污染物迁移至河流所需的时间和距离就越短,经历的各种吸

附、转化和降解作用越少^[34];且距离河流越近,土壤水、浅层地下水与河水的交互作用越强烈^[35].因此,本研究从顺德水道沿岸土地利用和分布的角度出发,分析不同污染源对水源地土壤环境的压力.

针对顺德水道河流型水源地的特点,综合考虑河道沿岸土壤中主要污染物的分布特征、污染物在区域环境条件下迁移的难易程度、不同河段的污染现状、河流沿岸污染源的类型和分布等因素的共同影响,最终选取土壤污染程度、沉积物污染程度、土壤特性、地下水敏感性、植被覆盖度、污染源类型、污染源分布作为指标.

1.2 方法建立的技术流程

本研究参照水源地保护区边界划定的要求,将顺德水道堤外坡脚向陆纵深 2 km 带状区域作为土壤环境保护优先区的研究范围^[36],总面积为 108.37 km².其中,顺德区乐从镇、龙江镇、勒流街道、北滘镇和伦教街道被划入土壤环境保护优先区的面积分别为 23.95、12.49、24.15、25.97 和 21.80 km².本研究于 2014 年对顺德水道开展土壤和水体环境调查,沿河布设采样点,并在重点水厂取水口附近加密(图 1),共采集表层土壤样品 51 个、地表水样品 12 个、表层沉积物样品 12 个,通过实验分析测定 3 类样品中重金属等典型污染物的浓度.通过广东省环境科学研究院获得研究区的土壤类型数据、土壤理化性质数据、水文地质空间数据和 1:50 000 地形图等基础资料.在遥感图像处理软件 ERDAS IMAGINE 10.0 和地理信息系统软件 ArcGIS 10.1 等软件的支持下,解译顺德区 2014 年度的 Landsat7 TM 遥感数据,得到研究区土地利用数据和归一化

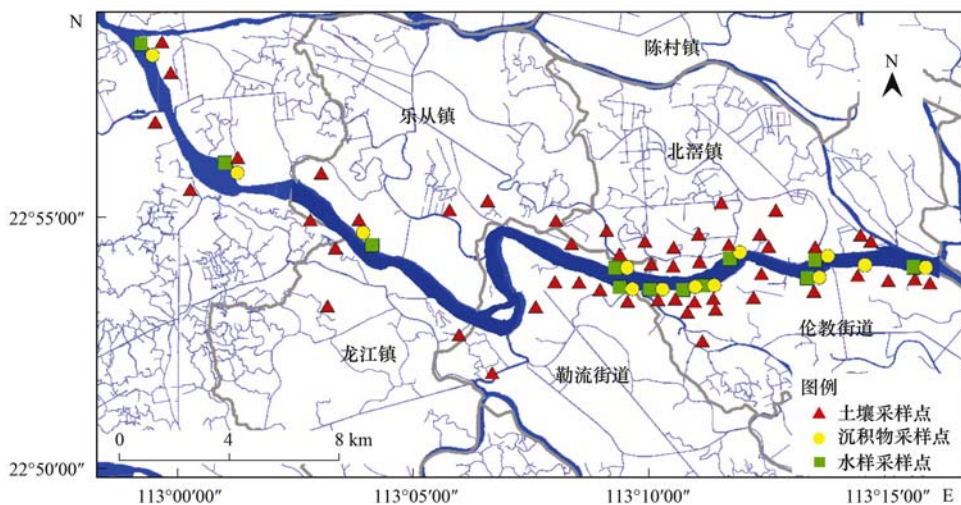


图 1 顺德水道土壤、沉积物、水采样点位分布示意

Fig. 1 Location of soil, sediment and water sampling sites of Shunde Channel

植被指数(NDVI). 通过层次分析法(AHP)建立水源地土壤环境保护优先区分等定级评价指标体系, 计算各指标的权重. 在 ArcGIS 10.1 中对各指标数据进行标准化和空间化, 建立基础数据图层, 进而运用加权求和的评价模型对各指标数据进行空间叠加, 计算出各评价单元的土壤环境保护压力综合指

数. 制定环境保护等级分级方法和标准, 将水源地沿岸陆地区域按照综合指数的大小划分为污染区、风险区和安全区. 在不同等级区域实行差异性管控措施, 以缓解区域产业发展与水源地保护之间的矛盾. 基于顺德水道的水源地土壤环境保护优先区分技术路线如图 2 所示.

