

目次

|                                                                   |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例                                | 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)                            |
| 基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径                                             | 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)                                       |
| 城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用                                                 | 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)                                      |
| 基于可解释性机器学习的城市 O <sub>3</sub> 驱动因素挖掘                               | 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)                            |
| 基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析                                                 | 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)                               |
| 基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O <sub>3</sub> 来源解析                     | 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)                            |
| 基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测                                             | 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)                                 |
| 2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析                                   | 李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)                                            |
| 夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响                                        | 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)                                          |
| 气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别                      | 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)                          |
| 2000~2021 年成渝城市群 PM <sub>2.5</sub> 时空变化及驱动机制多维探测                  | 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)                                  |
| 基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM <sub>2.5</sub> 小时浓度估算                   | 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)                               |
| 2013~2021 年邢台 PM <sub>2.5</sub> 重污染过程输送和增长特性                      | 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)                                    |
| 基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源                            | 朱书慧 (3760)                                                         |
| 机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征                                          | 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)                               |
| 沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献                                     | 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)                                      |
| 疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估                                     | 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)                       |
| 西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势                                           | 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)                             |
| 淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价                                    | 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)                                |
| 雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应                                      | 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)                                               |
| 流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例                                     | 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)                           |
| 南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化                                               | 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)                                          |
| 闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析                                           | 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)                                |
| 金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素                                       | 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)                               |
| 嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性                                             | 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)                             |
| 水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响                                       | 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)                              |
| 典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探                                        | 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)                             |
| 太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响                                        | 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)                            |
| 基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算                                            | 张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)                                               |
| 千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别                                          | 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)                                  |
| 沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征                                            | 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)                     |
| 外秦淮河底泥污染及疏浚效果                                                     | 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)                                        |
| 新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为                                           | 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)                             |
| 镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制                                                | 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)                                           |
| 环糊精催化 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 氧化水中有机微污染物 | 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)                                               |
| Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制                                    | 朱敬林, 汪舒 (3990)                                                     |
| 微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征                                            | 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)                    |
| 中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价                                           | 王静, 魏恒, 潘波 (4006)                                                  |
| 渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价                                         | 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)                               |
| 基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例                         | 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)                                       |
| 乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价                                     | 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039) |
| 荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制                                            | 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)                                          |
| 近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展                                        | 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)                                     |
| 改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展                                               | 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)                                                |
| 沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析                                      | 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)                                |
| 两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果                                           | 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)                                  |
| 秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响                                      | 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)                |
| 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质                                          | 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)                                        |
| 基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断                                         | 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)                                |
| 地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价                                              | 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)                                            |
| 浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险                                              | 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)                                          |
| 生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响                                      | 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)                                      |
| 低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响                                           | 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)                            |
| 沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响                                        | 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)                                   |
| 大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征                                       | 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)                                        |
| 马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响                                     | 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)                              |
| 《环境科学》征订启事(3648)                                                  |                                                                    |
| 《环境科学》征稿简则(3659)                                                  |                                                                    |
| 信息                                                                | (3714, 4150, 4178)                                                 |

# 千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别

俞珂<sup>1,2</sup>, 严琰<sup>1</sup>, 唐张轩<sup>1</sup>, 张方方<sup>1,2</sup>, 何圣嘉<sup>1,2\*</sup>, 姜培坤<sup>1,2</sup>

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2. 浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 杭州 311300)

**摘要:** 非点源污染的准确定量是流域非点源污染控制和治理的基本前提和重要保障. 在综合考虑基流非点源污染的前提下, 对传统输出系数模型(ECM)进行优化和改进, 建立以周为时间步长的输出系数模型(IECM), 实现上梧溪流域不同土地利用类型地表径流非点源总氮(TN)污染更加准确的定量识别. 结果表明, IECM可以有效实现该流域TN负荷的模拟定量, 校准期与验证期的纳什系数(NSE)分别为0.82和0.77,  $R^2$ 分别为0.87和0.84. 基于IECM得到的上梧溪流域2020年11月至2021年10月地表径流和基流的TN输出强度分别为 $5.74 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $9.85 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 分别占总径流负荷的36.80%和63.20%. 相较于IECM, ECM由于未考虑基流对非点源污染的贡献, 其估算的地表径流TN负荷量较IECM高54.21%. 显然, 直接将基流非点源污染归结于地表径流将导致地表径流负荷输出强度的严重高估. 基于IECM计算得到的上梧溪流域水田、草地、林地、旱地和人居地的以地表径流形式输出的非点源污染TN输出强度分别为10.95、5.42、5.20、12.34和2.77  $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 上述各地类产生的地表径流TN负荷量占总径流负荷的比例分别为5.80%、4.00%、26.55%、0.38%和0.03%. 因此, 该流域今后非点源氮(N)污染的治理应重点围绕流域地下水非点源的污染防治与管理, 以及对耕地(水田和旱地)地表径流非点源污染负荷输出的控制.

**关键词:** 非点源污染; 氮; 输出系数模型; 基流; 数字滤波

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3923-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207207

## Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region

YU Ke<sup>1,2</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>, TANG Zhang-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Fang-fang<sup>1,2</sup>, HE Sheng-jia<sup>1,2\*</sup>, JIANG Pei-kun<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** Accurate quantification of non-point source pollution is an important step for non-point source pollution control and management at the watershed scale. Considering the non-point source pollution from baseflow, an improved export coefficient model (IECM) on a weekly scale was established based on the traditional export coefficient model (ECM), which was then used to estimate the surface flow non-point source total nitrogen (TN) loads contributed by different land use types of the Shangwu River watershed in the Qiandao Lake Region. The results showed that IECM performed well for the predictions of TN loads in the studied watershed, with the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and  $R^2$  values of 0.82 and 0.77 ( $P < 0.01$ ) for the calibration period and 0.87 and 0.84 ( $P < 0.01$ ) for the validation period, respectively. The IECM estimated TN exports through surface flow and baseflow were  $5.74 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  and  $9.85 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  from the Shangwu River watershed in the period of Nov. 2020 to Oct. 2021, which accounted for 36.80% and 63.20% of the corresponding streamflow TN load, respectively. Without consideration of the baseflow non-point source TN pollution, the ECM-estimated surface flow TN loading was 54.21% higher than that estimated by IECM. Obviously, attributing baseflow non-point source pollution to surface flow directly would lead to a serious load overestimation of surface flow. According to IECM, the estimated TN export intensity through surface flow from paddy fields, grasslands, woodlands, rainfed croplands, and residential lands was 10.95, 5.42, 5.20, 12.34, and 2.77  $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , respectively, which accounted for 5.80%, 4.00%, 26.55%, 0.38%, and 0.03% of the corresponding total streamflow TN loads. Therefore, the future management of non-point source nitrogen pollution in the studied watershed should focus mainly on the prevention and management of groundwater non-point source pollution and control of load export from surface flow on cultivated land (paddy fields and rainfed croplands).

