ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第2期
2013年2月15日

目 次

16届亚运会期间广州城区 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及其对霾天气的影响 …… 陶俊,柴发合,高健,曹军骥,刘随心,张仁健(409)
北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析 …… 赵秀娟,蒲维维,孟伟,马志强,董璠,何迪(416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 …… 王倩,陈长虹,王红丽,周敏,楼晟荣,乔利平,黄成,李莉,苏雷燕,牟莹莹,陈宜然,陈明华(424)
杭州市大气超细颗粒数浓度谱季节性特征 …… 谢小芳,孙在,付志民,杨文俊,林建忠(434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 …… 李杏茹,杜熙强,王英锋,王跃思(441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 …… 周变红,张承中,王格慧(448)
华东区域高山背景点 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 背景值及污染特征 …… 苏彬彬,刘心东,陶俊(455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 …… 田秀英,蔡强,刘锐,张永明(462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 …… 张刚,王宁,艾建超,张蕾,杨净,刘子琪(468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 …… 徐林波,高勤峰,董双林,刘佳,傅秀娟(476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 …… 欧杰,王延华,杨浩,胡建芳,陈霞,邹军,谢云(484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 …… 刘玉燕,刘浩峰,张兰(494)
降尘收集方法对降尘效率的影响 …… 张正偲, 董治宝(499)
海河流域水生态功能一级二级分区 …… 孙然好,汲玉河,尚林源,张海萍,陈利顶(509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 …… 时志强,张运林,王明珠,刘笑菡(517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 …… 黄昌春,李云梅,徐良将,杨浩,吕恒,陈霞,王延华(525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响 …… 邱昭政,罗专溪,赵艳玲,颜昌宙(532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 …… 张华兵,刘红玉,李玉凤,安静,薛星宇,侯明行(540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 …… 周亮,徐建刚,孙东琪,倪天华(547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 …… 崔玉洁,刘德富,宋林旭,陈玲,肖尚斌,向坤,张涛(555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析 …… 董雯,李怀恩,李家科(561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 …… 任峰,陆忆夏,刘琴,汤杨杨,王世和,高海鹰,乔红杰,王为进(570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 …… 郑琦,陈超,张晓健,陆品品,刘源源,陈雨乔(576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 …… 李三华,张奇亚 (583)
水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响 …… 姚远,李锋民,李媛媛,单时,李杰,王震宇(589)
TiO_2 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 …… 张轶,黄若男,王晓敏,王齐,丛燕青(596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究 …… 王勇,李伟光,杨力,宿程远(604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 …… 谢练武,方继前,郭亚平(611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究 …… 杨基先,曾红云,周义,邱珊,马放,王蕾,肖大伟(616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)培养研究 …… 嵇雯雯,夏会龙,方治国,刘惠君(622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 …… 陈汉龙,严媛媛,何群彪,戴晓虎,周琪(629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH_4 的影响 …… 姚敦璠,陈天虎,王进,周跃飞,岳正波(635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 …… 青宪,韩静磊,温炎燊(642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 …… 钟茂生,姜林,姚珏君,夏天翔,朱笑盈,韩丹,张丽娜(647)
区域地下水污染风险评价方法研究 …… 杨彦,于云江,王宗庆,李定龙,孙宏伟(653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 …… 王晓红,魏加华,成志能,刘培斌,纪轶群,张干(662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 …… 朱凌宇,潘剑君,张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 …… 骆坤,胡荣桂,张文菊,周宝库,徐明岗,张敬业,夏平平(676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 …… 张晶,于玲玲, 辛术贞, 苏德纯(685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 …… 罗璐,周萍,童成立,石辉,吴金水,黄铁平(692)
外源Cr(Ⅲ)在我国22种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 …… 郑顺安,郑向群,李晓辰,刘书田,姚秀荣(698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 …… 潘峰,王利利,赵浩,尤奇中,刘林(705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 …… 刘芳,王书肖,吴清茹,林海(712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 …… 姚丹,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波,王艳萍,刘国卿(718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 …… 吴唯,史江红,陈庆彩,张晖,刘晓薇(724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 …… 姚丽贤,黄连喜,蒋宗勇,何兆桓,周昌敏,李国良(732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 …… 王点点,宋宁慧,吴文铸,由宗政,何健,石利利(740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 …… 倪雪,刘娟,高彦征,朱雪竹,孙凯(746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 …… 厉阗,钱坤,肖伟,王进军,邓新平(753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 …… 唐阔,马安周,于清,邓雪梅,吕迪,庄国强(760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 …… 刘卫国,梁存珍,杨金生,王桂萍,刘苗苗(767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 …… 刘涛,李冬,曾辉平,畅晓燕,张杰(773)
简青霉(*Penicillium simplicissimum*)对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 …… 沈莹,胡天觉,曾光明,黄丹莲,尹璐,刘杨,吴娟娟,刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 …… 杨萌青,李立明,李川,李广贺(789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 …… 王桂珍,李兆君,张树清,马晓彤,梁永超(795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究 …… 李睿,刘建国,薛玉伟,张媛媛,岳东北,聂永丰(804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 …… 吴昊,张盼月,郭建斌,吴永杰(810)
《环境科学》征订启事(447) 《环境科学》征稿简则(493) 信息(508,588,610,731) 专辑征稿通知(788)

淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制

周亮[1],徐建刚[2*],孙东琪[1],倪天华[3]

(1. 南京大学地理与海洋科学学院,南京 210093; 2. 南京大学建筑与城市规划学院,南京 210093; 3. 南京大学水科学研究中心,南京 210093)

摘要: 农业非点源污染是导致流域水质恶化的重要原因,识别流域内关键源区并加以重点控制是流域非点源污染治理的最有效手段. 以淮河流域为研究对象,采用清单分析法核算了流域 173 个县(市、区)的畜禽养殖、农村生活、农田种植、水产养殖 4 种污染源化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)排放量和排放强度. 利用 SPSS 和 GIS 软件对污染排放强度进行聚类分析、敏感性评价及空间解析,解析出流域非点源污染的敏感地区、重点污染源及其空间分布特征,并依据污染源贡献大小对流域进行分类控制. 结果表明,2009 年淮河流域农业非点源 COD、TN、TP 排放量分别为 206.74×10^4 t、66.49×10^4 t、8.74×10^4 t; 排放强度分别为 7.69、2.47、0.32 t·hm^{-2}; COD、TN、TP 排放比重分别为 73%、24%、3%. 识别出 COD、TN、TP 的主要贡献污染源为畜禽养殖和农村生活; 解析出淮河上游沙河、颍河、北汝河、贾鲁河以及清潩河等子流域为整个流域非点源污染的敏感区和优先控制区,畜禽养殖为流域优先控制区中的重点污染源. 畜禽污染型和综合污染型分别是流域污染贡献率最高和控制难度大的污染类型.

关键词:污染; 非点源; 清单分析; 空间解析; 淮河

中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)02-0547-08

Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin

ZHOU Liang[1], XU Jian-gang[2], SUN Dong-qi[1], NI Tian-hua[3]

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Center for Hydrosciences Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is of importance in river deterioration. Thus identifying and concentrated controlling the key source-areas are the most effective approaches for non-point source pollution control. This study adopts inventory method to analysis four kinds of pollution sources and their emissions intensity of the chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in 173 counties (cities, districts) in Huaihe River Basin. The four pollution sources include livestock breeding, rural life, farmland cultivation, aquacultures. The paper mainly addresses identification of non-point polluted sensitivity areas, key pollution sources and its spatial distribution characteristics through cluster, sensitivity evaluation and spatial analysis. A geographic information system (GIS) and SPSS were used to carry out this study. The results show that: the COD, TN and TP emissions of agricultural non-point sources were 206.74×10^4 t, 66.49×10^4 t, 8.74×10^4 t separately in Huaihe River Basin in 2009; the emission intensity were 7.69, 2.47, 0.32 t·hm^{-2}; the proportions of COD, TN, TP emissions were 73%, 24%, 3%. The paper achieves that: the major pollution source of COD, TN and TP was livestock breeding and rural life; the sensitivity areas and priority pollution control areas among the river basin of non-point source pollution are some sub-basins of the upper branches in Huaihe River, such as Shahe River, Yinghe River, Beiru River, Jialu River and Qingyi River; livestock breeding is the key pollution source in the priority pollution control areas. Finally, the paper concludes that pollution type of rural life has the highest pollution contribution rate, while comprehensive pollution is one type which is hard to control.