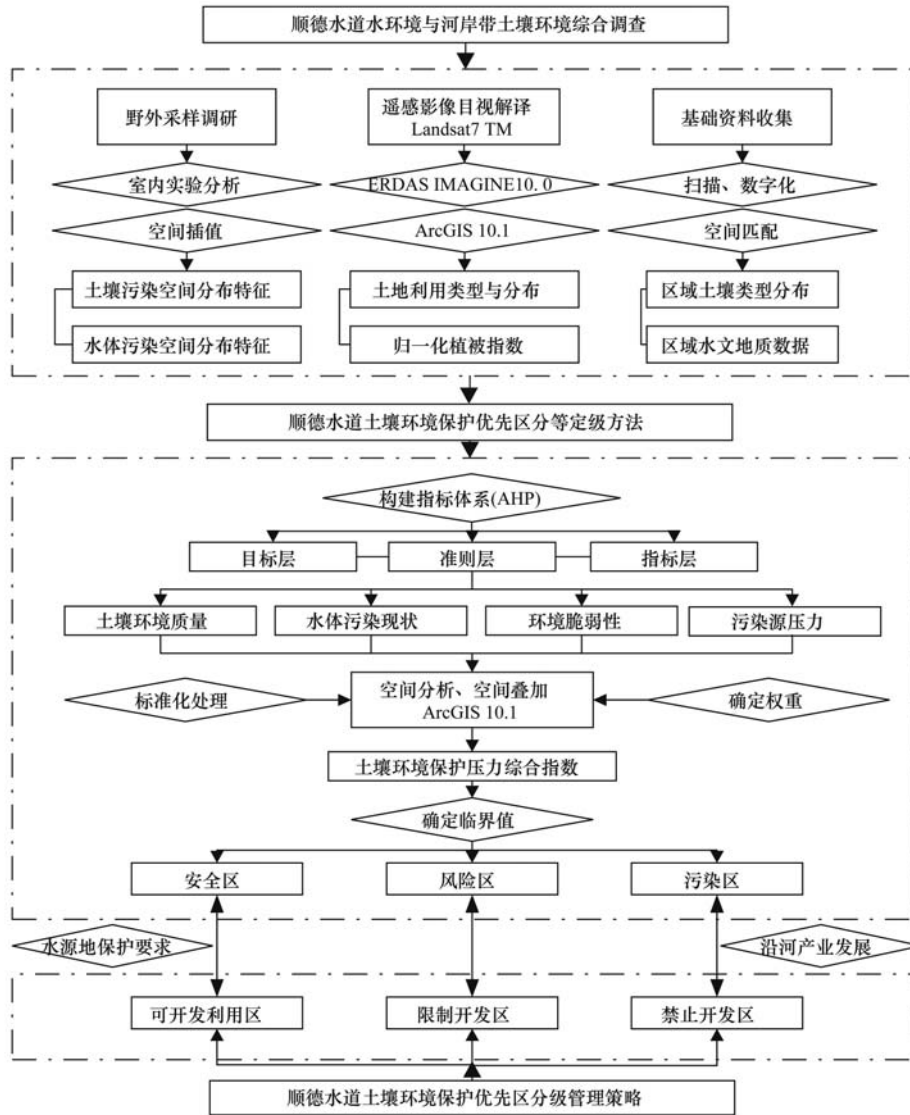


图 2 顺德水道水源地土壤环境保护优先区分技术路线

Fig. 2 Technical route to classify priority area for soil environmental protection around the Shunde Channel water sources