**Key words:** non-point source; nitrogen; export coefficient model; baseflow; digital filter

随着点源污染控制程度的逐步提高<sup>[1]</sup>, 由农业生产、农村生活以及大气沉降等引起的非点源污染已经成为地表水环境的首要污染源<sup>[2]</sup>. 由于非点源污染具有成分复杂, 类型多样, 发生模式间歇性, 发生时间不确定, 排放和排放模式多样性、难以确定, 时空变化迅速等特点<sup>[3]</sup>, 使非点源污染的监测和控制非常困难. 因此, 为了有效解决非点源污染的定量模拟及后续评价, 非点源污染模型应运而生. 目前常用的非点源污染负荷定量评价模型大体可以分为以下3种: 输出系数模型、实证模型和机制模型<sup>[4]</sup>. 其

中, 输出系数模型因结构简单和数据容易获取等特点<sup>[2]</sup>, 在非点源污染的定量研究中得到了广泛应用<sup>[5-8]</sup>, 并被认为是模拟流域营养物质污染的一种有效方法. 近几十年来, 国内外学者就土地利用变化<sup>[9]</sup>、土壤条件<sup>[9]</sup>、景观格局<sup>[10]</sup>、降雨径流<sup>[11]</sup>和

收稿日期: 2022-07-21; 修订日期: 2022-09-19

基金项目: 浙江省重点研发项目(2019C03121); 浙江省自然科学基金项目(LY21D010001); 国家自然科学基金项目(41807154)

作者简介: 俞珂(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域非点源污染定量模拟, E-mail: yuke\_0701@126.com

\* 通信作者, E-mail: hesj86@sina.cn

地形<sup>[12]</sup>等方面对输出系数模型进行了不断的优化和改进,使其模拟精度得到了较大的提升。

然而,由于专门针对非点源监测的网点较少和数据库不够完善等<sup>[4]</sup>原因,传统输出系数模型(ECM)在实际的应用中普遍采用经验值,导致其估算得到的非点源污染负荷在特定区域的特定时间段的估计仍具有很大的不确定性<sup>[12]</sup>。此外,此类输出系数模型通常以年为时间尺度,使得其在进行非点源污染养分溯源时,难以从季节性角度对其模拟结果进行分析<sup>[13]</sup>。而且,现有的水文模型和输出系数法大多都直接将所有的污染负荷归结于地表径流,很少考虑到基流的污染贡献<sup>[14]</sup>。作为河道径流的重要组成部分,基流通常是指来源于地下水及其他滞后水源的那部分径流<sup>[15,16]</sup>,它不仅是河道径流在枯水季节的基本流量,同时也是丰水期河道径流的一个重要补给来源,在保障工农业及生活用水安全以及维系流域基本生态功能等方面具有重要作用<sup>[17]</sup>。近年来,越来越多的研究证实基流是流域尺度上非点源污染物输出的一个重要途径<sup>[18,19]</sup>。因此,本文在充分考虑基流非点源污染贡献的基础上,结合气象回归统计模型和数值优化算法,建立一种以周为时间尺度的输出系数模型,定量评价千岛湖地区上梧溪流域的非点源 TN 负荷量,以期为今后流域尺度非点源污染的定量评价以及分类识别提供数据和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

上梧溪流域(118°50′~118°55′E, 29°19′~29°27′N,图1)作为千岛湖流域一小支流,位于浙江省杭州市淳安县安阳乡,总面积约68.5 km<sup>2</sup>,平均海拔456 m。上梧溪发源于安阳乡三井尖,最终向北注入千岛湖,河流全长12 km,河道平均比降19.7‰,多年平均径流量约为0.51 亿 m<sup>3</sup>。该流域主要受亚热带季风性气候控制,多年平均气温18℃,多年平均降雨量和蒸发量分别为1515 mm和804 mm。降雨主要集中在5~9月且以梅雨和台风雨为主。研究区内林地占比高达79.6%,水田和旱地共占8.7%,人居地所占比例仅为0.2%。研究区内无工业废水排放,且根据相关部门统计,研究区农村生活污水治理设施全覆盖,自然村保洁员全覆盖,农村环境整治率达100%,并无大型畜禽养殖。因工业和农村生活产生的点源污染基本可以忽略,农业生产导致的非点源污染则是该地区地表水体的首要污染源。

### 1.2 基础数据获取

于2020年11月至2021年10月,对上梧溪流域出口处(图1)的水文水质状况进行定期监测。其

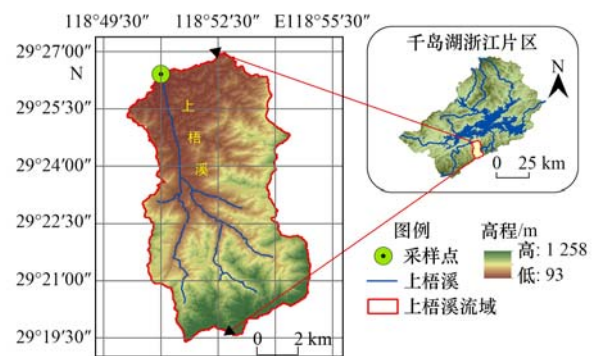


图1 上梧溪流域区位和水文水质监测点示意

Fig. 1 Geographic location and hydrological water quality monitoring site of the Shangwu River watershed

中,水质监测频率为每周一次;水文流量监测采用流速仪法,以日为步长,具体方法参考《河流流量测验规范》(GB 50179-2015)。水样从河道中间离水面30 cm处采集,装于2.5 L聚乙烯瓶之中。水样采集完成以后立即将水样运回实验室,在采水后24 h内,利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测总氮。千岛湖流域2020年11月至2021年10月逐日气象数据由淳安县气象局提供。利用ARCGIS软件的统计分析功能对流域内各种数据进行统计分析,得到上梧溪流域各类土地利用面积,并将研究区域土地利用类型分为水田、草地、林地、水域、旱地和人居地。以监测获得的离散水文和水质数据为基础,利用Load Estimator(LOADEST)模型计算得到本研究区日尺度上的非点源TN负荷量,具体的计算方程及其参数率定结果见表1。

#### 1.2.1 基流分割

Eckhardt<sup>[20]</sup>于2005年提出了“双参数”滤波方法(ERDF),将退水常数和最大基流指数(BFI<sub>max</sub>)引入到传统的数字滤波方程中:

$$b_k = \frac{(1 - \text{BFI}_{\max})ab_{k-1} + (1 - a)\text{BFI}_{\max}y_k}{1 - a\text{BFI}_{\max}} \quad (1)$$

式中, $y_k$ 为 $k$ 时刻的总径流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); $b_k$ 为 $k$ 时刻的基流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); $k$ 为时间(d); $a$ 为退水常数( $0 < a < 1$ );BFI<sub>max</sub>为最大基流指数。

退水分析:根据经验公式 $N = 0.83A^{0.2}$ [式中, $N$ 为洪水峰值后地表径流完全停止所需天数; $A$ 为流域面积( $\text{km}^2$ )]<sup>[21]</sup>确定纯基流退水的起始点。将满足条件 $y_1 > y_2 > \dots > y_k > y_{k+1} > y_{k+2}$ 的流量数据 $y_k$ 和 $y_{k+1}$ 从日流量序列中筛选出来,得到纯基流退水过程<sup>[22]</sup>;所选退水过程的最小长度为5 d。由于本研究区降雨发生频率较高,退水分析时需尽量排除降雨的干扰。

