

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓峰,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪助(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析

邓欧平, 孙嗣阳, 吕军*

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

摘要: 本研究以我国东南沿海地区的典型农业流域——长乐江流域为对象, 通过实地调查、数据收集和分析, 构建模型所需的各类空间数据库和属性数据库, 将流域内各种非点源污染过程的概化设置和相应管理操作与模型进行有效耦合, 利用近 3 年的流域水质监测资料进行模型参数的率定和验证, 建立了该流域氮污染过程的 ArcSWAT 模型, 模拟估算了流域不同非点源氮的入河量, 并着重分析和识别不同时段土地利用类型的关键性污染源。结果表明, 长乐江流域非点源氮素污染的主要来源是氮肥施用、大气沉降和土壤氮库, 对河流总氮负荷的贡献率分别为 35%、32% 和 25%。不同时段、不同土地利用类型的关键性污染源具有明显差异。从时间分布来看, 土壤氮库和大气沉降所产生的非点源氮素污染的关键时期在雨季, 而氮肥污染则主要发生在作物生长季节。从土地利用分布来看, 园地和人居地非点源氮素的控制性污染源分别是氮肥施用和生活排污; 而水田和旱地的三大污染源(氮肥施用、大气沉降和土壤氮库)入河量相差不大, 需要同时控制。因此, 治理流域非点源氮素污染问题, 应分时、分区、分类制定控制方案。

关键词: 长乐江流域; ArcSWAT; 非点源污染; 氮素; 源识别

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1284-07

Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changle River

DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun

(College of Environmental Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The ArcSWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was adopted for Non-point source (NPS) nitrogen pollution modeling and nitrogen source apportionment for the Changle River watershed, a typical agricultural watershed in Southeast China. Water quality and hydrological parameters were monitored, and the watershed natural conditions (including soil, climate, land use, etc) and pollution sources information were also investigated and collected for SWAT database. The ArcSWAT model was established in the Changle River after the calibrating and validating procedures of the model parameters. Based on the validated SWAT model, the contributions of different nitrogen sources to river TN loading were quantified, and spatial-temporal distributions of NPS nitrogen export to rivers were addressed. The results showed that in the Changle River watershed, Nitrogen fertilizer, nitrogen air deposition and nitrogen soil pool were the prominent pollution sources, which contributed 35%, 32% and 25% to the river TN loading, respectively. There were spatial-temporal variations in the critical sources for NPS TN export to the river. Natural sources, such as soil nitrogen pool and atmospheric nitrogen deposition, should be targeted as the critical sources for river TN pollution during the rainy seasons. Chemical nitrogen fertilizer application should be targeted as the critical sources for river TN pollution during the crop growing season. Chemical nitrogen fertilizer application, soil nitrogen pool and atmospheric nitrogen deposition were the main sources for TN exported from the garden plot, forest and residential land, respectively. However, they were the main sources for TN exported both from the upland and paddy field. These results revealed that NPS pollution controlling rules should focus on the spatio-temporal distribution of NPS pollution sources.

Key words: Changle River watershed; ArcSWAT; Non-point pollution; nitrogen; quantitative traceability

由氮、磷等营养物过量引起的水体富营养化已经成为国内外政府和社会重点关注的问题之一。随着点源污染控制能力的提高, 非点源污染对水质的影响日益显著。从非点源污染的来源看, 通常认为通过非点源污染进入水体的氮来自于当年施用的化肥、畜禽养殖产生的废物和居民生活排污等, 但大量研究表明氮素的陆域迁移存在着显著的时间滞后性, 且滞后时间可以从几个月到几十年^[1~3]。田间

试验结果也表明, 19.2% ~ 35% 的当年施用氮肥会残留在土壤中^[4,5]。同时, 土壤本身也储存着大量的氮素。据统计, 全球不同气候土壤类型 1 m 氮库含

收稿日期: 2012-07-13; 修订日期: 2012-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001120); 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B18)

作者简介: 邓欧平(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源利用与保护, E-mail: auh6@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jlu@zju.edu.cn

