

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铎鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素分布特征及来源解析 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征分析 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

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 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S₂O₈²⁻ 体系降解苯甲酸 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氨比农村污水脱氮 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N₂O 排放的影响 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N₂O 相关功能微生物的影响 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N₂O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,闵伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系

李敏^{1,2}, 唐剑锋³, 陈利顶^{1,2}, 赵方凯^{1,2}, 冯青郁¹, 杨磊^{1,2*}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 阐明城郊地区土地利用格局对水体抗生素的影响, 对于维护水质安全和城乡居民健康具有重要意义. 本研究以长三角典型城郊宁波樟溪流域为例, 基于不同子流域定位监测, 研究了城郊流域水体抗生素的组成和分布特征, 基于源汇景观模型探讨了流域源汇景观格局特征对水体抗生素的影响. 结果表明, 不同子流域水体抗生素含量和种类存在较大差异, 抗生素的浓度变化范围为 $1.12 \sim 53.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 景观分析表明研究区从上游到下游“源”景观的面积逐渐增大, 而“汇”景观的面积逐渐减小. 不同子流域水体抗生素的非度量多维尺度分析(NMDS)发现具有相似源汇景观格局的子流域水体抗生素组成和含量具有一定的相似性. 土地利用的组成及其在海拔、坡度和距离上的分布都对水体抗生素浓度有不同程度的影响. 相关分析和冗余分析(RDA)表明, 源汇景观负荷比指数(LWLI)与水体抗生素浓度呈正相关关系, 子流域 LWLI 越大其水体抗生素浓度越高. 通过流域景观格局优化, 使“源”“汇”景观在空间上合理分布, 可以减少水体抗生素污染.

关键词: 城郊; 景观格局; 水环境; 土地利用; 源汇景观模型

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2264-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201911114

Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed

LI Min^{1,2}, TANG Jian-feng³, CHEN Li-ding^{1,2}, ZHAO Fang-kai^{1,2}, FENG Qing-yu¹, YANG Lei^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Quantitatively identifying the effect of land use patterns on antibiotics in surface water has significance in maintaining water quality and protecting residents' health in urban and rural regions. In this study, a typical peri-urban watershed, located in the Yangtze River Delta, was selected as the study area. Based on surface water sampling, laboratory analysis, and source-sink landscape model (SSLM) analysis, the component and distribution characteristics of antibiotics in surface water in different sub-watersheds were analyzed. The effects of source and sink landscape patterns on antibiotic concentrations in surface water were identified. The results of this study showed substantial differences in types and concentrations of antibiotics in surface water in different sub-watersheds. The total concentrations of antibiotics in surface water ranged from $1.12 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ to $53.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. From upstream to downstream, the area of “source” landscape increased, and the area of “sink” landscape decreased based on landscape pattern analysis. The results of non-metric multidimensional scaling (NMDS) showed that sub-watersheds with similar “source-sink” landscape patterns were detected as having similar antibiotics types and concentrations in surface water. Land use composition, distance, elevation, and slope degree had substantial impacts on antibiotic concentrations in surface water. The results of this study also found that location-weighted landscape index (LWLI) was positive correlated with antibiotics concentrations in surface water based on correlation analysis and redundancy analysis. The sub-watersheds with high LWLI values usually had relatively higher antibiotic concentrations in surface water. This study indicated that optimization of “source” and “sink” landscapes at the watershed scale can decrease antibiotic contamination in surface water. Furthermore, SSLM is an effective tool in landscape optimization at the watershed scale.

Key words: peri-urban; landscape pattern; water environment; land use; source sink landscape model

城郊地区位于城市的边缘地带, 是城市生态系统向农业/自然生态系统的过渡区域. 城郊地区土地利用类型多样, 景观破碎且结构复杂, 使其相应的水土过程变得极为复杂^[1]. 城郊地区水土环境同时受到城市、工业和农业污染物的复合影响, 给城郊地区水土安全带来了极大的挑战^[2, 3]. 在过去几十年里, 抗生素被广泛应用于人类或动物有关疾病的治疗以及作为畜禽养殖中的生长促进剂^[4, 5]. 但抗生素无法被人体和动物完全吸收, 大量未被吸收利用的抗生素随着人或动物的新陈代谢排放到环境中^[6], 使

得水体和土壤环境中的抗生素含量持续增加, 并通过食物链等途径进入人体, 对人类健康和环境安全带来威胁, 这一问题在城郊地区尤为突出^[1, 7-9].