ERDF参数确定:根据退水分析从日流量序列中筛选出纯基流退水段的流量数据并绘制散点图,

表 1 基于 LOADEST 模型的上梧溪流域逐日 TN 负荷定量<sup>1)</sup>  
Table 1 Estimation of daily TN loads of the Shangwu River watershed by LOADEST

| 负荷量计算模型                                                                                                                                     | 参数率定       |          |         |       |       | 模拟结果评价指标                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|---------|-------|-------|-------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                             | 参数         | 参数值      | 标准差     | t 检验值 | 显著性   |                                                             |
| $\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_5 \text{dtime} + a_6 \text{dtime}^2$ | $\alpha_0$ | 4.145 3  | 0.173 0 | 23.96 | <0.01 | AIC = 0.338<br>SCR = 0.166<br>PPCC = 0.991<br>$R^2 = 0.932$ |
|                                                                                                                                             | $\alpha_1$ | 0.934 3  | 0.057 7 | 16.20 | <0.01 |                                                             |
|                                                                                                                                             | $\alpha_2$ | 0.062 6  | 0.047 2 | 1.33  | <0.01 |                                                             |
|                                                                                                                                             | $\alpha_3$ | -0.152 8 | 0.091 1 | -1.68 | <0.01 |                                                             |
|                                                                                                                                             | $\alpha_4$ | 1.135 2  | 0.211 8 | 5.36  | <0.01 |                                                             |
|                                                                                                                                             | $\alpha_5$ | -0.354 4 | 0.245 2 | -1.45 | <0.01 |                                                             |
|                                                                                                                                             | $\alpha_6$ | 10.544 8 | 2.095 6 | 5.03  | <0.01 |                                                             |

1)  $L$  为污染物日负荷量( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $Q$  为径流量(mm); dtime 为中心化之后的分数日期(dtime = decimal time - center of decimal time);  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  和  $a_6$  为方程系数; SCR 为残差序列相关系数,用于检验残差是否存在序列相关性,其值越小,说明残差之间相互独立,方程中涉及的变量不存在序列相关性; PPCC 为概率曲线相关系数,检验模型的残差是否服从标准正态分布

利用过原点的线性方程对散点图上边界进行拟合<sup>[22]</sup>,从而得到上梧溪流域各月的退水常数  $a$ ,在此基础上拟合得到一阶傅里叶函数方程,构建日退水常数的计算方程[式(2)],利用退水分析筛选得到的日基流量和遗传算法实现方程参数的优化求解,计算得到逐日的退水常数(图 2)以及  $\text{BFI}_{\max}$  最优值(0.597)。

$$\begin{cases} a(t) = Fa(t) + R(t) \\ R(t) = \beta_0 E(i) + \beta_1 P(i) + \beta_3 \sin[\text{dtime}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $a(t)$  为日基流退水常数优化方程;  $Fa(t)$  为月退水常数傅里叶拟合函数;  $R(t)$  为修正函数;  $E$  和  $P$  分别为蒸发量和降雨量;  $t$  为时间,通常以 1 d 为步长; dtime 为校正之后的分数时间(dtime = decimal time - center of decimal time);  $\beta_0$ 、 $\beta_1$  和  $\beta_3$  为拟合参数,其优化目标函数见式(3):

$$\begin{aligned} \text{Max NSE} &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{mean}})^2}, \\ \text{s. t. } \begin{cases} Q_i^{\text{sim}} \leq Q_i^{\text{obs}}, \\ Q_i^{\text{sim}} \geq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $Q_i$  为第  $i$  天基流量;上标 obs、sim 和 mean 分

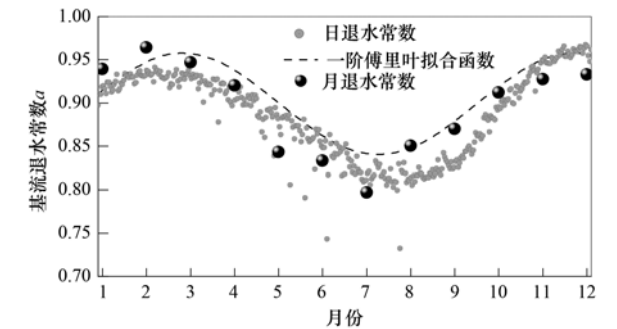


图 2 上梧溪流域月平均退水常数及逐日退水常数  
Fig. 2 Monthly and daily regression constants  
of the Shangwu River watershed

别为实测值、模拟值和平均值; s. t. 为约束条件. 其中,基流模拟值是由 ERDF 分割得到,基流实测值则是根据退水分析,从日实测径流量序列中筛选得到。

1.2.2 基流负荷分割

在双参数递归数字滤波的基础上,利用数值优化算法计算得到逐日的基流负荷消退参数[式(2)],建立递归滤波基流负荷分割算法(RFLSA)<sup>[23]</sup>对本研究区的基流非点源 TN 负荷进行定量分割:

$$\tau(t) = \lambda_0 + \lambda_1 a(t) + \lambda_2 E(t) + \lambda_3 P(t) \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为基流负荷消退参数;  $a$  为退水参数;  $P$  和  $E$  分别为降雨量和蒸发量;  $t$  为时间(以天为单位);  $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  为拟合参数。

1.3 传统输出系数模型

传统输出系数模型(ECM)通过直接建立土地利用类型与非点源污染之间的关系来评价土地利用与湖泊富营养之间的关系<sup>[24]</sup>:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i(I_i) + p \quad (5)$$

式中,  $L$  为各类土地某种污染物总输出量( $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $E_i$  为第  $i$  类土地利用类型的某种污染物输出系数[ $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ];  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型面积( $\text{hm}^2$ );  $I_i$  为营养源的养分输入( $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $p$  为降雨直接进入水体的养分量( $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ )。

1.4 改进的输出系数模型

在充分考虑基流非点源污染贡献的前提下,通过优化和改进传统输出系数模型,以周为时间步长,结合各类污染源(农村生活、大气沉降和土地利用)和影响因子,得到改进的输出系数模型:

$$\begin{cases} L(t) = \sum_{i=1}^n \{ A_i [X_i + S_i(t)] W(t) \} + \\ \quad \text{BL}(t) + M(t) + D(t) \\ S_i(t) = f[P(t), E(t), T(t), R(t), \dots] + \eta \\ \quad = P(t)\theta_1 + E(t)\theta_2 + T(t)\theta_3 + \\ \quad \quad R(t)\theta_4 + \eta \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $L$  为非点源污染物入河量(kg);  $BL$  为基流非点源污染负荷量(kg);  $n$  为土地利用类型数量;  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型面积( $\text{hm}^2$ );  $X_i$  为第  $i$  种土地利用类型某一周单位面积某种污染物的排放量 [ $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ ];  $S_i$  为关于气象因子的一个函数, 为  $X_i$  的修正参数;  $W(t)$  为某周地表径流量与研究时段平均地表径流量的比值,  $[X_i + S_i(t)]W(t)$  的取值范围参考相似地区的输出系数经验值<sup>[8, 25~30]</sup>;  $M(t)$  为大气沉降直接进入河流水体的污染物(kg), 根据 TN 沉降量 [ $17.74 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]<sup>[31]</sup> 和流域内水域面积计算得到;  $D(t)$  为点源污染入河量(kg), 该研究区无点源污染;  $t$  为时间, 以周为尺度;  $P$ 、 $E$ 、 $T$  和  $R$  均为气象数据, 分别为降雨量、蒸发量、平均温度和相对湿度;  $\eta$  表示其他所有因素的综合影响,  $\theta_1 \sim \theta_4$  为数值优化求解得到的方程拟合参数, 利用 MATLAB 软件中的遗传算法根据目标函数[同式(3)], 变量替换为负荷量]优化求解得到。