2 评价方法

2.1 单指标评价与空间化

(1) 土壤污染程度

采用内梅罗污染指数法^[37]综合评价土壤中总镉、总汞、总锌、总铅、总铜、总砷、总镍、总铬的污染程度. 内梅罗综合污染指数法兼顾了单因子污染指数平均值和最高值, 突出了较重污染物对环境质量

的影响, 其计算方法见式(1)及式(2):

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

$$P_m = \sqrt{\frac{(P_{i\text{ave}})^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}} \tag{2}$$

式中, P_m 为内梅罗综合污染指数, P_i 为第 i 种污染物的单项污染指数; C_i 为第 i 种污染物的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为第 i 种污染物的评价标准

($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 本研究以国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-2008)的二级标准值为评价标准^[21]; P_{ave} 为各种污染物单项污染指数的算数平均值; P_{imax} 为单项污染指数的最大值. 按照内梅罗综合污染指数的分级方法将土壤污染划分为3个等级: 当 $P_m \leq 1$ 时, 土壤环境质量等级为无污染; 当 $1 < P_m \leq 3$ 时, 土壤环境质量等级为中轻度污染; 当 $P_m > 3$ 时, 土壤环境质量等级为重污染. 土壤环境质量越差, 土壤环境保护压力越大. 评价结果表明, 无污染土壤仅占 7.84%, 轻、中度污染土壤占 60.79%, 有 31.37% 的土壤属于严重污染, 主要来自于上游的乐从镇和龙江镇. 利用 ArcGIS 10.1 的空间分析功能, 应用反距离权重插值方法 (IDW) 对各土壤采样点的内梅罗污染指数进行插值, 生成土壤污染的空间分布数据.

(2) 沉积物污染程度

同样采用内梅罗污染指数法对不同河段沉积物中总镉、总汞、总锌、总铅、总铜、总砷、总镍、总铬的污染程度予以反映^[38], 计算方法同上. 结果表明, 83.3% 的沉积物采样点的 $P_m > 3$, 属于重污染, 且上游地区较中、下游地区污染严重. 用不同河段上的沉积物采样点的平均污染指数表示该区域的污染程度, 获得基础图层.

(3) 土壤特性

选择土壤中土壤黏粒的质量分数、有机质的质量分数、阳离子交换量对土壤特性进行综合评价, 三者均与土壤的缓冲能力呈正相关^[39-41]. 由顺德水道沿岸土壤类型图和其对应土壤理化性质分析结果可知, 在顺德水道沿岸, 中上游地区主要分布着湿潮土和赤红壤, 湿潮土中黏粒的质量分数为 10.0%, 有机质的质量分数为 2.88%, 阳离子交换量为 $19.7 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; 赤红壤中黏粒的质量分数为 9.0%, 有机质的质量分数为 2.62%, 阳离子交换量为 $10.3 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. 下游地区分布的潜育型水稻土中的黏粒的质量分数为 26.5%, 有机质的质量分数为 3.25%, 阳离子交换量 $15.0 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[27]. 据此判断赤红壤、潜育型水稻土、湿潮土对污染物的滞留和缓冲作用依次增大, 土壤环境保护压力依次减小. 将研究区土壤类型的空间分布数据及其对应的土壤理化性质录入 ArcGIS 中, 生成土壤特性空间分布基础图层.

(4) 地下水敏感性

参考顺德水道水文地质条件的空间分布情况和围绕当地开展的有关地下水敏感性评价的研究, 提

取了地下水敏感性相关指标, 包括地下水埋深、含水层厚度、包气带介质和河网密度, 这些指标在一定程度上可以反映顺德水道所在区域地下水系统的固有特性对污染物缓冲、衰减和稀释的作用^[26,35]. 在 ArcGIS 中将变异性比较大的指标与所对应的地点进行空间匹配, 获得地下水敏感性空间分布信息. 顺德水道沿岸地下水埋深约 0~6 m, 含水层厚度为 5~10 m, 包气带介质厚度为 1~3.5 m, 且被河网切割得支离破碎. 综合判断顺德水道所在地区地下水敏感性总体较强, 且部分近河区域地下水敏感性极高.