Key words: pollution; non-point source; inventory analysis; spatial heterogeneity; Huaihe River Basin

随着工业和城镇生活点源污染逐步得到控制,非点源尤其是农业源已成为导致区域水环境恶化的主要原因[1,2]. 北美学者[3~8]研究认为,美国约有 60% 河流污染与非点源污染有关,农业非点源污染约占总污染量 57% ~75%,且主要是过量化肥、杀虫剂的投入以及严重水土流失引起. 中国第一次全国污染源普查公报显示[9],农业污染源(不含农村生活源)的 TN、TP、COD 分别占到总污染量的 57.19%、67.27%、43.71%,已成为中国水环境污染物主要来源. 国内学者[10~12]通过对松花江、辽河、太湖、巢湖等流域研究发现,来自农业非点源

收稿日期: 2012-04-06; **修订日期**: 2012-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871261); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07210-010-001)

作者简介: 周亮(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为环境地理学、城市与区域规划,E-mail: zhougeo@126.com

* 通讯联系人,E-mail: xjg129@sina.com

的 TN、TP、COD 分别占总污染量的 60% ~70%、50% ~60%、30% ~40%. 普查数据和实证研究数据均表明农业非点源污染已经超过点源污染[13],成为威胁区域水质的主因. 农业非点源污染发生具有广域性、复杂性、间歇性、滞后性及分散性等特点[14],导致其控制难度大、成本高、成效不明显,治理难以抓住重点[15~17],因此,准确估算流域污染负荷量,解析流域内污染关键源区和重点污染源是非点源污染控制治理的关键.

在非点源污染负荷核算和识别方面,国内外学者已通过模型模拟估算法[18]、输出系数法[19]、水质水量相关法[20],并结合 3S(GIS、RS、GPS)等技术[21,22]进行了大量的探索和研究. 上述方法中,模型法能较为准确地估算污染负荷,但估算模型需要大量详细的实测数据支持以及长期的野外试验进行验证,对于复杂的大尺度流域,可操作性较差. 其他方法则多集中在小流域和小区域范围内(10 000 km^2 以下)[23],对较小流域污染防治针对性和指导性较强. 通过走访调研国内水环境职能部门发现,目前,国内流域水污染防治多以水功能区划、控制单元以及多级子流域分区为基本单元,而流域水污染监督管理则主要依赖基层县(市、区)环境保护局和水利局. 当前这种污染防治与监管相分离模式,在很大程度上不能有效地将基层行政机构与流域防治区划相结合,防治单元与行政监管难以协同. 面对此矛盾,本研究以淮河流域 173 个县(市、区)为考察单元,利用清单分析法对畜禽养殖、农村生活、农田种植、水产养殖污染源的 COD、TN、TP 排放量和排放强度进行核算,在县域行政尺度上解析识别流域优先控制区、重点污染源和污染源的空间分布特征,并依据污染源贡献大小对其进行分类及控制. 尝试建立一种以县级行政区为单元,地跨多省市流域的农业非点源污染控制治理新模式,以解决农业非点源污染治理过程中政策执行力不强、控制治理实施困难的局面. 该方法结合 GIS 空间分析功能,能快速核算出不同区域各类污染负荷量,准确地识别优先控制区和重点污染物,方便决策者准确直观地掌握农业非点源污染的空间分布特征,从而达到非点源污染负荷估算、空间解析识别、防治监管均以县级行政区为基本单元的新模式,便于在我国现行的水环境管理体制下应用和推广.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

淮河流域地处我国东部,介于长江和黄河两大流域之间,流域以废黄河为界分成淮河及沂沭泗河两大水系. 流域西部、西南部及东北部为山地丘陵区,其余为广阔的平原,平原面积约占流域面积的 2/3. 流域多年平均降水量约 875 mm,降水量空间差异较大,降雨量由流域下游向上游呈弧形递减,多年平均总水资源量约 794 亿 m^3,人均水资源量仅为全国的 1/5. 流域主要包括江苏、安徽、山东、河南共 4 省 35 个地市,总面积 26.96 万 km^2. 2010 年流域 GDP 总量 3.45 万亿元,三产结构比例为 16.4∶51.5∶32.1. 流域人口 1.71 亿,人口密度 630 人·km^{-2},平均城镇化率 35.9%. 淮河流域是我国三大商品粮生产基地之一,2010 年粮食产量8 010万 t,占全国粮食总产量的 14.6%.《全国新增1 000亿斤粮食生产能力规划(2009 ~2020)》中明确指出淮河流域是我国小麦、玉米和稻谷的优势主产区,是粮食增产规划的核心区之一,承担约 75 亿 kg 新增粮食产能建设任务. 粮食增产需求和增产压力进一步加剧流域农业水资源开发利用及农业非点源污染,将给流域生态环境和污染防治带来新的挑战.