### 1.5 模型验证

利用退水分析筛选得到纯基流退水段的流量数据进行 ERDF 基流分割结果的验证和评价; 根据以上基流验证数据, 从 LOADEST 计算得到的逐日径流负荷量序列中筛选得到相应的“实测”基流负荷量, 用于 RFLSA 基流负荷分割定量结果的验证和评价。鉴于本研究的水文水质监测时间跨度为 1 a, 为了尽可能保证 IECM 模型校验的准确性与可靠性, 本研究将常规水质监测的频率从每月 1 次提高至每周 1 次; 在此基础上将整个研究时段划分为单双周, 其中, 单周用于模型的校准, 双周用于模型的验证, 最大程度上确保校正段和验证段数据季节性变化的相似性和可比性; 其校验所用的地表径流负荷量数据根据总径流负荷量(LOADEST)和基流负荷量(RFLSA)计算得到。选用的评价指标为 NSE、均方根误差-实测值标准差比率(RSR)和决定系数

( $R^2$ ), 具体的计算方法如下:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (L_{i,m} - L_{i,s})^2}{\sum_{i=1}^n (L_{i,m} - L_{\text{avg}})^2} \quad (7)$$

$$\text{RSR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{i,m} - L_{i,s})^2}{\sum_{i=1}^n (L_{i,m} - L_{\text{avg}})^2}} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (L_{i,m} - L_{\text{avg}})(L_{i,s} - L_{\text{avg}}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (L_{i,m} - L_{\text{avg}})^2 \sum_{i=1}^n (L_{i,s} - L_{\text{avg}})^2} \quad (9)$$

式中,  $L_{i,m}$  和  $L_{i,s}$  分别为第  $i$  个污染土地负荷量的实测值和模拟值;  $L_{\text{avg}}$  为污染物负荷量的实测值的平均值;  $n$  为实测值个数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基流及其 TN 负荷分割定量

基于遗传算法优化得到的日尺度的退水常数(图 2) 和最优参数  $\text{BFI}_{\text{max}}$  (0.597), 双参数滤波(ERDF)能够较好地实现上梧河流域基流的分割定量[NSE = 0.92,  $R^2 = 0.92$ , RSR = 0.29, 图 3(a)], 利用 ERDF 分割得到的该流域逐日基流量如图 4(a) 所示。受亚热带季风性气候影响, 上梧河流域的降雨主要集中在 3 月(207.4 mm) 和 5 ~ 8 月(1 000.4 mm), 共占全过程降雨总量(1 519.1 mm) 的 79.51%, 存在明显的季节性变化。降雨是地表径流和基流量变化的一个主要驱动因子<sup>[32]</sup>, 其极不均衡的年内分布造成了本研究区河道径流显著的季节性波动(表 2)。地下水的水位波动通常可以用一个降雨和蒸散发为变量的函数表示<sup>[33]</sup>, 且降雨量与地下水位直接决定系数有时甚至可以高达 0.95 以上<sup>[34]</sup>。由于基流通常由浅层地下水出流所主导<sup>[15]</sup>, 降雨量及降雨模式变化同样导致了该地区基流显著的季节性变化[图 4(a)]。月基流指数(BFI)的最大

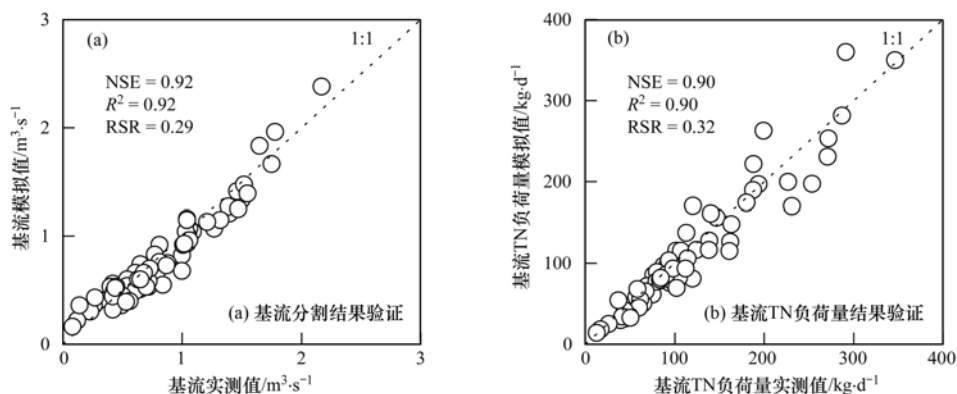


图 3 上梧河流域基流及其 TN 负荷分割定量验证结果

Fig. 3 Validation of the baseflow and its TN loading separation in the Shangwu River watershed

值和最小值分别为 64.38% (9 月) 和 46.67% (12 月), 平均为 56.28% (表 2). 显然, 上梧溪的河道径流在绝大多数时间里是由基流所主导. 这一结论与浙江其他水文气候条件类似的流域, 如对玉泉流域<sup>[35]</sup>、永安流域<sup>[36]</sup>和长乐江流域<sup>[19]</sup>研究的结果基本一致.

以 ERDF 基流分割结果为基础, 在充分考虑气象因子对基流负荷消退的影响之后, 运用 RFLSA 对上梧溪流域逐日基流 TN 负荷进行了分割定量. 如图 3(b) 所示, 基于 RFLSA 得到的基流非点源 TN 负荷量不仅能够较好地反映上梧溪流域日尺度上基流 TN 实测负荷量的变化趋势 ( $R^2 = 0.90$ ), 同时还具有较高的模拟精度 ( $NSE = 0.90$ ,  $RSR = 0.32$ ). 根据 RFLSA 基流负荷分割定量结果[图 4(b)], 上梧溪流域 2020 年 11 月至 2021 年 10 月期间以基流形式输出的 TN 负荷量为 67.41 t, 占全年河道径流 TN 负荷总量(106.66 t)的比例高达 63.20%. 由于基流主要来源于流域的浅层地下水和其他一系列滞后性水源(如慢速壤中流)<sup>[37]</sup>, 其波动幅度相对较小, 且基流中所含污染物浓度变化也较地表径流更加稳定<sup>[38]</sup>; 与地表径流相比, 月基流 TN 负荷的变化相

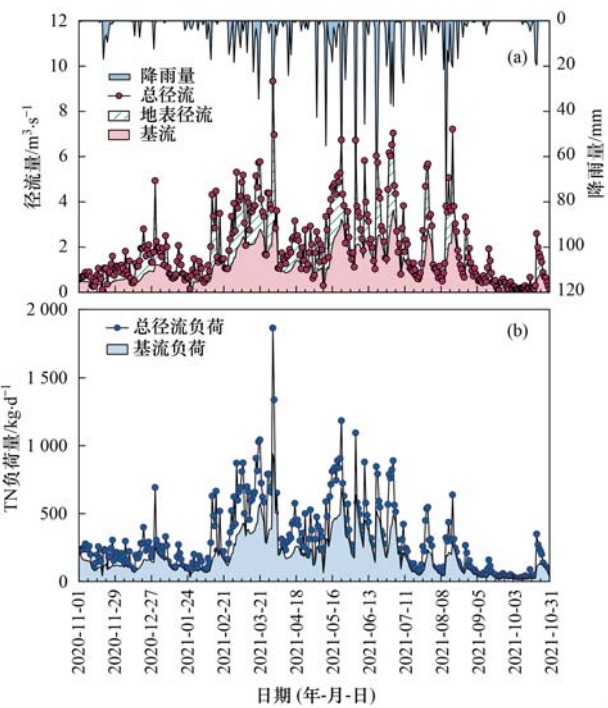


图 4 2020 年 11 月至 2021 年 10 月上梧溪流域逐日降雨量、径流及其 TN 负荷量

Fig. 4 Daily precipitation, runoff, and TN loading in the Shangwu River watershed from Nov. 2020 to Oct. 2021