城郊地区土地利用组成及其空间分布对水体环境中的抗生素组成及浓度具有重要影响.^[10] 在解析

收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571130064); 中国科学院青年创新促进会项目(2018057)

作者简介: 李敏(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为景观生态学, E-mail: minli_st@rcees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: leiyang@rcees.ac.cn

这一过程的研究中,大量的研究使用水文模型或数理统计等方法来研究土地利用格局特征和流域水体环境的关系.其中,水文模型一般较为复杂,需要大量的基础空间数据和长时间序列的观测数据,模拟精度也在很大程度上取决于数据的质量^[11].利用景观格局指数等空间统计学方法来研究土地利用格局与水环境的关系,也是一种重要的方法^[12~14].例如,胡和兵等^[15]从景观和类型水平上研究了南京九河流域景观格局对河流水质状况的影响,发现景观格局对流域水质有显著的影响,而不同土地利用的聚集与连接度对水质指标的影响效应则有所不同. Bu 等^[16]将太子河流域的水质指标与景观格局指数进行耦合分析,探讨了土地利用模式与河流水质的关系.景观格局指数能定量景观格局信息,但当前景观格局指数只考虑了景观类型、面积、形状等信息,而没有很好地耦合生态过程,导致景观格局指数的生态学意义并不明确^[17,18].为解决这一问题,源汇景观格局理论将景观格局和生态过程有效结合,能够将景观类型、空间位置、地形特征与具体的生态过程融合在一起,解决了景观格局与生态过程脱节的问题^[19].根据该理论“源”是指一个生态过程的源头,“汇”是指一个生态过程消失的地方^[18].在抗生素等污染物的迁移过程中,由于人类活动强度不同,各土地利用类型表现出不同的源或者汇的功能,例如农田等由于有机肥的施用,极易成为水体抗生素的源景观,林地等则对抗生素污染起到削减的作用^[6,20].合理的土地利用布局可以通过空间上源、汇功能的改变减少流域出口的污染物,但如果土地利用布局不合理,则会促进污染物的富集.因而定量评价流域的源汇景观格局对水环境抗生素的影响,对于城郊生态系统水土安全和居民环境健康具有重要的科学意义和应用价值^[11,19,21].

本研究基于源汇景观格局理论,采用自主开发的源汇景观模型,以长三角典型城郊小流域为例,对不同子流域的水体抗生素组成和含量进行分析,探讨流域源汇景观格局对水体抗生素的影响,以期快速城市化发展过程中水环境健康的维持提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

研究区位于浙江省宁波市城郊樟溪流域(29°45′~29°51′N, 121°13′~121°20′E),研究区总面积 89.7 km²,属于亚热带季风气候,气候温和湿润,雨量充足,多年平均降水量在 1 470 mm 左右.研究区内樟溪为奉化江支流,上游为皎口水库,流经

章水、龙观和鄞江这 3 个乡镇,全长 14.5 km.研究区位于四明山区向宁绍平原的过渡地带,植被覆盖率较高,主要土地利用类型有城镇建设用地、农田、林地、园地和水库等,近年来土地利用受城镇化影响较大.农田主要以贝母、花生和蔬菜种植为主,园地主要以果蔬和苗圃为主,林地主要为亚热带常绿阔叶林.

基于流域的土地利用、水文路径和地形特征,设置了 16 个监测断面用于地表水的长期定位监测.根据监测断面的位置,将研究区划分为 16 个不同的子流域(图 1).图 2 表示了不同子流域的等级关系,例如 W1 子流域位于流域上游的位置,W2 监测断面位于 W1 的下方,其流域范围相对较大且包含了整个 W1 子流域.在每个子流域的出水口采集水样,采样时间为 2017 年 3~9 月,采样时每个采样点一次性采集水样 1L,放入棕色玻璃瓶中带回实验室分析.

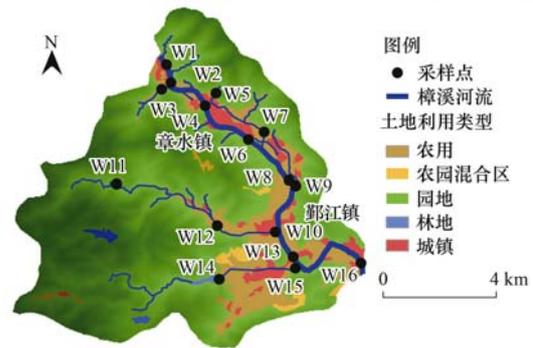


图 1 研究区土地利用和采样点分布示意

Fig. 1 Land use and water sampling sites of the study area

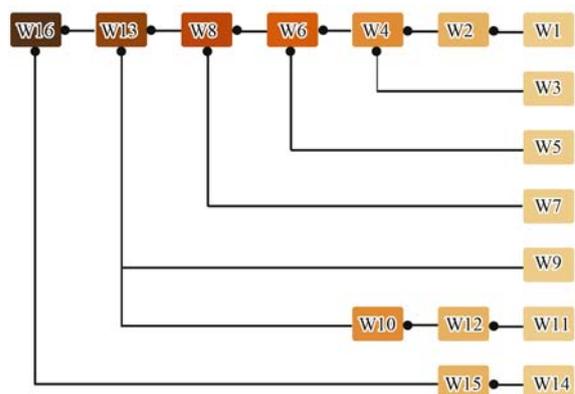


图 2 研究区不同等级子流域示意

Fig. 2 Schematic diagram of different sub-watersheds in the study area

1.2 实验仪器与试剂

实验仪器:超高效液相串联三重四级杆质谱仪、24 孔固相萃取仪、氮吹浓缩仪、Oasis HLB 小柱和 pH 计等.