(5) 植被覆盖度

本研究采用归一化植被指数 (NDVI) 来反映植被覆盖度的空间分布^[42], 进而反映区域植物截留污染物能力的差异. 绿色植被对可见光红色波段 (波长 0.63~0.69 μm) 有较高的吸收率, 对近红外波段 (波长 0.76~0.90 μm) 有较高的反射率. NDVI 即是根据植被反射光谱的特征, 利用这两个最典型的波段值进行组合运算而得到, 计算公式见式(3).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (3)$$

式中, NIR 为近红外波段, Red 为红光波段. 本研究选取顺德区 2014 年 7~9 月之间 Landsat7 TM 遥感数据 (共 6 期), 采用 ERDAS IMAGINE 10.0 软件计算区域的 NDVI 值, 再利用最大值合成法消除云层覆盖对影像的影响, 获得顺德区 2014 年 7~9 月的最大值合成 NDVI 影像, 影像反映了顺德水道沿岸植被覆盖度的空间分布信息, 导入 ArcGIS 获得基础图层.

(6) 污染源类型

本研究以 2014 年覆盖研究区域的 Landsat7 TM 影像为数据源, 以顺德区 1:50 000 地形图为标准, 首先在 ERDAS IMAGINE 遥感图像处理软件中进行几何校正和监督分类, 初步获得水体、农田、城镇、建设用地等土地利用类型; 之后通过实地探勘, 重点对建设用地的斑块属性进行走访调查, 区分其中的工业用地, 并用 GPS 技术记录经纬度信息; 最后在 ArcGIS 中将 ERDAS IMAGINE 的监督分类结果和实地调查数据综合起来, 进行人工目视解译, 获得包括工业用地、农业用地和城镇用地在内的土地利用分类. 参考研究区工业用地的土壤污染程度大于农业用地和城镇用地的关系^[32,33], 对各类土地利用类型的污染强度进行赋值, 形成污染源类型基础分布图层.

(7) 污染源分布

污染源与顺德水道的相对位置,反映了其产生并在土壤中积累的污染物对河流水体影响的大小. 本研究利用 ArcGIS 的欧氏距离 (Euclidean distance) 工具计算沿岸污染源到顺德水道的距离. 污染源的缓冲距离越短,土壤环境保护压力越大.

2.2 指标体系的建立与权重确定

由于上述各指标对水源地土壤环境保护压力的影响程度不同,本研究采用层次分析法 (AHP) [43],

并参考水源地相关研究确定各评价指标的权重值 [44,45]. 将土壤污染程度、沉积物污染程度、土壤特性、地下水敏感性、植被覆盖度、污染源类型、污染源分布这 7 个土壤环境保护压力指标划分为土壤环境质量、水体污染现状、环境脆弱性、污染源影响强度 4 个子系统,并建立 3 个层次的土壤环境保护压力评价指标体系,见表 1. 其中, A、B、C 分别为目标层、准则层和指标层.

表 1 土壤环境保护压力评价指标及其权重

Table 1 Evaluation factors and their weights in soil environmental protection pressure evaluation

目标层	准则层 (B)	指标层 (C)	$w_j^{(1)}$	参评因子
土壤环境保护压力 (A)	土壤环境质量 (B ₁)	土壤污染程度 (C ₁)	0.35	总铅、总镉、总汞、总铜、总砷、总镍、总锌、总铬的内梅罗指数
	水体污染现状 (B ₂)	沉积物污染程度 (C ₂)	0.12	总铅、总镉、总汞、总铜、总砷、总镍、总锌、总铬的内梅罗指数
	环境脆弱性 (B ₃)	土壤特性 (C ₃)	0.07	黏粒的质量分数、有机质的质量分数、阳离子交换量
		地下水敏感性 (C ₄)	0.03	地下水埋深、含水层厚度、包气带介质、河网密度
		植被覆盖度 (C ₅)	0.06	归一化植被指数
	污染源压力 (B ₄)	污染源类型 (C ₆)	0.12	土地利用类型
		污染源分布 (C ₇)	0.25	距河道距离