1.2 数据来源

本研究数据资料主要来源于淮河流域 35 个地级市 2010 年统计年鉴、2010 年安徽省、江苏省、山东省农村统计年鉴、2010 河南调查年鉴及流域多时段水质水量统计公报. 研究收集处理的数据资料主要分为 3 大类:①农业基本数据:流域各县(市、区)面积、耕地面积、GDP(国内生产总值)、第一产业产值、年末人口数、农业劳动力数、城市化率等;②污染负荷核算基础数据:各县(市、区)粮食、经济作物、蔬果产量和种植面积,化肥、农药、地膜施用量,猪、牛、羊、家禽出栏和存栏数量,淡水水产养殖面积、产量等;③流域基础地理资料:流域行政区地图、流域地形图、近年水质分布图、多年降水量分布图、水资源分布图、水系图等. 研究以流域县(市、区)为基本单元,将流域内具有多区的地级市合并为一个市区;湖北省淮河流域面积狭小,为方便统计对比和政策制定将其省略.

1.3 污染物排放核算方法

本研究中农业非点源污染是指农业生产和农村居民生活过程中产生的 3 类(COD、TN、TP)主要污染物. 污染物来源主要包括畜禽养殖污染、农村生活污染、农田种植污染以及淡水水产养殖污染 4 种类型. 污染物排放量计算公式如下[24,25]:

$$E = \sum_i \mathrm{EU}_i \rho_i (1 - \eta_i) C_i(\mathrm{EU}_i, S)$$
$$= \sum_i \mathrm{PE}_i \rho_i (1 - \eta_i) C_i(\mathrm{EU}_i, S)$$
$$\mathrm{EI} = E/\mathrm{AL}$$

式中，E 为农业非点源污染物的排放量；EU_i 为第 i 种污染源指标统计数量；ρ_i 为单元第 i 种污染物的产污强度系数，η_i 为表征相关资源利用效率的系数；PE_i 为农业面源污染的产生量，即不考虑资源回收利用因素时，农业生产和农村居民生活产生的污染量；C_i 为第 i 种污染源污染物 j 的流失系数，其由污染源和空间具体特征（S）决定，表征区域地理特征、降水、水文、复种指数及管理措施等复杂因素对农业非点源污染的综合影响. EI 为农业非点源污染物的单位排放强度，表征农业非点源污染在单位土地上的负荷及农业非点源污染对水环境的影响程度；AL 为区域的土地面积. 因受不同区域污染源和空间特征（S）等因素影响，污染物排放系数 η_i 和流失系数 C_i 在不同区域差异较大，因此，本文在前人大量研究的基础上，通过文献调研和试验结果借鉴，分别对太湖流域、海河流域、江苏省、洪泽湖等流域内及相近地区研究进行比较分析，同时参考第一次全国污染源普查农业污染源产排污系数手册最终确定产排污系数，并对部分系数进行了补充修正，由于文章篇幅限制，本研究只列出畜禽养殖的排放系数与流失系数（表 1），其他系数值均来源于文献[26～30].

表 1　淮河流域畜禽污染物排放系数及流失系数

Table 1　Livestock pollutant emission and loss coefficient in Huaihe River Basin

系数	污染源类型	项目	COD	TN	TP
排污系数	猪/kg·头$^{-1}$	粪	24.834	3.426	1.525
		尿	7.091	2.362	0.306
	牛/kg·头$^{-1}$	粪	261.250	32.978	8.555
		尿	25.281 5	25.737	1.110
	羊/kg·头$^{-1}$	粪	4.401	4.230	0.765
	家禽/kg·头$^{-1}$	粪	0.998	0.323	0.118
流失系数	猪/%	粪	6.084	5.684	5.534
		尿	50.000	50.000	50.000
	牛/%	粪	5.096	4.624	4.412
		尿	45.834	45.834	45.834
	羊/%	粪	5.500	5.300	5.200
	家禽/%	粪	6.932	6.845	6.807