实验试剂:本实验中所用到的丙酮、甲醇、乙酸、甲酸和乙二胺四乙酸二钠均为分析纯,实验用水为

超纯水. 目标抗生素的标准品均购自 Dr. Ehrenstorfer GmbH (德国), 目标抗生素共包含四大类: ①磺胺类抗生素 (SAs): 磺胺嘧啶 (SDZ)、磺胺砒啶 (SPD)、磺胺二甲嘧啶 (SMZ)、磺胺氯吡嗪 (SCP) 和磺胺甲噁唑 (SMX); ②四环素类抗生素 (TCs): 土霉素 (OTC)、金霉素 (CTC) 和四环素 (TC); ③喹诺酮类抗生素 (QNs): 氧氟沙星 (OFL)、环丙沙星 (CIP)、达氟沙星 (DANO)、恩诺沙星 (ENR) 和噁喹酸 (OXA); ④大环内酯类抗生素 (MLs): 克拉霉素 (CLA)、罗红霉素 (ROX)、林可霉素 (LIM) 和红霉素 (ERY).

1.3 样品处理

水样中抗生素的富集萃取参考文献 [22, 23] 中的方法, 将水样经过 $0.45 \mu\text{m}$ 的玻璃纤维进行过滤, 然后用 10% 的乙酸将溶液的 pH 调节至 3.5, 加入 0.2 g 乙二胺四乙酸二钠, 将溶液混合均匀; Oasis HLB 小柱预先用 6 mL 丙酮、6 mL 甲醇、6 mL 乙酸铵和 6 mL 超纯水进行活化, 之后使上面混匀的溶液匀速流过小柱; 用 5 mL 超纯水和 5 mL 5% 的甲醇溶液淋洗小柱, 抽真空 20 min, 再用 3 mL 甲醇、5 mL 含 1% 甲酸的甲醇溶液将抗生素洗脱, 最后用氮气吹干; 用混合溶剂 (甲醇: 含 1% 甲酸的水溶液 = 1: 1, 体积比) 定容至 1 mL, 密封于棕色样品瓶中, 冷藏于 -20°C 冰箱待高效液相色谱-串联质谱 (HPLC-MS/MS) 测定.

1.4 仪器分析与回收率测定

高效液相色谱 (Thermo Dionex Ultimate 3000) 串联三重四级杆质谱仪 (Thermo TSQ Vantage), 配液相色谱柱 (Waters Acquity UPLC BEH C18, $100 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$, $1.7 \mu\text{m}$). 色谱条件采用 Inertsil® ODS-SP 液相色谱柱 ($4.60 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, $5 \mu\text{m}$), 质谱条件采用 LC-MS/MS 的多反应监测 (MRM) 模式.

采用外标法定量, 分别配置标准溶液 (30、70、100、150、200 和 $300 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 使用一系列浓度的标准曲线, 保证标准曲线的理论点与实际点之间的偏差不超过 15%. 最后得到的抗生素的标准曲线 $R^2 > 0.99$, 抗生素回收率在 64.45% ~ 107.59% 范围内波动, 标准差均小于 20%.

1.5 源汇景观模型

源汇景观模型 (source-sink landscape model, SSLM) 是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开发的分布式评价模型. 源汇景观模型将源汇景观空间负荷比指数^[11] 开发为 ArcGIS 的 toolbox, 目前模型版本为 1.0 版. 源汇景观模型的输入数据为 DEM 数据、土地利用数据和流域出口位置. 运行模型需定义源景观和汇景观类型, 并根据具体的生态过程赋予不同源景观和汇景观权重.

通过源汇景观模型可以快捷地进行水文路径计算、流域划分、空间分析和流域土地利用数据提取等, 并通过海拔、坡度和距离等参数绘制不同源和汇景观的洛伦兹曲线, 最终计算出源汇景观负荷比指数.

根据研究区的土地利用特征、有机肥的使用情况, 将城镇、农田和园地划分为“源”景观, 将林地和水库划分为“汇”景观. 根据源汇景观功能的定义, 对于某一特定生态/环境过程而言, 景观作为源的功能越强, 其权重就越大; 而景观作为汇的功能越强, 其权重也越大. 由于不同土地利用类型对水体抗生素污染的贡献是不同的, 本研究借鉴通用土壤流失方程中植被覆盖与管理因子 C 值来表征各土地利用类型对水体抗生素污染的贡献^[11, 24, 25], 各土地利用类型的权重值如表 1.

表 1 源汇景观类型及权重

项目	土地利用类型	权重值
源景观	城镇	0.90
	农田	0.80
	园地	0.50
汇景观	林地	0.10
	水库	0.80

1.6 统计分析

源汇景观负荷比指数由源汇景观模型 (SSLM) 进行计算, 基于 Bray-Curtis 距离和聚类的非度量多维尺度分析 (NMDS) 识别不同子流域中抗生素的分布特征, 通过冗余分析 (RDA) 识别影响水体中抗生素的环境因素, 以上统计分析及作图均在 R 3.4.3 中完成.

2 结果与讨论

2.1 不同子流域的源汇景观特征

研究区土地利用分析表明, W9、W7、W16、W15 和 W8 子流域城镇、农田和园地面积较大, 所占的比例分别为 31.43%、24.72%、22.44%、22.22% 和 22.17%. 在上游地区, 如 W1、W3、W5 和 W11 子流域以林地为主; 而在中下游地区, 如 W16、W13 和 W15 子流域, 城镇面积明显增加. 研究区从上游至下游, “源”景观面积逐渐增加, “汇”景观面积则逐渐减少 (图 3).