1) w_j 为土壤环境保护压力评价指标的权重

采用德尔菲法 (Delphi) [46] 讨论准则层中 B₁、B₂、B₃、B₄ 对目标层 A 的相对重要性,构造目标层与准则层的两两判断矩阵 (表 2),并计算该矩阵的特征根与特征向量,从而得到准则层对目标层各指标的权重 w_n ,其一致性比例为 $CR = 0.0173 < 0.10$,表明判断矩阵的一致性在容许范围内,可用特征向量作为权向量 [45]. 采用同样的方法构造指标层 C 对相应准则层 B 的两两判断矩阵,通过层次单排序、层次总排序和一致性检验,最后得到归一化的顺德水道沿岸土壤环境保护压力各评价指标的权重 w_j (表 1).

表 2 目标层 (A) 与准则层 (B) 的判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	w_n
B ₁	1	3	2	1	0.35
B ₂	1/3	1	1	1/4	0.12
B ₃	1/2	1	1	1/2	0.16
B ₄	1	4	2	1	0.37

2.3 指标的标准化与综合指数定量

由于各指标的量纲、数量级都不相同,且部分指标为定性指标,不便于综合分析,因此,应结合各指标与评价目标的关系进行标准化处理. 对于定量指标,土壤污染程度、沉积物污染程度、地下水敏感性、污染源分布与土壤环境保护压力正相关,用式 (4) 进行标准化;植被覆盖度与土壤环境保护压力负相

关,用式 (5) 进行标准化:

$$Y_j = \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (4)$$

$$Y_j = \frac{X_{j\max} - X_j}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (5)$$

式中, Y_j 为各指标的标准化值, X_j 为各指标的实测值, $X_{j\max}$ 为实测值中的最大值, $X_{j\min}$ 为实测值中的最小值. 对土壤特性、土地利用类型这类定性指标,采用德尔菲法 (Delphi) 在 0 ~ 1 之间进行打分. 在 ArcGIS 10.1 中形成各评价指标的基础数据图层,统一栅格大小为 30 m × 30 m 作为评价单元. 运用式 (6) 加权求和的评价模型对各指标数据进行空间叠加,从而计算出每个评价单元的土壤环境保护压力综合指数 D . D 值越大,则该评价单元的土壤环境保护压力越大.

$$D = \sum w_j Y_j \quad (6)$$

2.4 土壤环境保护优先区的边界确定

根据各评价单元土壤环境保护压力综合指数 D 的大小和空间格局,参考土壤环境质量评价结果,确定 2 个临界值 (0.64 和 0.22), 依此将土壤环境保护优先区划分为安全区、风险区和污染区这 3 个等级 (表 3), 对应的土壤环境保护压力依次提升. 原则如下: 要保证土壤环境重污染区域全部划入污染区; 土壤环境中轻度污染区域全部划入风险区或污染区; 安全区必须全部为土壤

环境无污染的区域. 因此,在 ArcGIS 10.1 中,将土壤内梅罗指数 P_m 大于 3 的区域提取出来,该区域内 D 的最低值 (0.64) 即为区分土壤环境

风险区与污染区的临界值. 同理, $1 < P_m \leq 3$ 的区域内 D 的最低值 (0.22) 即为区分土壤环境风险区与安全区的临界值.