1.4　数据分析

本研究主要采用 ARCGIS 10.0 空间分析软件和 SPSS 18.0 数据处理分析软件，以淮河流域行政区地图为基础，对流域边界、水系、水质等要素进行地图配准、矢量化及图层叠加. 以 TN、TP、COD 这 3 种污染物 4 类污染源的地区排放强度为变量，对淮河流域 173 个研究单元进行聚类分析、敏感性评价和空间解析，解析评价出淮河流域非点源污染的敏感区、优先控制区、优先控制区中的重点污染源以及污染源的空间分布特征.

2　淮河流域非点源污染空间解析

2.1　淮河农业非点源污染物排放量

2009 年淮河流域农业非点源污染 COD、TN 和 TP 的排放量分别为 206.74、66.49、8.74 万 t（表 2）. 通过流域内 35 个地级市污染排放量比较可知（图 1），排放量高值区主要分布在上游的驻马店、周口、商丘和临沂等地区；低值区主要分布在淮河干流的淮北、淮南、合肥等地区；淄博、洛阳和南阳等地市，只有部分县区位于淮河流域内，因此排放量也较少.

分析比较污染物来源发现（表 2），流域 COD 排放中，比例最大的是畜禽养殖，贡献率为 34.54%，其次是农村生活和农田种植贡献率分别为 32.41% 和 29.57%，水产养殖最少，贡献不足 4%. 流域 TN 排放中，畜禽养殖和种植两者贡献达到 73.38%，而农村生活与水产养殖贡献较少，分别为 18.77% 和 7.85%. TP 排放与 COD 比例相似，畜禽养殖贡献率最高，达到 43.12%，农村生活与农田种植各占 25% 左右，水产养殖仅为 6.36%.

污染物排放量分析表明，COD 与 TP 排放对流域地表水体环境压力中：畜禽养殖 > 农村生活 > 农田种植 > 水产养殖；TN 对水环境压力中：畜禽养殖 > 农田种植 > 农村生活 > 水产养殖. 流域畜禽养殖、农村生活、农田种植、水产养殖 4 类污染源总污染物排放量分别为 102.02 万 t、81.70 万 t、

表 2 2009 年淮河流域非点源污染物排放量与比例关系

Table 2 Ratio between non-point source pollutant emissions and proportion in the Huaihe River Basin in 2009

污染源	排放量/万 t·a^{-1}			排放比例/%		
	COD	TN	TP	COD	TN	TP
畜禽养殖	71.42	26.84	3.77	34.54	40.37	43.12
农村生活	67.01	12.48	2.21	32.41	18.77	25.32
农田种植	61.14	21.95	2.20	29.57	33.01	25.20
水产养殖	7.19	5.22	0.56	3.48	7.85	6.36
合计	206.74	66.49	8.74	100	100	100

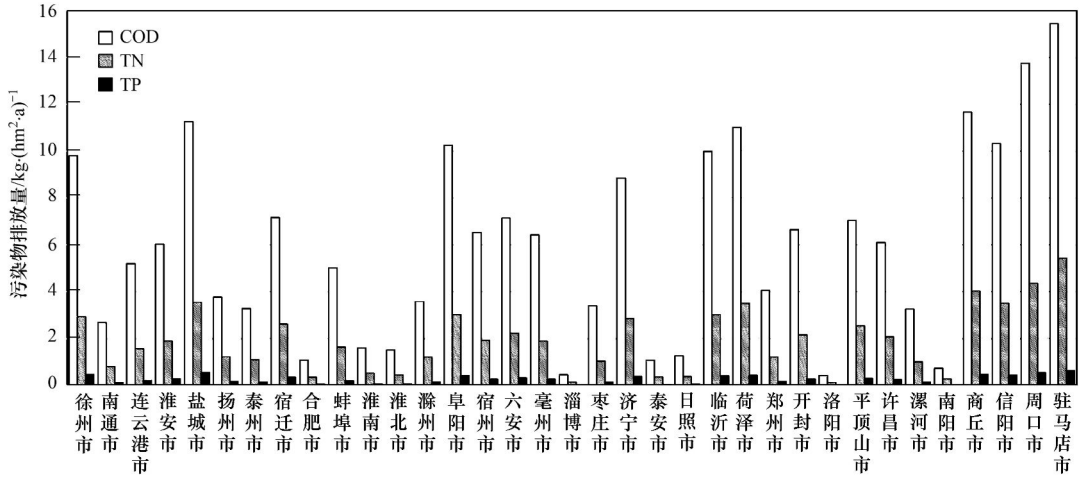

图 1 淮河流域各市农业非点源污染物排放量

Fig. 1 Agricultural non-point source pollutant emissions in the cities of the Huaihe River Basin