基于源汇景观模型分析, 得到 16 个子流域的源汇景观负荷比指数. 由图 4 可知, 不同子流域源汇景观负荷比指数差异较大, 其中, W2、W4、W6 ~ W8、W13 和 W15 ~ W16 的源汇景观负荷比指数较高, 而 W3、W5、W11 和 W14 的景观负荷比指数较低. 由于从研究区的上游到下游, “源”景观的面积逐渐增大

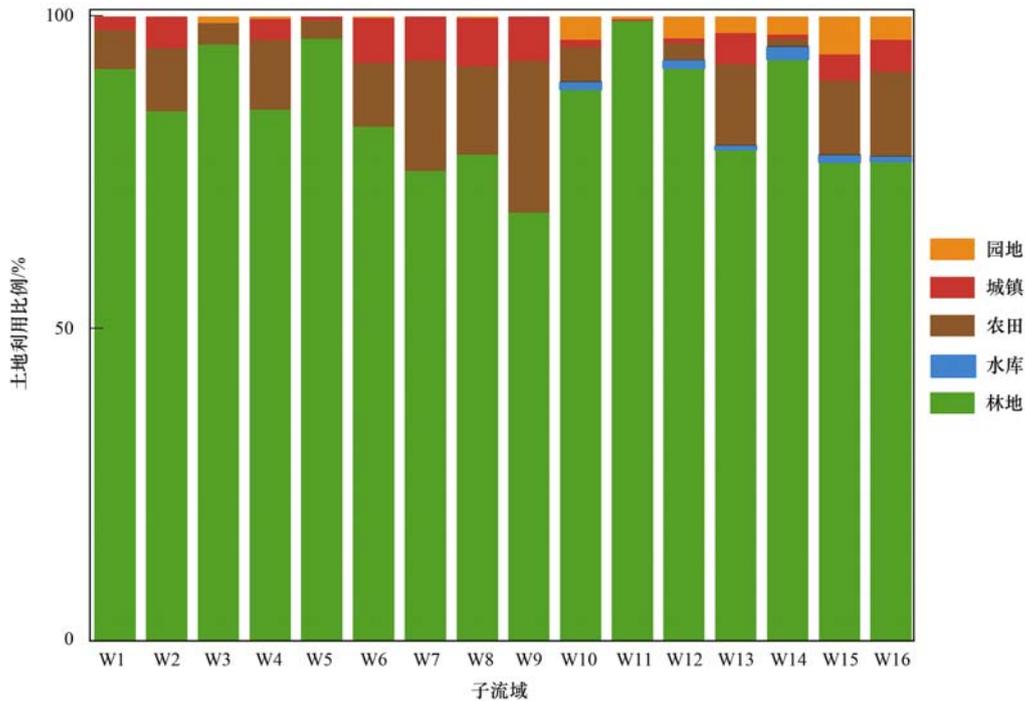


图 3 不同子流域土地利用比例

Fig. 3 Land use proportion in different sub-watersheds

而“汇”景观的面积逐渐减小,相应地,源汇景观负荷比指数从上游至下游也逐渐增大;另一方面,“源”景观和“汇”景观在地理空间上的布局,也影响了源汇景观负荷比指数在空间上的分布特征.由此可见,研究区“源”景观多位于河流下游区域,抗生素更容易在河流富集,增加水体污染强度,而“汇”景观多位于河流上游区域,不能够有效地对抗生素进行阻隔.

2.2 不同子流域水体抗生素的组成和含量特征

研究区水体抗生素总浓度的变化范围为 1.12 ~ 53.74 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,四大类目标抗生素在不同子流域内均有检测到.其中喹诺酮类抗生素的总浓度最高,

浓度为 53.74 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其次为大环内酯类抗生素 (24.21 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$).除噻啶酸在各子流域中未检出之外,其他种类抗生素均有检出,其中,磺胺甲噁唑 (SMX)、氧氟沙星 (OFL)、罗红霉素 (ROX) 3 种抗生素在 16 个子流域均有检出,说明这 3 种抗生素在研究区内有较为广泛的分布.研究区水环境中抗生素的检出浓度均为 ng 级别,与其他流域相比含量较低,例如山东省小清河流域抗生素的浓度范围为 $\text{nd} \sim 3\,900 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[26],海河流域水体抗生素的浓度范围为 0.12 ~ 385 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[27],黄浦江表层水中抗生素的含量为 36.71 ~ 313.44 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[28].这可能有两方面的原因:一方面主要由于研究区位于城郊地区,