氮量为 $1.07 \sim 28.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [6], 我国不同土地利用类型 20 cm 氮库含氮量为 $1.80 \sim 13.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [7,8], 远远高于通过施肥、畜禽和生活排污等方式进入生态系统的氮量 ($P < 0.01$). 另一方面, 近年国内对大气氮素沉降的报告显示, 不同地区的氮素干沉降通量和湿沉降通量分别为 $7.7 \sim 54.6 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $3.0 \sim 15.4 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [9~12]. 这与 $200 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的全国平均施氮量相比, 也是不可忽略的. 赋存于土壤和大气沉降产生的养分同样会通过径流(地表径流、地下径流和壤中流)过程进入河流, 成为水环境恶化的来源之一. 因此, 在河流氮、磷污染的源识别中必须考虑土壤养分库和大气沉降作用. 然而, 目前对于土壤养分库和大气沉降对水体非点源污染的贡献研究却鲜见报道.

本研究针对非点源污染的定量溯源问题, 以东南沿海地区的典型农业流域——长乐江流域为研究对象, 通过 ArcSWAT 模型建模, 估算了流域尺度土壤氮库、大气沉降、氮肥、畜禽养殖和生活排污的总氮入河量, 识别了不同时段和区域的关键性污染源, 以期为流域非点源氮污染控制和治理提供科学的理论支撑.

1 研究区概况

长乐江流域位于浙江省嵊州市东部, 介于东经 $120^\circ 27' 47.3'' \sim 120^\circ 47' 45.3''$, 北纬 $29^\circ 20' 2.4'' \sim 29^\circ 42' 37.5''$ 之间, 流域面积 696.42 km^2 , 所划定的流域范围见图 1.

长乐江属于曹娥江水系, 曹娥江是浙江省八大水系之一, 由南向北注入杭州湾出东海. 长乐江全长 70.5 km , 河道平均比降 3.6% , 砂砾河床, 平均河宽 55 m , 多年平均流量 $18.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 年平均径流量 5.71 亿 m^3 , 年输沙量 10.9 万 t , 年侵蚀模数 $127 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$.

长乐江流域位于亚热带季风气候区, 常年平均气温为 16.4°C , 平均降水量为 1447 mm ; 平均陆面蒸发量为 752 mm . 流域内林地占 48% , 水田占 22% , 园地占 18% , 村庄、旱地和河流等占 12% . 研究区主要土壤类型有红壤、黄壤、潮土和水稻土.

2 材料与方法

2.1 构建 ArcSWAT 数据库

土壤水体评价模型 (soil and water assessment tool, SWAT) 是由美国农业部 (USDA) 农业研究中心 (ARs) 研发的流域尺度模型, 用于模拟水质水量, 预测土地管理措施对具有多种土壤、土地利用和管理

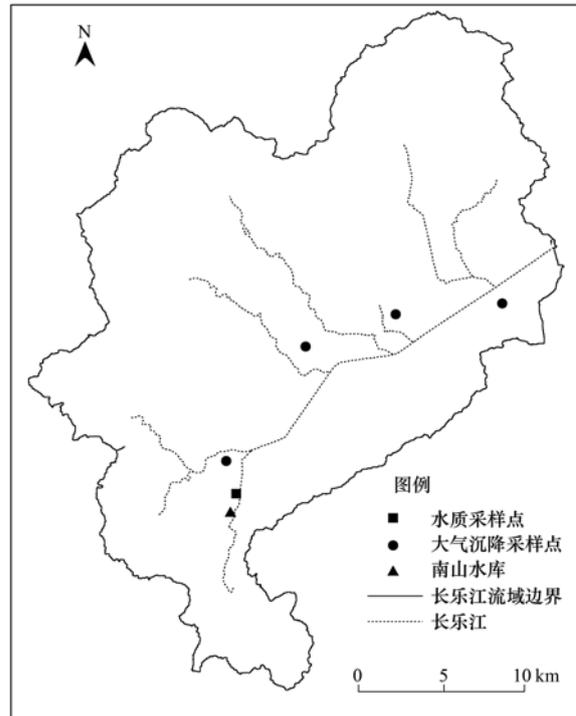


图 1 长乐江流域采样点分布示意

Fig. 1 Sampling point distribution within the Changle River catchment

条件的大流域水文、含沙量和农业化学物质常量的影响 [13~15]. 根据 SWAT 运行平台的不同, 可以分为 AvSWAT 和 ArcSWAT, 本研究采用的是 ArcSWAT2009 版.