表 2 上梧溪流域 2020 年 11 月至 2021 年 10 月逐月降雨量、蒸发量、径流量、TN 负荷量、基流指数以及基流负荷指数<sup>1)</sup>

Table 2 Monthly precipitation, evaporation, runoff, TN loads, baseflow index (BFI), and baseflow load index (BLI) of the Shangwu River watershed from Nov. 2020 to Oct. 2021

| 月份 | 降雨量/mm | 蒸发量/mm | 径流量/mm |      | TN 负荷量/t |       | BFI/% | BLI/% |
|----|--------|--------|--------|------|----------|-------|-------|-------|
|    |        |        | SF     | BF   | SL       | BL    |       |       |
| 1  | 16.3   | 41.6   | 45.2   | 28.2 | 4.88     | 3.48  | 62.25 | 71.37 |
| 2  | 68.5   | 38.2   | 62.5   | 32.5 | 7.35     | 3.92  | 51.99 | 53.34 |
| 3  | 207.4  | 39.8   | 158.9  | 84.7 | 21.78    | 12.54 | 53.33 | 57.55 |
| 4  | 84.9   | 65.1   | 78.8   | 47.3 | 11.39    | 7.66  | 60.09 | 67.23 |
| 5  | 285.0  | 77.1   | 117.9  | 65.1 | 16.02    | 10.15 | 55.24 | 63.36 |
| 6  | 341.4  | 72.5   | 126.7  | 72.4 | 14.00    | 10.21 | 57.13 | 72.86 |
| 7  | 159.0  | 93.4   | 102.7  | 61.2 | 8.74     | 5.48  | 59.55 | 62.61 |
| 8  | 215.0  | 96.2   | 83.9   | 51.5 | 5.61     | 3.79  | 61.44 | 67.58 |
| 9  | 12.1   | 122.7  | 22.9   | 14.7 | 1.67     | 1.04  | 64.38 | 62.85 |
| 10 | 50.8   | 86.2   | 21.0   | 11.3 | 2.50     | 1.50  | 53.53 | 59.93 |
| 11 | 49.9   | 56.7   | 28.9   | 14.6 | 5.86     | 3.70  | 50.63 | 63.10 |
| 12 | 28.8   | 42.4   | 57.3   | 26.7 | 6.83     | 3.93  | 46.67 | 57.58 |

1) SF 和 BF 分别为总河道径流和基流, TN 为总氮; SL 和 BL 分别为总径流负荷与基流负荷, BFI 和 BLI 分别为基流指数与基流负荷指数

对稳定(1.04 ~ 12.45 t), 其对本研究区 TN 负荷量的贡献比例(BLI)高达 53.34% ~ 72.86% (表 2). 由此可见, 基流已经成为上梧溪流域非点源 TN 的输出途径.

2.2 输出系数模型验证与评价

如图 5 所示, IECM 可以有效实现该流域 TN 负荷的模拟定量, 校准期与验证期的纳什系数(NSE)分别为 0.82 和 0.77,  $R^2$  分别为 0.87 和 0.84. 然而, 由于 IECM 直接基于降雨等气象因子的数量来

实现周输出系数的气象校正, 未充分考虑降雨模式(如雨强和历时等)变化、土壤条件以及植被覆盖等因素对地表径流及其负荷产生的影响, 致使其在实际的模拟过程中仍可能存在个别模拟结果欠佳的情况. 例如, 2021 年 8 月 8 ~ 14 日总降雨量高达 134.1 mm, 但其地表径流产流系数仅为 8.15%, 远低于全年平均周产流系数(26.10%). 造成这一现象的原因主要有: ①该周前 25 d 长期处于干旱状态(蒸发量为 89.0 mm, 降雨量为 73.2 mm), 造成前期土壤

水分含量较低;②夏季短历时强降雨过程中,仍可能有较大比例的降雨入渗补给土壤<sup>[39]</sup>,从而减少地表径流的产生;③该时段植被生长旺盛,地表植被覆盖较好,增加了径流阻力,使水流速度减缓,从而又促进了泥沙沉积和土壤对地表径流的吸渗作用<sup>[40]</sup>.由于此类降雨-地表径流过程较大的变异性,致使该过程驱动的地表径流 TN 负荷输出很难具有普遍规律性,最终使得基于固定气象因子校正模型

[式(6)]的 IECM 很难对所有此类情形进行较好地模拟.因此,如何更好地实现气象因子对地表径流负荷输出估算的校正是今后基于输出系数模型的非点源污染定量研究的一个重要方向.撇开上述极端情况,对于日常气象变化 IECM 均能对地表径流 TN 负荷量作出较好的模拟估算,可以作为实现本研究区非点源 TN 污染更加科学、合理和准确的分类定量源解析的一种有效手段.

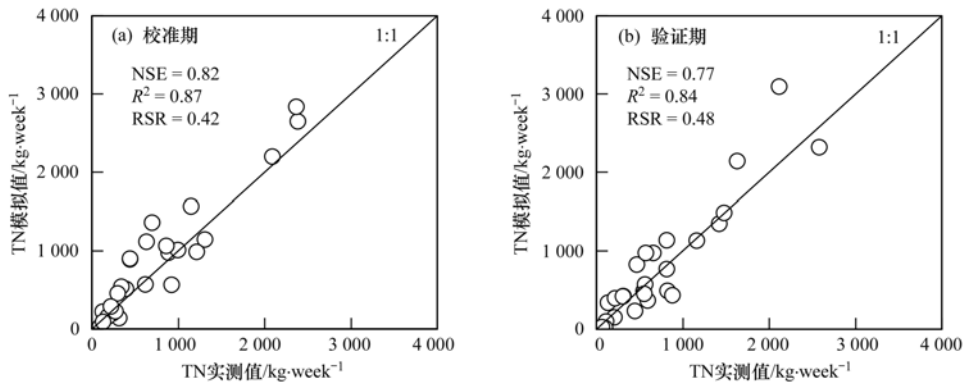


图5 地表径流 TN 负荷量实测值与 IECM 模拟值的比较

Fig. 5 Comparison of measured TN load with IECM simulated TN load in surface flow

2.3 ECM 与 IECM 地表径流 TN 负荷模拟比较

本课题组其他成员的相关实验结果显示(数据未发表),上梧河流域的水田地表径流输出强度为 $11.40\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ,该结果较 IECM 计算得到的水田输出强度 $[10.95\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ 高 4.11%.造成两者偏差的原因在于:营养物质在地表径流向水体迁移过程中会有部分被截留或降解<sup>[13]</sup>,实验测定的是试验田直接的排放量,并非真正的流域出口输出量;而 IECM 则是从末端出口处的负荷量直接进行反推,由此得到的结果已考虑了迁移过程中可能存在的各种损耗.由于缺乏其他地类 TN 负荷输出的实测数据,无法就其他地类的实测值与模拟值的差别作进一步分析.以本研究区的地形地貌、水文、气候和土壤特征等条件相似的 5 个流域(包括:横溪水库、曹娥江流域、长乐江流域、西苕溪流域和丹江口库区)的输出系数为经验值<sup>[8,25~30]</sup>,利用传

统输出系数模型(ECM)计算得到的各地类地表径流 TN 负荷量见表 3.总体而言,基于 ECM 得到的非点源污染 TN 负荷量均大于 IECM 的模拟值.其中不同土地利用类型 $L^{\text{ECM}}$ 与 $L^{\text{IECM}}$ 的偏差顺序依次为:人居地(549.05%)>旱地(80.08%)>草地(64.63%)>水田(63.06%)>林地(49.79%).其中,人居地 TN 负荷量的 ECM 的模拟值较 IECM 模拟总值的相对误差较大,是因为上梧河流域生活污水治理已接近全覆盖,非点源 TN 污染负荷量较低. ECM 的模拟值较 IECM 模拟总值的相对误差为 54.21%,造成模拟结果偏差较大的主要原因在于 IECM 进行了基流分割,将历史的污染责任分离出来,避免了对当前时期污染物排放水平的高估<sup>[35]</sup>;而 ECM 单一地将污染归结于地表径流,不能准确评价不同污染源对水体的污染的贡献,不利于后续的责任认定和减排措施的开展<sup>[29]</sup>.