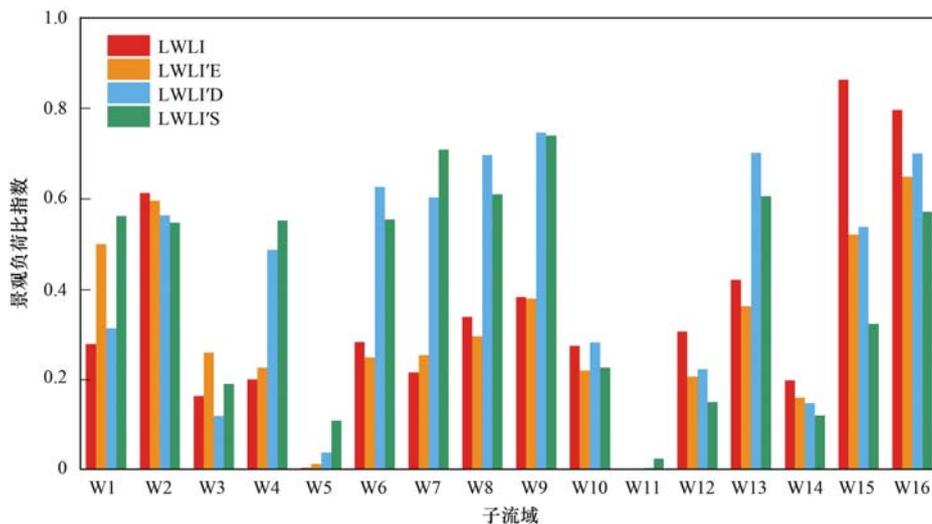


图 4 不同子流域景观负荷比指数

Fig. 4 Location-weighted landscape index (LWLI) in different sub-watersheds

是自然生态系统向城市生态系统的过渡区域,且林地面积比例较大(图3),人类活动强度相对其他流域较弱,抗生素的使用量也相对较少;另一方面也由于研究区位于长三角地区,降水相对较为丰富,使得流域内抗生素不易在水体中留存,从而使得研究区水环境中抗生素的检出浓度相对较低。

各类抗生素在不同子流域水体中的浓度差异较大,喹诺酮类与大环内酯类抗生素的浓度明显高于磺胺类和四环素类抗生素,喹诺酮类抗生素在 W7 子流域中浓度最高,达到了 $17.08 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,大环内酯类抗生素在 W15 子流域的浓度最高,为 $8.95 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,但是四环素类抗生素的检出量很少,在某些子流域甚至未检出,这可能与四环素类抗生素吸附性强,且易发生光解反应有关^[29, 30]。由图5可知,在 W2 ~ W3、W6 ~ W9 和 W15 ~ W16 子流域水体抗生素的浓度分别出现了3个高峰,进一步分析发现这3个区域具有较大面积的城镇和农田分布,这表明城镇和农田这种高人类活动强度的土地利用类型是水体抗生素的重要来源。如表2所示, W15 子流域含有抗生素种类最多,达到11种,这可能与其毗邻城镇、并且河流沿岸分布有一定面积的农田和园地有关。这种土地利用格局使得药用和有机肥中的抗生素容易随着地表径流进入水体环境中,影响水体中抗生素的种类和浓度。基于聚类的非度量多维尺度分析(NMDS),可以将16个子流域分为3组,同组内的抗生素种类和含量具有相似性。进一步结合各组内子流域的土地利用格局发现,各组内的“源汇”景观组成具有一定的相似性(图6),如Group1

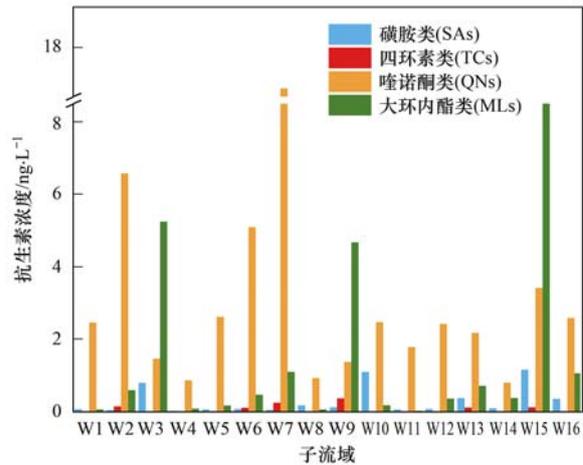


图5 不同子流域水体抗生素浓度

Fig. 5 Concentration of antibiotics in surface water of different sub-watersheds

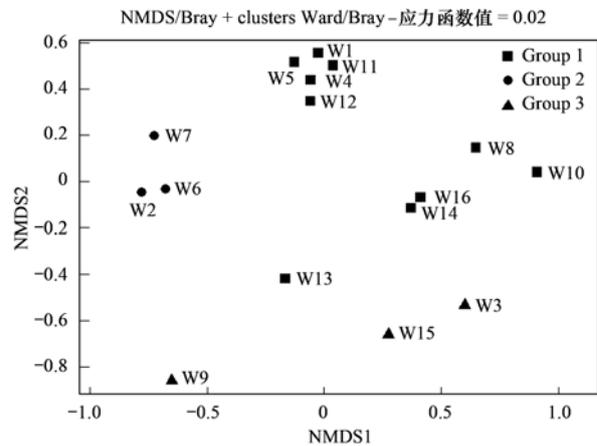


图6 基于聚类的非度量多维尺度分析(NMDS)

Fig. 6 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination sub-watersheds based on cluster