ArcSWAT 运行所必需的图件包括 DEM、土地利用/覆被图、土壤图. 比例尺为 $1:5$ 万的 DEM 来自浙江省测绘局, 分辨率 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$. 土地利用/覆被图为 2007 年嵊州市土地利用现状图, 由浙江省嵊州市国土资源局提供, 经 ArcGIS 矢量化得到, 比例尺为 $1:5$ 万. 土壤图根据嵊州市土壤普查办公室 1983 年编制的《 $1:2.5$ 万嵊县土壤分幅图》经 ArcGIS 矢量化得到. 所有图件统一采用 Transverse Mercator 投影校正.

数据资料包括气象数据、土壤数据、水文数据、水质数据和污染源数据. 气象数据由浙江省嵊州市气象站提供, 包括 2007 年 1 月~2009 年 12 月逐日的降雨量、最高温度、最低温度、露点温度、风速、相对湿度、日照时数. 水文数据由浙江省水利厅提供, 包括 2007 年 1 月~2009 年 12 月逐日的流量和含沙量. 土壤数据来自 1985 年的《浙江省嵊县土壤志》, 用于构建土壤信息数据库. 长乐江大气沉降和水质数据为本实验室实测数据. 人口、畜禽养殖和农用地施肥量等数据通过以乡镇为单位的抽

样调查汇总获得.

2.2 空间单元的划分

空间单元[子流域和最小水文单元(HRU)]的划分会影响径流、含沙量和养分的模拟^[16]. 本研究采用沈晔娜^[17]对长乐江流域子流域的划分方法,子流域划分阈值设置为2 290 hm²(约为流域面积的3.3%),将长乐江流域划分为17个子流域(图2). 根据研究区域土地利用、土壤类型和坡度的分布特征,将土地利用面积的最小阈值定为2%,土壤类型面积的最小阈值定为5%,坡度划分为两组,划分阈值为10%. 三图叠加后,长乐江流域被划分为504个HRUs.

2.3 模型的率定和验证

本研究采用相对误差 R_e [式(1)]、决定系数 R^2 [式(2)] 和 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数 E_{ns} [式(3)] 来评价 ArcSWAT 模拟结果,计算方法如下:

$$R_e = \frac{Q_s - Q_m}{Q_m} \times 100\% \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avgm})(Q_s - Q_{avgs}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avgm})^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - Q_{avgs})^2} \quad (2)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avgm})^2} \quad (3)$$

式中, Q_m 为观测值, Q_s 为模拟值, Q_{avgm} 为观测值平均值, Q_{avgs} 为模拟值平均值, n 为观测的次数.

进行参数率定时,先进行径流模拟的参数率定,

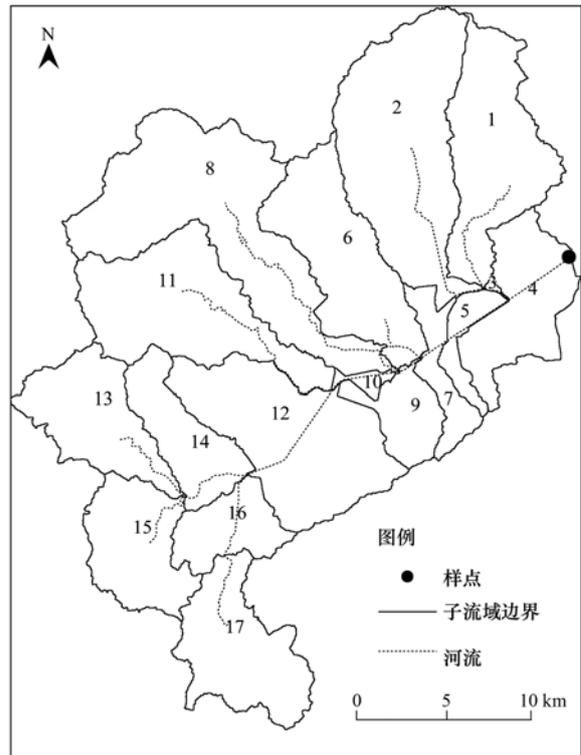


图2 长乐江流域各子流域分布示意

Fig. 2 Sub-catchments distribution within the Changle River catchment

再进行产沙模拟的参数率定,最后进行 TN 的模拟率定. 在参数率定过程中,如果调整很多参数中的一个都可以得到相同结果,选择最能描述过程的那个参数,否则这些参数不能反映系统的真实过程^[14],本研究中 ArcSWAT 模型的主要参数如表 1 所示.