表 3 顺德水道水源地土壤环境优先保护区分级标准

Table 3 Classification criterion of priority area for soil environmental protection of Shunde Channel water sources

保护等级	分值	特征
污染区	$0.64 < D \leq 1$	土壤环境质量较差,距离河道极近,环境缓冲能力较弱,严重威胁水源地水质安全
风险区	$0.22 < D \leq 0.64$	土壤环境质量中等,距离河道较近,环境缓冲能力中等,可能威胁水源地水质安全
安全区	$0 < D \leq 0.22$	土壤环境质量较好,距离河道较远,环境缓冲能力较强,几乎不威胁水源地水质安全

3 水源地土壤环境保护优先区分等定级结果

顺德水道水源地土壤环境保护优先区分级结果如图 3 所示. 土壤环境保护压力呈现出上游向下游逐渐降低,河道两岸向外侧逐渐减弱的态势. 污染区面积为 6.90 km²,占区域总面积的 6.37%,呈点状分布在顺德水道上游、河道回旋处和中下游地区,该区土壤环境质量较差,环境缓冲能力弱,污染源压力较高,距离河道极近,严重威胁顺德水道水质安全. 风险区面积为 65.99 km²,占区域总面积的 60.90%,呈带状分布在河道沿岸,宽度从上游向下游逐渐变窄,该区土壤环境质量中等,土壤与地下水环境对污染物具有一定的缓冲能力,但由于其距离河道较近,对水源地水质安全存在潜在风险. 安全区面积为 35.46 km²,占区域总面积的 32.73%,呈带状分布在风险区的外侧,该区土壤环境质量较好,环境缓冲能力强,距离河道较远,污染源压力低,可认为一般情况下不会对顺德水道的水质安全造成威胁.

从污染区、风险区、安全区在研究区各镇的比例来看,位于上游和河道回旋处的乐从镇、龙江镇、勒

流街道的土壤环境保护压力较高,3 镇被划入非安全区(风险区和污染区)的比例分别为 77%、88%、82%. 这一地区工业用地较多,家具、塑料建材、小家电及纺织服装等制造业的长期发展,造成了土壤和沉积物中重金属的持续累积,且该区广泛分布着湿潮土,对污染物的缓冲性较弱,环境敏感性较高. 另外,位于北滘镇的污染区虽然面积较小,但因其距离水厂取水口距离较近,应给予格外关注.

依据顺德水道饮用水源地土壤环境保护优先区的分级结果,在污染区、风险区、安全区应实行差异性的管控措施,设置禁止开发区、限制开发区和可开发利用区,削弱土壤对水源地水质的污染风险,保障水源地水质安全,确保公众健康,促进区域经济社会可持续发展. 在污染区实行强制性保护,严禁新建项目,现有生产能力在规定的期限内停产或关闭,禁止水产养殖等一切可能对土壤环境产生干扰与破坏的行为,并尽快开展土壤污染治理与修复. 在风险区坚持“在保护中发展”的原则,有目的地限制对土壤环境影响较大的开发活动的进入,或在能够补偿产业所造成的环境影响的基础上有条件地批准开发建设活动. 在安全区坚持“在发展中保护”的原

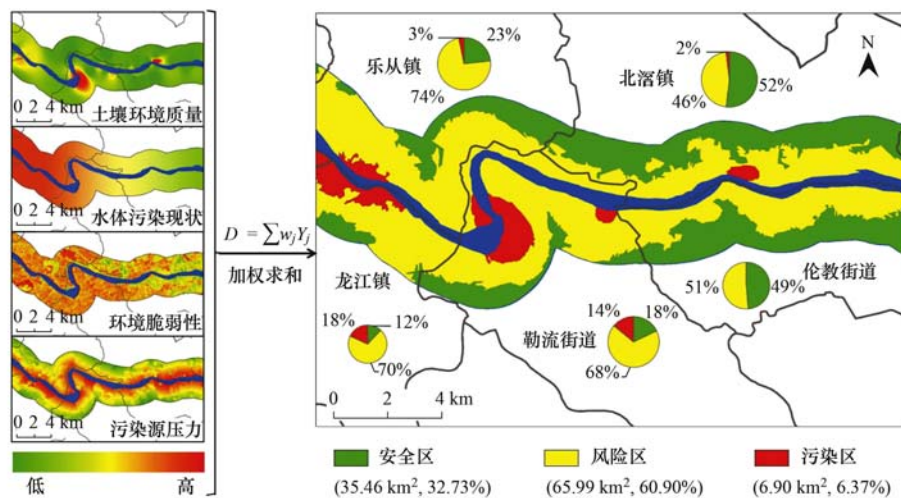


图 3 顺德水道饮用水源地土壤环境保护优先区分级结果

Fig. 3 Classification result of priority area for soil environmental protection around the Shunde Channel water sources