表2 不同子流域水体抗生素种类

Table 2 Types of antibiotics in surface water in different sub-watersheds

子流域	农田	城镇	林地	水库	园地	抗生素种类	抗生素种类数
W1	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、LIM	4
W2	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、TC、ENR、CLA、LIM、ERY	8
W3	√	—	√	—	—	SMX、OFL、ROX、CIP、CLA、LIM、ERY	7
W4	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX	3
W5	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、ERY	4
W6	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、CTC、CLA、LIM、ERY	7
W7	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、OTC、TC、CLA、LIM、ERY	8
W8	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、LIM	4
W9	√	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、OTC、TC、CLA、LIM、ERY	8
W10	√	√	√	√	√	SMX、OFL、ROX、SCP、LIM	5
W11	—	√	√	—	—	SMX、OFL、ROX、DANO	4
W12	√	√	√	√	√	SMX、OFL、ROX、LIM、ERY	5
W13	√	√	√	√	√	SMX、OFL、ROX、SCP、TC、CLA、LIM、ERY	8
W14	√	√	√	√	√	SMX、OFL、ROX、LIM、ERY	5
W15	√	√	√	√	√	SMX、OFL、ROX、SDZ、SPD、SMZ、SCP、TC、CLA、LIM、ERY	11
W16	√	√	√	√	√	SMX、OFL、ROX、SPD、CLA、LIM、ERY	7

中子流域 W1、W4、W5、W11 和 W12 内均包含较大面积的“源”景观,如农田、城镇,而“汇”景观的面积相对较小,而 Group2 和 Group3 中子流域所包含的“源”景观面积较小,而“汇”景观面积较大.这一结果表明,具有相似“源汇”景观格局的子流域中,水体抗生素的组成和含量也具有一定的相似性.

2.3 源汇景观格局与水体抗生素的关系

源汇景观模型将源汇景观格局和水文过程结合起来,能够更清晰地揭示水体抗生素的汇集过程,定量评价水体抗生素的相对污染程度,明确不同的景观类型和空间配置对水体抗生素污染的贡献.

由研究区水体抗生素浓度与土地利用类型和景观负荷比指数的相关分析可知,磺胺类抗生素(SAs)与各土地利用百分比均呈正相关,而四环素类抗生素(TCs)与喹诺酮类抗生素(QNs)与各土地利用百分比均呈负相关(图7).除磺胺类抗生素与基于距离的景观负荷比指数(LWLI.D)和基于坡度的景观负荷比指数(LWLI.S)呈负相关之外,水体抗生素总浓度以及其他种类抗生素均与源汇景观负荷比指数呈正相关关系,说明源汇景观负荷比指数越大的子流域,水体抗生素的浓度越高.进一步进行冗余分析(RDA)可知(图8),景观负荷比指数和各土地利用比例对水体中各类抗生素的影响程度不同,

大环内酯类抗生素与源汇景观负荷比指数(LWLI)的关系密切,喹诺酮类抗生素受土地利用的坡度分布(LWLI.S)影响最大,磺胺类抗生素受园地面积比例的影响较大.但四环素类抗生素受源汇景观负荷比指数和土地利用影响较小,这可能与四环素类抗生素本身易光解且吸附性强的特点有关,导致流域中四环素类抗生素的含量变异较大.

研究区水体抗生素的浓度受源汇景观格局的影响较大,在源汇景观负荷比指数大的子流域,如 W15(0.863)和 W16(0.795)子流域,其位于河流下游,城镇、农田和园地等“源”景观面积较大,且靠近子流域出口位置,而林地等“汇”景观面积较小,且远离子流域出口,水体抗生素污染的来源多且不容易受到“汇”景观的拦截;在源汇景观负荷比指数较小的子流域,如 W5(0.004)、W11(0.0005)和 W14(0.198),其均位于河流上游,“源”景观面积较小而“汇”景观面积较大,水体抗生素的来源少且不容易富集,因而检测出的水体抗生素浓度也较低.

基于以上分析可知,源汇景观模型能够较为准确和方便地揭示影响水体抗生素污染的主要景观特征,有助于景观格局优化设计和水体污染物的控制.城郊地区城镇和农田分布广泛,且“源”景观破碎化程度较高,通过景观格局的优化使“源”“汇”景观在