表 1 模型率定各参数取值

Table 1 Values of the parameters for the model

参数	描述	取值范围	实际取值 ¹⁾
CN2	径流曲线值	35 ~ 98	a-8
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0 ~ 1	0.75
GW_REVAP	潜水蒸发系数	0.02 ~ 0.2	0.18
GWQMN	基流产生阈值	0 ~ 5 000	20
ALPHA_BF	基流 α 因子	0 ~ 1	0.03
SPCON	含沙量输移线性系数	0.000 1 ~ 0.01	0.000 5
SPEXP	含沙量输移指数系数	1.0 ~ 1.5	1.1
NPERCO	氮下渗系数	0 ~ 1.0	1
RS4	20℃时河流有机态氮沉积速率系数	0.001 ~ 1.0	0.12
BIO_LEAF	休眠期转化为残渣的生物量	0 ~ 0.3	0
ALAI_MIN	休眠期叶面积指数	0 ~ 10	a + 1

1) a 为 ArcSWAT 模型根据不同土地利用类型、土壤类型和坡度模拟所得的缺省值

本研究中 ArcSWAT 模型的模拟时段是 2007-01-01 ~ 2009-12-31. 2007 年为平衡阶段,2008 年为

率定阶段,2009 年为验证阶段,模拟效果如表 2. 径流、含沙量和 TN 模拟的月 $E_{ns} \geq 0.5$, $R^2 \geq 0.6$,同时

表 2 径流、含沙量和 TN 负荷的率定和验证结果

Table 2 Calibration and validation results of monthly runoff, sediments and TN in Yazhi Bridge

模拟项目评价指标	径流			含沙量			TN		
	$R_e/\%$	R^2	E_{ns}	$R_e/\%$	R^2	E_{ns}	$R_e/\%$	R^2	E_{ns}
率定期(2008 年)	-6.29	0.91	0.9	15.12	0.66	0.63	1.15	0.69	0.62
验证期(2009 年)	-7.56	0.89	0.88	7.33	0.64	0.59	1.06	0.69	0.63

相对误差均在 20% 以内,结果令人满意。

2.4 污染源识别情景设置

为了量化非点源氮素污染的来源,以 2007 ~ 2009 年实测气象资料为气候背景,根据长乐江非点源污染的 5 种来源设置 5 种情景模式,利用 ArcSWAT 模型分别模拟该 5 种情景模式下长乐江流域的水文、水质过程及氮素运移入河情况,情景模式设置如表 3。在模拟过程中,模拟年份的前 2 年为模型预热期,从而使模拟结果更准确。

以表 3 为基础,计算不同污染源的 TN 入河量,计算公式如下:

$$TN_{soil} = TN_{s1} \quad (4)$$

$$TN_{dep} = TN_{s2} - TN_{s1} \quad (5)$$

$$TN_{nur} = TN_{s3} - TN_{s2} \quad (6)$$

$$TN_{liv} = TN_{s4} - TN_{s3} \quad (7)$$

$$TN_{fer} = TN_{s5} - TN_{s4} \quad (8)$$

式中, TN_{soil} 、 TN_{dep} 、 TN_{nur} 、 TN_{liv} 和 TN_{fer} 分别表示土壤氮库、大气沉降、畜禽养殖、农村生活和氮肥施用引起的 TN 入河量($t \cdot \text{模拟时长}^{-1}$), TN_{s1} 、 TN_{s2} 、 TN_{s3} 、 TN_{s4} 和 TN_{s5} 分别表示 5 个情景设置模拟得到的 TN 入河量($t \cdot \text{模拟时长}^{-1}$)。