85.29 万 t、12.96 万 t,贡献比例分别为 36%、29%、30%、5%,因此,流域治理的重点应是畜禽养殖与农田种植.

总结可知,流域污染物质中 COD 是占绝对量的首要贡献因子,贡献率超过 73%;4 类污染源中畜禽养殖是首要控制来源,贡献率 36.18%. 污染排放总量分析,淮河上游贾鲁河、沙颍河、涡河等流域排放较大,淮河干流及干流以南地区排放相对较轻,这与流域 2009 年和 2010 年实测水质情况相符,充分说明农业非点源是造成该地区污染的主要原因.

2.2 流域非点源污染物排放强度

2009 年淮河流域 4 类污染源 COD、TN、TP 排放强度分别为 7.69、2.47、0.32 t·hm^{-2}. 流域内各市辖区面积相对小于县域、生产生活密度较高、市郊畜禽养殖、蔬果业发达,因此污物排放强度普遍高于周围地县. 污染物排放强度最高的扬州市区,COD、TN、TP 达到 45.84、11.97、1.88 t·hm^{-2},最低的六安金寨县仅分别为 1.58、0.48、0.06 t·hm^{-2},两者相差 29.05 倍、25.15 倍、29.37 倍. 说明流域内不同区域排放强度有较为明显差异,流域排放强度空间存在一定的规律性,农业非点源治理是可以通过技术方法识别出关键源区,从而进行重点防治和源头管理,达到高效、准确的水环境治理效果.

4 类污染物质排放强度也存在区域差别,以畜禽养殖 COD 排放强度为例,排放强度最高的河南新蔡县为 16.36 t·hm^{-2},最低的淮北市区仅 1.58 t·hm^{-2},相差愈 10 倍;同样,农村生活、农田种植和水产养殖排放强度都存在着差异,尤其是水产养殖,因受地理环境、降水、流域特征、水域面积及生物特性差异影响,不同地区间污染排放强度差异巨大,以 COD 为例,排放强度最高的江苏泗洪县为 2.2 t·hm^{-2},最低的安徽省灵璧县仅为 0.08 t·hm^{-2}.

总之,流域内不同地区污染源和污染物分布都存在一定区域空间分异现象. 因此,分析流域非点源污染源的区域分布特征,解析出农业非点源污染的优先控制区域和重点污染源是水环境污染有效治理和控制的决策基础和前提.

2.3 流域污染物空间解析

2.3.1 农业非点源污染敏感性评价

农业非点源污染敏感性评价是评价研究区域水环境对农业生产和农村社会经济活动反映的敏感程

度. 非点源污染敏感性能反映地表水体发生富营养化等环境问题的可能性大小,较好地解析出易发生地表水环境污染的区域,明确环境污染敏感性的区域分异规律,进而识别出优先控制区,有效地指导区域非点源防治措施, 控制农业非点源污染对区域水环境的影响[31,32]. 排放强度表征单位面积水环境污染程度,因此,本研究依据淮河流域 173 个县(市、区)4 类污染源的 COD、TN、TP 污染物排放强度,通过 Natural Breaks 方法将流域非点源污染进行敏感性评价分类,将非点源污染敏感性分为 4 级,即高度敏感区、中度敏感区、轻度敏感区和不敏感区. 然后,再将不同敏感级别图示在流域空间,有效直观解析出非点源污染的优先控制区域、重点污染源和其空间分布规律特征(表 3).