则,科学利用土壤环境容量,结合产业污染排放、风险隐患特征等因素,合理确定产业发展规模并完善相关配套设施。

4 结论与建议

(1)本研究以广东省佛山市的顺德水道为案例区,建立了河流型饮用水源地土壤环境保护优先区的划定技术方法,结合当地自然和社会经济条件,重点关注了河道沿岸土壤的重金属污染,综合考虑其在河流沿岸地表覆被、土壤特性和地下水本质属性的影响下迁移的难易程度,并结合顺德水道不同河段水体的污染现状和沿岸污染源的影响,对顺德水道土壤环境保护区进行分等定级,以缓解区域经济发展与水源地保护之间的矛盾,为当地管理部门对水源地保护提供了理论和技术支撑。

(2)本研究与我国现行的饮用水水源保护区划相辅相成,且与之相比,更加关注水源地的陆地区域土壤环境质量状况、沿岸土地利用现状以及各环境介质关系的耦合,对水源地的可持续开发利用具有指导意义。然而,本评价方法是基于广东省河流型水源地的环境特点设计的,具有一定的区域限制性,加之我国南北方水源地自然-社会-经济条件的显著差异,如何构建较为全面、系统、科学的水源地土壤环境保护优先区的划分方法,仍需深入研究。

参考文献:

- [1] 沈仁芳,陈美军,孔祥斌,等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报, 2012, **49**(6): 1210-1217.
- [2] 奉婷,张凤荣,李灿,等. 基于耕地质量综合评价的县域基本农田空间布局[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(1): 200-210.
- [3] 刘霏珈,吴克宁,赵华甫,等. 基于耕地综合质量的基本农田布局优化——以河南省温县为例[J]. 中国土地科学, 2015, **29**(2): 54-59.
- [4] Wang W F, Ren S Y, Zhang H F, *et al.* Occurrence of nine nitrosamines and secondary amines in source water and drinking water: potential of secondary amines as nitrosamine precursors [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 4930-4938.
- [5] Shi W, Zhang F X, Hu G J, *et al.* Thyroid hormone disrupting activities associated with phthalate esters in water sources from Yangtze River Delta[J]. *Environment International*, 2012, **42**: 117-123.
- [6] Zhang X J, Chen C, Lin P F, *et al.* Emergency drinking water treatment during source water pollution accidents in China: origin analysis, framework and technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **45**(1): 161-167.
- [7] Wu B, Zhang Y, Zhang X X, *et al.* Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the source water and drinking water of China: quantitative analysis based on published monitoring data[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **410-411**: 112-118.
- [8] 王若师,许秋瑾,张娴,等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [9] Huang G H, Xia J. Barriers to sustainable water- quality management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, **61**(1): 1-23.
- [10] Lal R. Soil conservation and ecosystem services [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2014, **2**(3): 36-47.
- [11] Xiao R, Bai J H, Wang Q G, *et al.* Assessment of heavy metal contamination of wetland soils from a typical aquatic-terrestrial ecotone in Haihe River Basin, North China[J]. *CLEAN- Soil, Air, Water*, 2011, **39**(7): 612-618.
- [12] 付志敏. 佛山市供水安全性评估及应急体系构建研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 21-23.
- [13] 夏继红,严忠民,蒋传丰. 河岸带生态系统综合评价指标体系研究[J]. 水科学进展, 2005, **16**(3): 345-348.
- [14] GB 15618-2008, 土壤环境质量标准(修订)[S].
- [15] 马瑾,周永章,张天彬,等. 珠三角典型区域土壤有机氯农药(OCPs)多元统计分析——以佛山市顺德区为例[J]. 土壤, 2008, **40**(6): 954-959.
- [16] 马瑾,周永章,张天彬,等. 珠三角典型区域土壤多环芳烃(PAHs)的多元统计分析——以佛山市顺德区为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(5): 1747-1751.
- [17] 史瑾瑾. 顺德乐从地区土壤重金属地球化学特征及污染评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. 40-51.
- [18] 杨国义,张天彬,万洪富,等. 广东省典型区域农业土壤中重金属污染空间差异及原因分析[J]. 土壤, 2007, **39**(3): 387-392.
- [19] 王焕校. 污染生态学[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2012. 185-186.
- [20] Islam M S, Ahmed M K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 282-291.
- [21] Banu Z, Chowdhury M S A, Hossain M D, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of heavy metal in the sediment of Turag River, Bangladesh: an index analysis approach [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, **5**(2): 239-248.
- [22] 谢文平,王少冰,朱新平,等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1808-1815.
- [23] 邓代永,孙国萍,郭俊,等. 典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1700-1706.
- [24] Bai J H, Xiao R, Cui B S, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 817-824.