表 3 长乐江流域不同非点源污染源情景设置

情景设置	模拟氮源
情景 1	土壤氮库
情景 2	土壤氮库和大气沉降
情景 3	土壤氮库、大气沉降和农村生活
情景 4	土壤氮库、大气沉降、农村生活和畜禽养殖
情景 5	土壤氮库、大气沉降、农村生活、畜禽养殖和氮肥施用

3 结果与讨论

3.1 不同污染源的年均入河量和入河系数

根据表 3 的情景设置,以年为步长,模拟不同污染源情景设置下的 TN 入河量,并通过公式(4) ~ (8)计算出长乐江流域各污染源的入河情况(图 3)。可以看出长乐江流域贡献最大的污染源是氮肥施用,引起 $912.82 t \cdot a^{-1}$ TN 入河,占 TN 总入河量的 34.92%;其次是大气沉降和土壤,分别导致 $845.91 t \cdot a^{-1}$ 和 $654.42 t \cdot a^{-1}$ TN 入河;畜禽养殖和农村生活引起的 TN 入河量最小,分别为 $143.28 t \cdot a^{-1}$ 和 $57.54 t \cdot a^{-1}$ 。以上结果表明,长乐江流域的畜禽养殖和农村生活较为分散,不是非点源污染的主要来源;氮肥施用、土壤氮库和大气沉降的总贡献率超过 90%,是长乐江流域非点源污染的主要来源。由此可见,氮肥施用、土壤氮库和大气沉降均是长乐江流域的关键性污染源,在非点源污染控制中不能被忽略。

入河系数是指污染源的入河量占投排放量的比例。根据长乐江流域各污染源强度(表 4),进一步

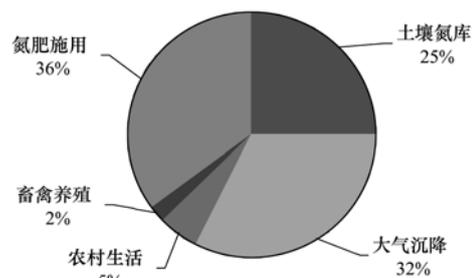


图 3 不同污染源对 TN 的贡献率

Fig. 3 Contribution of different nitrogen sources to the total nitrogen

表 4 长乐江流域各污染源的源强¹⁾

Table 4 Sources strength for each nitrogen source in the Changle watershed

污染源	数据来源	源强/ $kg \cdot hm^{-2}$
土壤氮库	《浙江省嵊县土壤志》(1985)和《1:2.5 万嵊县土壤分幅图》(1983)	16 618.81
大气沉降	实验室实测数据	70.69
农村生活	调查汇总、文献[18]	29.77
畜禽养殖	调查汇总、文献[18]	14.70
氮肥施用	调查汇总	191.00

1) 土壤氮库的源强按土壤表层 10 cm 氮库计算

计算了各污染源的投排放量和入河系数(表5). 长乐江流域各非点源污染源的入河系数排序为:大气沉降(17.81%) > 氮肥施用(15.18%) > 农村生活(12.12%) > 畜禽粪便(3.08%) > 土壤氮库(0.06%).

表5 长乐江流域各污染源的入河系数¹⁾

Table 5 Output coefficients for each nitrogen source in the Changle watershed

污染源	土壤氮库	大气沉降	农村生活	畜禽养殖	氮肥施用
TN 入河量/t	654.42	845.91	143.28	57.54	912.82
TN 投排放量/t	1 121 869.32	4 920.01	1 182.00	1 867.00	6 014.00
入河系数/%	0.06	17.19	12.12	3.08	15.18

1) 土壤氮库的投排放量按土壤表层 10 cm 氮库计算

在氮沉降量较低的地区,几乎所有(>95%)的沉降氮都被土壤吸收,氮沉降具有施肥作用,但是当降雨中的无机氮超过一定的阈值($10 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$)时,大量的硝态氮会随径流进入水体^[19]. 已有研究显示,流域大气沉降的入河系数在 10% ~ 30% 之间^[20,21],长乐江流域 TN 大气沉降的入河系数为 17.19%,在正常范围内,高于长乐江流域其他污染源的入河系数. 长乐江流域氮肥的入河系数略低于大气沉降,为 15.18%. 长乐江流域农用地化肥的平均施用量普遍偏高,在 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,加上施肥方式和施肥时间不合理,化肥的利用效率不高,大量氮肥通过硝态氮淋洗和地表径流进入水体^[22]. 土壤氮库引起的入河量虽然大,但是土壤 10 cm 氮库含量更大($1.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),显著高于其他土地利用类

型的投排放量,所以土壤氮库的入河系数最低,为 0.06%.