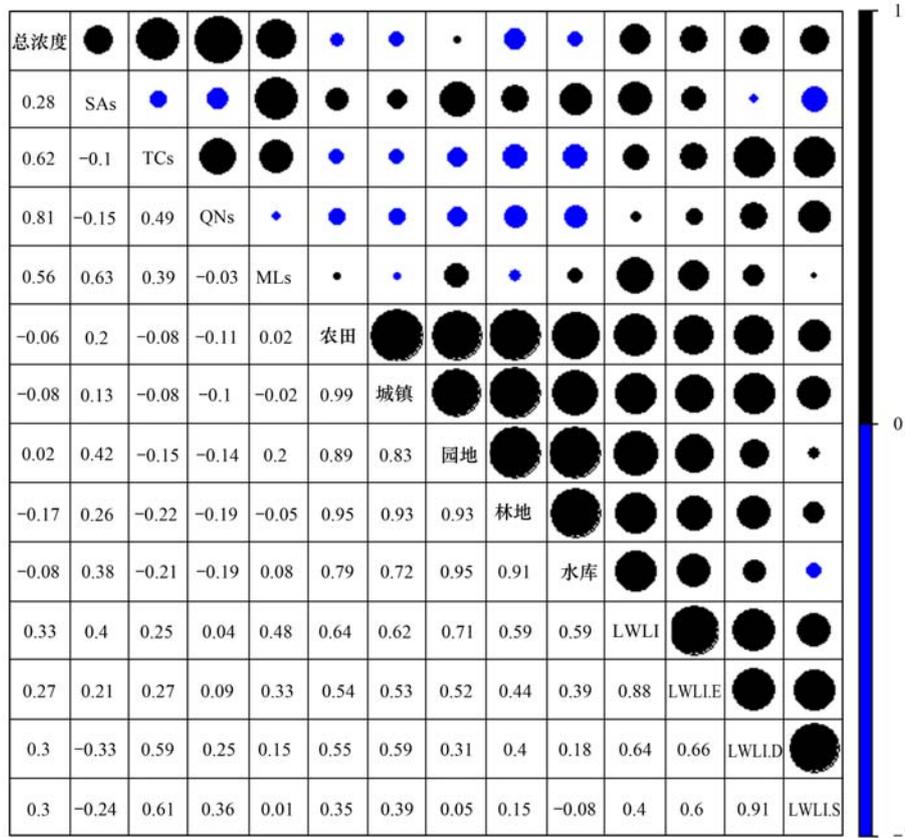


图7 水体抗生素浓度与景观特征的相关分析

Fig. 7 Correlations between antibiotic concentrations in surface water and landscape characteristics

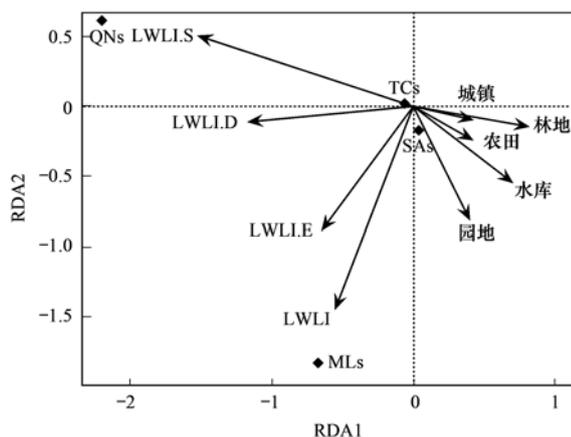


图8 抗生素浓度与景观特征冗余分析(RDA)

Fig. 8 Redundancy analysis (RDA) showing antibiotic concentrations in relation to landscape characteristics

空间上更为合理地分布,在控制“源”景观中污染物释放的同时,增强“汇”景观在污染物传输过程中的调节功能,从而改善流域水体抗生素污染状况。

3 结论

(1)研究区上游至下游,“源”景观如城镇和农田,面积逐渐增大,“汇”景观如林地等,面积逐渐减小,源汇景观负荷比指数从上游至下游逐渐增大。研究区“源”景观多位于河流下游,导致抗生素容易在河流富集,而“汇”景观多位于河流上游区域,不能够有效地对抗生素进行阻隔。

(2)研究区不同子流域水体中四类抗生素均有检出,抗生素总浓度的变化范围为 $1.12 \sim 53.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,喹诺酮类抗生素的浓度最高,其次为大环内酯类抗生素;在不同子流域,抗生素的浓度和种类差异较大。源汇景观格局相似的子流域中的抗生素的组成和含量具有一定的相似性。

(3)源汇景观负荷比指数与水体抗生素的浓度呈正相关关系,源汇景观负荷比指数较大的子流域中,“源汇”景观空间布局不够合理,“源”景观面积较大而“汇”景观面积较小,且“源”景观分布于接近流域出口的位置,使得水体抗生素富集风险增加。通过格局优化使“源”“汇”景观在空间上更为合理地分布,可以改善流域水体抗生素污染状况。

参考文献:

[1] Zhu Y G, Reid B J, Meharg A A, *et al.* Optimizing peri-urban ecosystems (PURE) to re-couple urban-rural symbiosis [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1085-1090.

[2] Midmore D J, Jansen H G P. Supplying vegetables to Asian cities: is there a case for peri-urban production? [J]. *Food Policy*, 2003, **28**(1): 13-27.

[3] 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 等. 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2095-2103.

Liang M Q, Shao M L, Cao C L, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter (DOM) and relationship with dissolved heavy metals in a peri-urban and an urban river [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2095-2103.

[4] Allen H K, Donato J, Wang H H, *et al.* Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(4): 251-259.

[5] Carvalho I T, Santos L. Antibiotics in the aquatic environments: a review of the European scenario [J]. *Environment International*, 2016, **94**: 736-757.

[6] 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 等. 长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5237-5246.

Zhao F K, Chen L D, Yang L, *et al.* Composition and distribution of antibiotics in soils with different land use types in a typical peri-urban area of the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5237-5246.