表3 基于 ECM 和 IECM 的 TN 负荷输出模拟比较<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison of non-point source TN export estimated by ECM and IECM

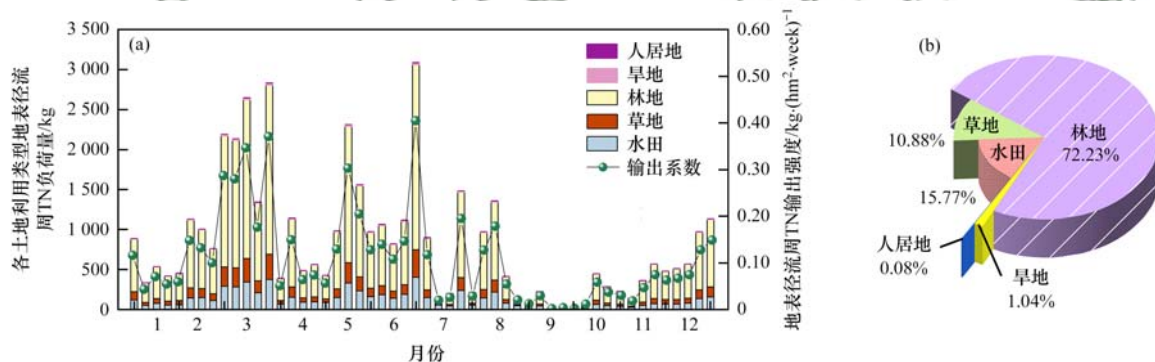
| 土地利用类型 | TN 输出强度/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ |       |          | TN 负荷量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ |                   |        |
|--------|----------------------------------------------------------|-------|----------|--------------------------------------|-------------------|--------|
|        | 经验值范围                                                    | ECM   | IECM 率定值 | $L^{\text{ECM}}$                     | $L^{\text{IECM}}$ | 偏差/%   |
| 水田     | 6.89~26.94                                               | 17.86 | 10.95    | 10.08                                | 6.18              | 63.06  |
| 草地     | 3.20~11.35                                               | 8.93  | 5.42     | 7.03                                 | 4.27              | 64.63  |
| 林地     | 3.78~15.18                                               | 7.79  | 5.20     | 42.42                                | 28.32             | 49.79  |
| 旱地     | 10.32~35.45                                              | 22.22 | 12.34    | 0.73                                 | 0.41              | 80.08  |
| 人居地    | 6.36~27.66                                               | 17.96 | 2.77     | 0.20                                 | 0.03              | 549.05 |

1) ECM 的 TN 输出强度值为选取的相似自然条件下流域输出强度值的平均值; $L^{\text{ECM}}$ 和 $L^{\text{IECM}}$ 分别为基于 ECM 与 IECM 计算得到的 TN 负荷量;偏差= $(L^{\text{ECM}}-L^{\text{IECM}})/L^{\text{IECM}}\times 100\%$

## 2.4 地表径流 TN 负荷定量及分类识别

2020 年 11 月至 2021 年 10 月,上梧溪流域以地表径流形式输出的 TN 负荷量为 39.25 t,占全年河道径流 TN 负荷总量的比例为 36.80%。降雨径流是地表 TN 迁移的主要驱动力<sup>[41]</sup>,其显著的年内变化导致了上梧溪流域非点源 TN 输出显著的季节性变化( $r = 0.96$ ,  $P < 0.01$ )。例如,3 月的地表径流为 74.2 mm,占全年地表径流量总量的 18.71%,地表径流 TN 负荷量高达 9.24 t;9 月的地表径流为 8.2 mm,占全年地表径流量总量的 2.06%,地表径流 TN 负荷量仅仅只有 0.62 t,前者约为后者的 15.07 倍。从全年来看[图 6(a)],上梧溪流域地表径流 TN 月负荷量从 1 月开始逐渐上升,在 3 月达到了最大值,主要是因为千岛湖周边每年春季开始为农作物施肥<sup>[31]</sup>,此时农业用地地表覆盖度较低且降雨量逐渐增加,因而产生了较多的地表径流 TN。4 月随着降雨的减少(84.9 mm),TN 负荷量随之减少(3.73 t)。千岛湖地区 5~6 月水稻种植期氮肥的大量施用<sup>[42]</sup>,加之该时段的大量降雨(共计 626.4 mm,且

以暴雨和强降雨为主),产生的地表 TN 负荷量达 9.67 t,占全年地表径流 TN 负荷的比例高达 24.64%。7~8 月虽仍有较大的降雨量(374.0 mm),但主要以短历时的雷阵雨为主;该时期较高的蒸发量(189.6 mm)不仅容易造成土壤干旱,降低短期强降雨的产流系数<sup>[40]</sup>,而且会加速地表径流的消退,进而导致这两个月产生的地表径流 TN 负荷(5.09 t)占全年总负荷的比例仅为 12.96%。9 月极少的降雨量(12.1 mm)以及较大的蒸发量(112.0 mm)使得河流近乎断流,因此此时的地表径流 TN 负荷量(0.62 t)也为全年最低。10~11 月降雨量逐渐增加(100.7 mm),地表径流 TN 负荷量也随之增加(3.17 t)。随着蒸发量的减少(42.4 mm),地表径流的增加(30.6 mm),12 月的地表径流 TN 负荷量上升至 2.90 t。由此可见,由于上梧溪流域年内地表负荷量的输出极不均衡,因此采用以周为尺度的 IECM 能够更好地从季节性角度对其模拟结果进行分析,有助于针对性地开展责任认定及污染治理。



(a) 地表径流 TN 负荷量, (b) 不同地对地表径流 TN 负荷量的贡献率

图 6 2020 年 11 月至 2021 年 10 月上梧溪流域不同地类周地表径流 TN 负荷量及对地表径流 TN 负荷量的贡献率

Fig. 6 Weekly surface flow TN load and its contribution rate to surface flow TN load of different land types

in the Shangwu River watershed from Nov. 2020 to Oct. 2021

根据 IECM 得到的上梧溪流域 TN 周输出强度如图 6(a) 所示,其变化范围为  $1.75 \times 10^{-3} \sim 4.05 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ 。其中,不同土地利用类型的周 TN 输出强度平均值顺序依次为:旱地 [ $0.24 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ ] > 水田 [ $0.21 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ ] > 草地 [ $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ ] > 林地 [ $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ ] > 人居地 [ $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{week})^{-1}$ ]。以上地类对该流域地表径流 TN 负荷的贡献比例分别为 1.04%、15.77%、10.88%、72.23% 和 0.08% [图 6(b)]。其中旱地的输出强度最高,主要是因为旱地的年种植指数较高<sup>[43]</sup>,耕层扰动频繁,且地表覆盖度普遍较低<sup>[29]</sup>,轮作导致的过量或不当施肥,在地表径流的作用下易使土壤中大量残留硝态氮淋失进入水体<sup>[44]</sup>。由于上梧溪流域