3.2 不同时段的关键性污染源识别

根据表3的情景设置,以月为步长,模拟不同污染源情景设置下的 TN 入河量,并通过公式(4)~(8)计算出长乐江流域各污染源的月 TN 入河情况(图4). 土壤氮库、大气沉降、农村生活、畜禽养殖和氮肥施用带来的月 TN 入河量均值分别为 108.89、140.44、22.85、9.04 和 $152.14 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$,最大值均出现在 8 月,分别为 137.86、252.22、29.56、10.80 和 $244.89 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$,除了农村生活和畜禽养殖引起的月 TN 入河量最小值出现在 12 月和 10 月,其他三大污染源均出现在 1 月,分别 2.19、6.57 和 $0.00 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$.

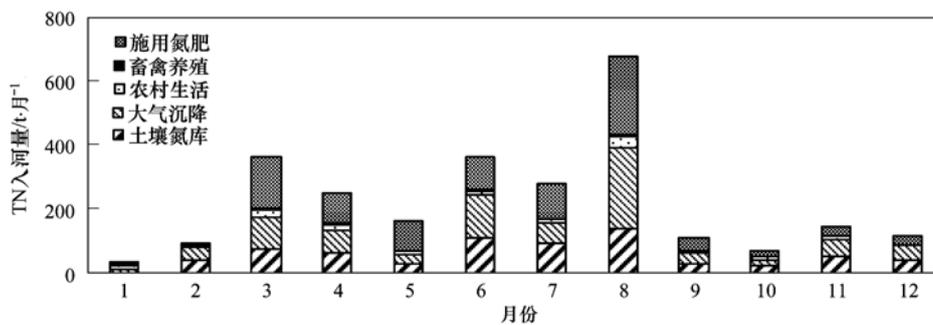


图4 不同非点源污染源的月 TN 入河量

Fig. 4 Monthly TN contributed to reach by different nitrogen source

自然源(土壤氮库和大气沉降)引起的月 TN 入河量与月降雨量呈极显著线性相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.79 和 0.85. 雨季(3~8 月)期间,这两大污染源引起的 TN 入河量分别占全年总入河量的 74% 和 77%,可见雨季是自然源控制的关键时期^[23,24]. 人为源(农村生活、畜禽养殖和施用化肥)引起的月 TN 入河量与月降雨量呈显著线性相关($P < 0.05$),决定系数分别为 0.37、0.54 和 0.64. 人为源带来的非点源污染除了受降雨影响,还受到投排放量和投排放时间的影响. 例如,主要作物生长

期(3~9 月)氮肥带来的 TN 入河量占全年总入河量的 92%,因此,作物生长期是氮肥控制的关键时期.

3.3 不同土地利用类型的关键性污染源识别

根据表3的情景设置,以年为步长,应用公式(4)~(8),计算出不同土地利用下,5 种污染源产生的 TN 入河量和入河贡献率(图5). 旱地的第一污染源是氮肥,引起 TN 入河量为 $130.03 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ [$31.80 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$],占旱地总入河量的 39.89%;其次是大气沉降和土壤氮库,入河量分别

为 $99.62 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $96.34 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别占旱地总入河量的 30.56% 和 29.55%。人居地的第一污染源为农村生活排污, 引起 TN 入河量为 $143.28 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ [$36.07 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$], 占人居地总入河量的 69.41%; 第二、三污染源为大气沉降和土壤氮库, 引起 TN 入河量分别为 $33.79 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $29.36 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 各占人居地总入河量的 8.51% 和 7.39%。林地的两大污染源分别是大气沉降和土壤氮库, 分别引起 $286.68 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ [$8.92 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$] 和 $201.26 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ [$6.26 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$] TN 入河, 各占林地总入河量的 58.75% 和 41.25%。园地的第一污染源是氮肥, 引