[7] Zhou L J, Ying G G, Zhao J L, *et al.* Trends in the occurrence of human and veterinary antibiotics in the sediments of the Yellow River, Hai River and Liao River in northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(7): 1877-1885.

[8] Martínez J L. Antibiotics and antibiotic resistance genes in natural environments [J]. *Science*, 2008, **321**(5887): 365-367.

[9] 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 等. 辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4553-4561.

Zhang X J, Bai Y W, Zhang Y, *et al.* Occurrence, distribution, and ecological risk of antibiotics in surface water in the Liaohe River Basin, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4553-4561.

[10] 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1091-1097.

Han L Y, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Effects of land use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Lanlingxi watershed of the three gorges reservoir area, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1091-1097.

[11] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2406-2413.

Chen L D, Fu B J, Xu J Y, *et al.* Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological processes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2406-2413.

[12] 曹灿, 张飞, 阿依尼格尔·亚力坤, 等. 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1568-1577.

Cao C, Zhang F, Ayinigeer Y, *et al.* Relationship between landscape pattern and water quality in the Ebinur Lake region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1568-1577.

[13] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 64-72.

Huang J L, Li Q S, Hong H S, *et al.* Preliminary study on linking land use & landscape pattern and water quality in the Jiulong River watershed [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 64-72.

[14] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1775-1783.

Zhang D W, Li Y F, Sun X, *et al.* Relationship between

- landscape pattern and river water quality in Wujingang region, Taihu Lake watershed [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- [15] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 794-801.
- Hu H B, Liu H Y, Hao J F, *et al.* Influence of spatial difference on water quality in Jiuxiang River watershed, Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 794-801.
- [16] Bu H M, Meng W, Zhang Y, *et al.* Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 187-197.
- [17] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5521-5531.
- Chen L D, Liu Y, Lü Y H, *et al.* Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(11): 5521-5531.
- [18] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2006, **26**(5): 1444-1449.
- Chen L D, Fu B J, Zhao W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(5): 1444-1449.
- [19] Chen L D, Tian H Y, Fu B J, *et al.* Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale [J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, **19**(1): 37-45.
- [20] Zhao F K, Chen L D, Yang L, *et al.* Distribution, dynamics and determinants of antibiotics in soils in a peri-urban area of Yangtze River Delta, Eastern China [J]. *Chemosphere*, 2018, **211**: 261-270.
- Zhao F K, Chen L D, Yang L, *et al.* Effects of land use and rainfall on sequestration of veterinary antibiotics in soils at the hillslope scale [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114112.
- [22] Zhang H, Du M M, Jiang H Y, *et al.* Occurrence, seasonal variation and removal efficiency of antibiotics and their metabolites in wastewater treatment plants, Jiulongjiang River Basin, South China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(1): 225-234.
- [23] Gao L H, Shi Y L, Li W H, *et al.* Occurrence of antibiotics in eight sewage treatment plants in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(6): 665-671.
- [24] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(8): 1033-1036.
- Zhang Y, Yuan J P, Liu B Y. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(8): 1033-1036.
- [25] 谢云, 林燕, 张岩. 通用土壤流失方程的发展与应用[J]. *地理科学进展*, 2003, **22**(3): 279-287.
- Xie Y, Lin Y, Zhang Y. The development and application of the universal soil loss equation [J]. *Progress in Geography*, 2003, **22**(3): 279-287.
- [26] 李嘉, 张瑞杰, 王润梅, 等. 小清河流域抗生素污染分布特征与生态风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(7): 1384-1391.
- Li J, Zhang R J, Wang R M, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of antibiotic pollution in Xiaoqing River watershed [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(7): 1384-1391.
- [27] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [28] Jiang L, Hu X L, Yin D Q, *et al.* Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(6): 822-828.
- [29] 郭晓, 李国良, 刘孝利, 等. 梅江流域沉积物中四环素类抗生素的空间分布特征及其迁移转化规律[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3202-3209.
- Guo X, Li G L, Liu X L, *et al.* Spatial distribution, transportation and transformation of tetracyclines antibiotics in Meijiang River Catchment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3202-3209.
- [30] 胡学香, 陈勇, 聂玉伦, 等. 水中四环素类化合物在不同光源下的光降解[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(8): 2465-2469.
- Hu X X, Chen Y, Nie Y L, *et al.* Photodegradation of tetracyclines compound in aqueous solution under different light irradiation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(8): 2465-2469.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai; Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differences in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, et al. (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, et al. (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, et al. (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, et al. (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, et al. (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, et al. (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, et al. (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, et al. (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, et al. (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, et al. (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, et al. (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, et al. (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, et al. (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, et al. (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, et al. (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, et al. (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, et al. (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, et al. (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, et al. (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, et al. (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, et al. (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, et al. (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, et al. (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, et al. (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, et al. (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, et al. (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, et al. (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, et al. (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, et al. (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, et al. (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, et al. (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, et al. (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, et al. (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, et al. (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, et al. (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, et al. (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, et al. (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, et al. (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, et al. (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, et al. (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, et al. (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, et al. (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, et al. (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, et al. (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, et al. (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, et al. (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, et al. (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, et al. (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, et al. (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, et al. (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)