- [25] Liu B L, Hu K, Jiang Z L, *et al.* Distribution and enrichment of heavy metals in a sediment core from the Pearl River Estuary[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(2): 265-275.
- [26] 狄效斌. 珠江三角洲地区地下水防污性能研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008. 34-42.
- [27] 王红旗, 刘新会, 李国学, 等. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 216-255.
- [28] Neshat A, Pradhan B, Dadras M. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, **86**: 74-86.
- [29] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J]. *生态学报*, 2014, **34**(8): 1910-1921.
- [30] Barbosa B, Boléo S, Sidella S, *et al.* Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils using the perennial energy crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. [J]. *BioEnergy Research*, 2015, **8**(4): 1500-1511.
- [31] 宋成军, 张玉华, 刘东生, 等. 土地利用/覆被变化(LUCC)与土壤重金属积累的关系研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(5): 617-624.
- [32] Hu Y A, Liu X P, Bai J M, *et al.* Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(9): 6150-6159.
- [33] 吴雪芳, 岑况, 赵伦山, 等. 顺德地区土壤重金属污染生态地球化学调查与物源识别[J]. *物探与化探*, 2015, **39**(3): 595-601, 605.
- [34] Mor S, Ravindra K, Dahiya R P, *et al.* Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **118**(1-3): 435-456.
- [35] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区浅层地下水天然防污性能评价方法探讨[J]. *工程勘察*, 2008, (11): 44-49.
- [36] HJ/T 338-2007, 饮用水水源保护区划分技术规范[S].
- [37] Zhang C T, Yang Y, Li W D, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(9): 556.
- [38] 朱程, 马陶武, 周科, 等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. *生态学报*, 2010, **30**(15): 3982-3993.
- [39] Luo X S, Yu S, Li X D. Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: implications for assessing the risk to human health [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(5): 1317-1326.
- [40] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 84-91.
- [41] Xiao H, Böttcher J, Utermann J. Evaluation of field-scale variability of heavy metal sorption in soils by scale factors—Scaling approach and statistical analysis [J]. *Geoderma*, 2015, **241-242**: 115-125.
- [42] Reiche J, Verbesselt J, Hoekman D, *et al.* Fusing Landsat and SAR time series to detect deforestation in the tropics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **156**: 276-293.
- [43] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process [J]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, **1**(1): 83-98.
- [44] Ouyang W, Huang H B, Hao F H, *et al.* Evaluating spatial interaction of soil property with non-point source pollution at watershed scale: the phosphorus indicator in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**: 412-421.
- [45] Zhai X Y, Zhang Y Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution modelling using Soil and Water Assessment Tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, **28**(4): 1627-1640.
- [46] Vidal L A, Marle F, Bocquet J C. Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**(5): 5388-5405.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行