起 TN 入河量达 $554.29 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ [$43.50 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$], 占园地 TN 总入河量的 59.81%; 第二污染源是大气沉降, TN 入河量和入河比例分别为 $191.16 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 15.00%; 第三污染源是土壤氮库, TN 入河量和入河比例分别为 $123.72 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 13.91%; 第四污染是畜禽养殖, TN 入河量为 $57.54 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 占旱地总入河量的 4.52%。水田的三大污染源分别是大气沉降、施用氮肥和土壤氮库, 三者的 TN 入河量相差不大, 分别占水田 TN 总入河量的 35.19%、34.26 和 30.55%, 引起 TN 入河量均值为 $222.30 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ [$15.17 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]。

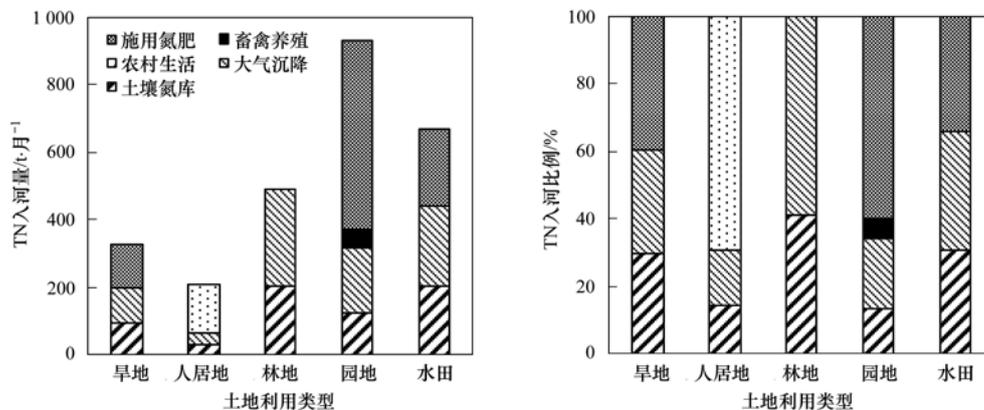


图 5 不同土地利用下各污染源的入河情况

Fig. 5 Total nitrogen from different nitrogen source under different landuse type

总得来说, 氮肥施用和生活排污分别是园地和人居地的非点源污染关键性污染源, 而水田和旱地的三大污染源(氮肥施用、大气沉降和生活污染)入河量相差不大, 需要同时控制。该结果揭示出, 在制定非点源污染控制方案时应分地区, 根据不同地区的土地利用类型组合, 提出针对关键性污染源的控制方案。比如在城镇分布较广的流域, 要以控制生活排污为主; 在以农用地为主的流域, 单纯控制肥料的施用并不能有效控制非点源污染, 还应该采用种植植被缓冲带、修建暴雨滞留池等具有固土、截流作用的生态工程措施。

3.4 非点源污染控制建议

根据长乐江流域非点源氮素污染源的识别和分析, 对长乐江流域的非点源污染控制提出两个方面的建议。一是应根据非点源污染的关键性时空分布特征, 针对不同区域的土地利用类型和农耕制度, 分时、分区、分类制定非点源污染控制方案。比如鹿山街道、甘霖镇和崇仁镇位于长乐江流域的东部和南部, 土地利用方式以水田和园地为主。通过识别水田和园地的主要污染源, 得知水田的主要污染源

是氮肥施用、大气沉降和土壤氮库, 园地的主要污染源是氮肥施用, 所以该区域应重点控制作物生长季氮肥的流失, 可采用“前氮后移”, 深施和水肥综合管理技术。二是由于现实中不可能直接控制土壤氮库和大气沉降氮量, 而单纯削减氮肥, 可能有降低产量的风险, 因此提高农田氮肥利用率、辅之以增强区域氮素自净和持留能力(如建设河滨缓冲带、暴雨滞留池、河道减速栅栏等), 可能是该流域非点源污染控制的现实选择。

4 结论

(1) 长乐江流域的畜禽养殖和农村生活污染并不严重, 非点源污染 TN 的主要来源是氮肥施用、大气沉降和土壤氮库, 对总负荷的贡献率分别为 40%、29% 和 25%。