水田的周围一般有田埂包围,大大减少了地表直接径流的形成<sup>[29]</sup>,从而降低了流域水田的地表径流输出强度。草地与林地的输出强度较低,是因为其地表覆盖度较高且植物根系能较好地固定营养物质,因而能够有效缓解降雨径流的冲刷造成的污染物的流失<sup>[45]</sup>。相较于草地,林地的输出强度更小,体现了林地具有更高的水土保持及水源涵养功能<sup>[29]</sup>,造成林地的地表径流非点源污染 TN 负荷量贡献率最高的根本原因在于其较高的面积占比(79.57%)。尽管政府对农村生活垃圾进行了有效的集中处理,但仍可能存在个别村户环保意识不够强、垃圾集中处理不及时和地表径流将部分污水排入周边水体等情况,因此农村居民点仍可能存在一定的 TN 负荷输出。

### 3 结论

(1) 基于传统输出系数模型、双参数递归数字滤波、递归滤波基流负荷分割算法、遗传算法和气象因子统计模型建立的以周为时间步长的输出系数模型 (IECM) 可以较好地实现上梧溪流域非点源 TN 负荷进行定量评价, 其校准期与验证期的 NSE 分别为 0.82 和 0.77,  $R^2$  分别为 0.87 和 0.84, IECM 可以作为今后流域尺度非点源污染定量评价的一种有效方法。

(2) 2020 年 11 月至 2021 年 10 月, 上梧溪流域以地表径流和基流形式输出的 TN 负荷量分别为 39.25 t 和 67.41 t, 分别占总径流 TN 负荷 (106.66 t) 的 36.80% 和 63.20%。基于传统输出系数模型 (ECM) 估算得到的地表径流 TN 负荷量较 IECM 高约 54.21%。因此, 忽略基流对非点源污染的贡献, 将导致对地表径流负荷输出的严重高估, 不利于后续的责任认定和减排措施的开展。

(3) 基于 IECM 计算得到的上梧溪流域水田、草地、林地、旱地和人居地的地表径流非点源污染 TN 输出强度分别为 10.95、5.42、5.20、12.34 和 2.77  $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。就输出强度而言, 该流域地表径流非点源氮污染的治理应重点围绕耕地 (水田和旱地) 的氮肥削减和利用率提高等方面; 从污染负荷构成角度而言, 鉴于以基流形式输出的 TN 负荷占比高达 63.20%, 在严格控制地表径流非点源污染的基础上, 今后应进一步加强对流域地下水非点源污染的防治与管理。

#### 参考文献:

- [1] 郝改瑞, 李家科, 李怀恩, 等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J]. 水力发电学报, 2018, 37(12): 54-64.
- Hao G R, Li J K, Li H E, *et al.* Advances in research of watershed non-point source pollution models and uncertainty analysis methods [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(12): 54-64.
- [2] 刘庄, 晁建颖, 张丽, 等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 432-442.
- Liu Z, Chao J Y, Zhang L, *et al.* Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 432-442.
- [3] 王宝庆, 马奇涛. 非点源污染负荷预测研究现状及发展趋势[J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2010, 42(5): 717-722.
- Wang B Q, Ma Q T. Prediction for non-point source pollution load current status and future progress [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(5): 717-722.
- [4] 娄和震, 吴习锦, 郝芳华, 等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1535-1549.
- Lou H Z, Wu X J, Hao F H, *et al.* Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1535-1549.
- [5] Wang W Z, Chen L, Shen Z Y. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution [J]. Science of the Total Environment, 2020, 747, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141164.
- [6] Ouyang W, Wu Z S, Wang P T, *et al.* Diffuse nutrient export dynamics from accumulated litterfall in forested watersheds with remote sensing data coupled model [J]. Water Research, 2022, 209, doi: 10.1016/j.watres.2021.117948.
- [7] Bhattacharjee J, Marttila H, Launiainen S, *et al.* Combined use of satellite image analysis, land-use statistics, and land-use-specific export coefficients to predict nutrients in drained peatland catchment [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146419.
- [8] 刘洋, 李丽娟, 李九一. 面向区域管理的非点源污染负荷估算——以浙江省嵊州市为例 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 3938-3946.
- Liu Y, Li L J, Li J Y. Estimation of non-point source pollution load for regional management: A case study of Shengzhou, Zhejiang Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10): 3938-3946.
- [9] Wu L, Gao J E, Ma X Y, *et al.* Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22: 10647-10660.
- [10] Qian Y, Dong Z, Yan Y, *et al.* Ecological risk assessment models for simulating impacts of land use and landscape pattern on ecosystem services [J]. Science of the Total Environment, 2022, 833, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155218.
- [11] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析 [J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1839-1846.
- Li M L, Jia M D, Sun T C, *et al.* Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1839-1846.
- [12] Ding X W, Shen Z Y, Hong Q, *et al.* Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3-4): 233-244.
- [13] Chen D J, Lu J, Shen Y N, *et al.* Spatio-temporal variations of nitrogen in an agricultural watershed in eastern China: Catchment export, stream attenuation and discharge [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2989-2995.
- [14] 黄宏. 汤浦水库流域氮污染定量源解析与分区分类控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Huang H. Nitrogen pollution source apportionment and quantitative control planning in Tangpu Reservoir Watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [15] Stoelzle M, Schuetz T, Weiler M, *et al.* Beyond binary baseflow separation: a delayed-flow index for multiple streamflow contributions [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(2): 849-867.
- [16] Zhang J L, Zhang Y Q, Song J X, *et al.* Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 252-263.
- [17] Shao G W, Zhang D R, Guan Y Q, *et al.* Application of different separation methods to investigate the baseflow