(2) 不同时段、不同土地利用类型的关键性污染源不同, 从时段分布来看, 控制自然源(土壤氮库和大气沉降)的关键时期是雨季, 而控制人为源(农村生活、畜禽养殖和施用化肥)的关键时期是污染排放期。从土地利用分布来看, 园地和人居地非

点源污染的关键性污染源分别是氮肥施用和生活排污;而水田和旱地的三大污染源(氮肥施用、大气沉降和土壤氮库)入河量相差不大,需要同时控制。

(3)在控制长乐江流域的非点源污染时,应根据非点源污染的关键性时空分布特征,针对不同区域的土地利用类型和农耕制度,分时、分区、分类制定非点源污染控制方案。

参考文献:

- [1] De Wit M, Meinardi C, Wendland F, *et al.* Modelling water fluxes for the analysis of diffuse pollution at the river basin scale [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **14**(10): 1707-1723.
- [2] Reungsang P, Kanwar R S, Jha M, *et al.* Calibration and validation of SWAT for the upper maquoketa river watershed [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2007, **16**(1-2): 35-48.
- [3] Hu X, McIsaac G F, David M B, *et al.* Modeling riverine nitrate export from an East-Central Illinois watershed using SWAT [J]. *Journal of Environment Quality*, 2007, **36**(4): 996-1005.
- [4] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 黑土区水田化肥氮去向的研究[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(11): 1859-1862.
- [5] 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(2): 296-303.
- [6] Post W M, John P, Zinke P L, *et al.* Global patterns of soil nitrogen storage [J]. *Nature*, 1985, **317**(6038): 613-616.
- [7] 胡慧蓉,马焕成,王艳霞,等. 土地利用方式变化对土壤养分与有机碳、氮的影响[J]. *中国水土保持*, 2010, (11): 40-42.
- [8] 林金石,史学正,于东升,等. 基于区域和亚类水平的中国水稻土氮储量空间分异格局研究[J]. *土壤学报*, 2009, **46**(4): 586-593.
- [9] 李玉中,祝廷成,姜世成. 羊草草地生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化[J]. *中国草地*, 2000, (2): 24-27.
- [10] 宋玉芝,秦伯强,杨龙元,等. 大气湿沉降向太湖水生生态系统输送氮的初步估算[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(3): 226-230.
- [11] 张颖,刘学军,张福锁,等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. *生态学报*, 2006, **26**(6): 1633-1639.
- [12] 苏成国,尹斌,朱兆良,等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J]. *土壤*, 2005, **37**(2): 113-120.
- [13] Neitsch S L, Aronld J G, Williams J R. Soil and water assessment tool user's manual version 2009 [M]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2009.
- [14] 丁京涛,姚波,许其功,等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域污染物负荷分布特性分析[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(12): 2153-2158.
- [15] 薛天柱,马灿,魏国孝,等. 甘肃梨园河流域 SWAT 径流模拟与预报[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, **22**(4): 61-65.
- [16] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M, *et al.* Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2006, **42**(2): 513-528.
- [17] 沈晔娜. 流域非点源污染过程动态模拟及其定量控制 [D]. 杭州:浙江大学, 2010. 127-140.
- [18] 陈丁江,吕军,金树权,等. 非点源污染河流的水环境容量估算和分配[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1416-1424.
- [19] Grennfelt P, Hultberg H. Effects of nitrogen deposition on the acidification of terrestrial and aquatic ecosystems [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1986, **30**(3-4): 945-963.
- [20] 晏维金,章申,王嘉慧. 长江流域氮的生物地球化学循环及其对输送无机氮的影响——1968~1997 年的时间变化分析 [J]. *地理学报*, 2001, **56**(5): 505-514.
- [21] Xie Y X, Xiong Z Q, Xing G X, *et al.* Source of nitrogen in wet deposition to a rice agroecosystem at Tai lake region [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(21): 5182-5192.
- [22] 黄东风,王果,李卫华,等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(3): 631-638.
- [23] 李英俊,王克勤,宋维峰,等. 自然降雨条件下农田地表径流氮素流失特征研究[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(4): 19-23.
- [24] 蒋锐,朱波,唐家良,等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(4): 1353-1358.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行