- characteristics of a Semi-Arid Sandy Area, Northwestern China [J]. *Water*, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/w12020434.
- [18] He S J, Lu J. Dissolved phosphorus export through baseflow in an intensively cultivated agricultural watershed of eastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(25): 32866-32878.
- [19] He S J, Hao Y, Wu J H, *et al.* Estimation of baseflow nitrate loads by a recursive tracing source algorithm in a rainy agricultural watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2020, **34**(2): 441-454.
- [20] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(2): 507-515.
- [21] Halford K J, Mayer G C. Problems associated with estimating ground water discharge and recharge from stream-discharge records [J]. *Groundwater*, 2000, **38**(3): 331-342.
- [22] Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**(1-2): 168-173.
- [23] 何圣嘉, 吕军. 流域基流氮磷流失的非点源污染定量研究 [J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(6): 20-26.
- He S J, Lü J. Quantitative study on nitrogen and phosphorus loss in baseflow of typical agricultural watershed based on non-point source pollution model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(6): 20-26.
- [24] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **183**(3-4): 323-349.
- [25] 邬建红. 水源地非点源氮污染的定量溯源、分类减排与景观格局调控研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- Wu J H. Quantitative tracing, emission reduction and landscape patterns regulation of non-point source nitrogen pollution in a headwater catchment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [26] 徐立红, 陈成广, 胡保卫, 等. 基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用 [J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(16): 159-166.
- Xu L H, Chen C G, Hu B W, *et al.* Improvement of export coefficient model for N and P based on rainfall intensity and its application [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(16): 159-166.
- [27] 方怒放, 史志华, 李璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟 [J]. *水生态学杂志*, 2011, **32**(4): 7-12.
- Fang N F, Shi Z H, Li L. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in Danjiangkou Reservoir Area [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(4): 7-12.
- [28] 吴一鸣, 李伟, 余昱葳, 等. 浙江省安吉县西苕溪流域非点源污染负荷研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(10): 1976-1985.
- Wu Y M, Li W, Yu Y W, *et al.* Non-point source pollution loadings in Xitiaoqi watershed of Anji County, Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(10): 1976-1985.
- [29] 纪晓亮. 长乐江流域非点源氮污染定量溯源与控制模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Ji X L. Quantitative tracking the sources and control simulation of non-point source nitrogen pollution in Changle River watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [30] 邓欧平, 孙嗣阳, 吕军. 基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1284-1290.
- Deng O P, Sun S Y, Lü J. Nitrogen non-point source pollution identification based on ArcSWAT in Changle river [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1284-1290.
- [31] 朱梦圆, 程新良, 朱可嘉, 等. 千岛湖大气氮磷干湿沉降特征及周年入库负荷 [J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(4): 877-886.
- Zhu M Y, Cheng X L, Zhu K J, *et al.* Atmospheric deposition characteristics and flux of nitrogen and phosphorus in Qiandaohu Reservoir, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(4): 877-886.
- [32] Shaw S B, Riha S J. Examining individual recession events instead of a data cloud: Using a modified interpretation of  $dQ/dt-Q$  streamflow recession in glaciated watersheds to better inform models of low flow [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **434**-**435**: 46-54.
- [33] Rutulis M. Groundwater drought sensitivity of Southern Manitoba [J]. *Canadian Water Resources Journal*, 1989, **14**(1): 18-33.
- [34] Wu J Q, Zhang R D, Yang J Z. Analysis of rainfall-recharge relationships [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **177**(1-2): 143-160.
- [35] 黄宏, 廖忠鹭, 狄迪, 等. 基于 LOADEST 和数字滤波的水源地基流氮素输出定量方法应用实例 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 188-196.
- Huang H, Liao Z L, Di D, *et al.* Case study of the quantification of baseflow nitrogen export using LOADEST and digital filtering in drinking water source region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 188-196.
- [36] Hu M P, Liu Y M, Zhang Y F, *et al.* Coupling stable isotopes and water chemistry to assess the role of hydrological and biogeochemical processes on riverine nitrogen sources [J]. *Water Research*, 2019, **150**: 418-430.
- [37] 王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 等. 密云水库白河流域基流演变特征 [J]. *生态学报*, 2022, **42**(8): 3181-3190.
- Wang C Y, Yan T Z, Zhai L M, *et al.* Change characteristics of baseflow in Bai River Basin of Miyun Reservoir based on comparison of separation methods [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(8): 3181-3190.
- [38] Puustinen M, Tattari S, Koskiahio J, *et al.* Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**(1): 44-55.
- [39] 杨海, 姜月华, 周权平, 等. 太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, **49**(6): 506-514.
- Yang H, Jiang Y H, Zhou Q P, *et al.* Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, **49**(6): 506-514.
- [40] 张禹洋, 聂世豪, 蔡国强, 等. 植被缓冲带对地表径流阻控效果调查及模拟 [J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(2): 36-42.
- Zhang Y Y, Nie S H, Cai G Q, *et al.* Investigation and simulation on the effect of vegetative filter strip on surface runoff [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(2): 36-42.
- [41] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- Wang H, Xu Y L, Zhang Q, *et al.* Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical agricultural small watershed

- in Tuojiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- [42] 韩轶才, 李恒鹏, 刘明亮, 等. 千岛湖流域主要土地利用方式氮收支平衡特征[J]. *环境污染与防治*, 2022, **44**(5): 682-686.
- Han Y C, Li H P, Liu M L, *et al.* Nitrogen budget balance characteristics of main landuse types in Qiandao Lake Basin[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, **44**(5): 682-686.
- [43] Chen M, Chen J, Sun F. Estimating nutrient releases from agriculture in China: An extended substance flow analysis framework and a modeling tool [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(21): 5123-5136.
- [44] 许莹, 孙良杰, 杜立宇, 等. 常规田间管理条件下旱田土壤氮素淋失影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(5): 1246-1254.
- Xu Y, Sun L J, Du L Y, *et al.* Influencing factors on soil nitrogen leaching under traditional managements of dry farmland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(5): 1246-1254.
- [45] 包鑫, 江燕, 胡羽聪. 潮河流域降雨径流事件污染物输出特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3316-3327.
- Bao X, Jiang Y, Hu Y C. Characteristics of pollutant dynamics under rainfall-runoff events in the Chaohe River watershed[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3316-3327.

环境科学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region .....                                         | YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)         |
| Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China .....                                                                                     | XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)       |
| Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance .....                                                                                                       | ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)         |
| Revealing Driving Factors of Urban O <sub>3</sub> Based on Explainable Machine Learning .....                                                                                                   | DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)        |
| Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology .....                                                                                                                | ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)          |
| Analysis of O <sub>3</sub> Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model .....                                                                                                   | WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)     |
| Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM .....                                                                                                                   | ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)     |
| Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province .....                                                           | LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)        |
| Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China .....                                                                                       | DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)                  |
| Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020 .....                                               | YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)            |
| Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021 .....          | XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)        |
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model .....                                                                                      | WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)                      |
| Transmission and Growth Characteristics of Severe PM <sub>2.5</sub> Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei .....                                                                  | JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)              |
| Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers .....        | ZHU Shu-hui (3760)                                                 |
| Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles .....                                                                                                    | YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)       |
| Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer .....                                       | GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)          |
| Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area .....                                                            | YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)        |
| Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an .....                                                                                     | WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)      |
| Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei .....                                                      | XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)     |
| Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area .....                | WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)                    |
| Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City .....                                      | LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)        |
| Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang .....                                                                                           | ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)     |
| Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin .....                                                                            | YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)        |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River .....                                                                      | YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)        |
| Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River .....                                                                                 | ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)         |
| Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction .....                                                                            | WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)            |
| Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas .....                                                | WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)      |
| Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region .....                                                     | YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)         |
| Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches .....                                                                     | ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)                    |
| Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region .....                                        | YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)              |
| Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River .....                                                  | LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)           |
| Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhuai River .....                                                                                                                                 | ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)             |
| Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons .....                                                                    | GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)         |
| Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite .....                                                                                                                       | SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)       |
| Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and Oxidize Organic Micropollutants in Water .....                                                       | LIU Qing-quan, QIAO Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)                     |
| Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid) .....                                               | ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)                                      |
| Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics .....                                                                               | XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)               |
| Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China .....                                                                                   | WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)                                 |
| Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing .....                                                        | JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)             |
| Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province .....                        | FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)             |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi .....                                                     | FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)     |
| Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum .....                                                                                              | HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)   |
| Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review .....                                                            | ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059) |
| Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review .....                                                                                                  | LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)                        |
| Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis .....                                                                                  | ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)     |
| Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....                                                                               | LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)        |
| Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation .....                                                                                                      | WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)          |
| Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta .....                                                          | ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)              |
| Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA .....                                                                            | HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)  |
| Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area .....                                                                                            | ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)      |
| Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province .....                                                                              | ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)   |
| Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i> .....                                                                    | LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)     |
| Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk .....                                                           | ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)       |
| Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period .....                                                                | QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)                  |
| Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong .....                                      | LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)         |
| Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning ..... | YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)         |