表 3　不同敏感区农业状况与污染负荷关系

Table 3　Relationship between agricultural conditions and the pollution load among different sensitive regions

类型	面积 /万·km^2	农村人口密度 /人·hm^{-2}	农业产值 /万元·hm^{-2}	污染物排量/万 t·a^{-1}			污染物排放强度/t·hm^{-2}		
				COD	TN	TP	COD	TN	TP
高度敏感区	4. 49	710	281. 26	55. 43	18. 31	2. 28	12. 39	4. 09	0. 51
中度敏感区	6. 29	525	209. 46	58. 27	18. 56	2. 46	9. 27	2. 95	0. 39
轻度敏感区	7. 26	429	191. 05	52. 10	16. 56	2. 25	7. 19	2. 29	0. 31
不敏感区	8. 92	331	116. 40	40. 94	13. 06	1. 75	4. 61	1. 47	0. 19

2. 3. 2　淮河流域优先控制区域解析

受土壤、地形、气候、水文、土地利用和管理方式等众多复杂因素的影响,流域内不同景观单元单位面积的污染负荷差异十分显著. 由畜禽养殖污染物排放强度的敏感性分析可知[图 2(a)],流域敏感度东西两边高,中间低,且西部高于东部. 高度敏感区主要分布在流域西北的沙河、颍河、北汝河的流域地区,敏感性以驻马店市确山县、泌阳县等地区为原点,向流域下游依次降低. 流域中部的安徽、山东绝大部分地区为不敏感区域. 江苏中北部阜宁县、新沂市以及安徽汝河县等地区为中度敏感区和轻度敏感区. 由农村生活污染物排放强度的敏感性分析可知[图 2(b)],高度敏感区分布在淮河最大支流沙颍河流域,敏感性以周口市鹿邑县、阜阳市太和县等县区为中心向四周递减; 安徽亳州、河南商丘及江苏徐州等区域为中度敏感; 淮河干流及南部大部分区域为污染不敏感区域.

从农田种植污染物排放强度的敏感性分析可知[图 2(c)],流域西北地区敏感度最高,依次向东南递减,高度敏感分布在流域西北的沙河、汝河及洪河地区,主要包括河南郏县、驻马店市区及新蔡县等周边县市; 淮河干流、安徽东北部、山东、江苏等绝大部分地区为轻度敏感区,淮河干流以南的信阳市、六安市、合肥市、滁州市及山东淄博市、临沂市等县市为不敏感区. 从水产养殖污染物排放强度的敏感性分析可知[图 2(d)],流域敏感度东南高西北低,敏感度随流域降水量线依次从东南向西北递减,与其他 3 类污染源分布正好相反[图 2(f)]. 污染高度敏感区和中度敏感区高度集中,主要分布在流域东南的洪泽湖、高邮湖及微山湖等湖区,包括泗洪县、泗阳县、扬州宝应县及济宁鱼台县等湖库面积广阔,淡水养殖发达的县市.

从流域非点源污染物(流域污染物之和)敏感性分析可知[图 2(e)],流域敏感度整体西北高于东南,淮河干流北部高于干流南部. 高度敏感区主要分布在淮河上游的河南境内,驻马店新蔡县、许昌市鄢陵县和周口市沈丘县等,该区域为流域非点源污染的优先控制区. 中度敏感区分布在阜阳市、亳州市、菏泽市及洛阳、郑州等地区,主要在高度敏感区的外围,围绕高度敏感区分布,淮河干流、江苏省等绝大部分则为轻度敏感区; 淮河干流以南地区、山东临沂市、日照市等区域为不敏感区. 流域的敏感区分布以河南确山县和泌阳县为中心向外辐射形成一个由里向外的敏感逐级降低的圈层结构.

2. 4　淮河流域污染物分类及控制

依据 4 种污染源在流域空间内的污染排放强度贡献大小,对流域 173 县(市、区)排放强度数据进行聚类分析,将污染源聚类分成 5 种污染类型(表 4),即:畜禽污染型、生活污染型、农田污染型、水产污染型以及综合污染型. 5 种污染类型空间分布见图 3. 在不同区域依据不同的污染类型进行有针对性的污染源控制.

(1)畜禽污染型　是流域污染物来源中畜禽养殖产生的污染量最大、贡献比例最高的类型. 集中分布在河南省中南部、淮河上游的颍河、北汝河、沙河、贾鲁河及清潩河流域,面积为54 907 km^2,畜禽养殖污染平均贡献率为 49. 65%,包括确山县、泌阳县及宝丰县等 44 个县市区. 该区域农作物产量高,农村劳动力和饲料供给充足,畜禽养殖密度大. 农户畜禽散养比例较高,畜禽粪便随意堆弃,污染物

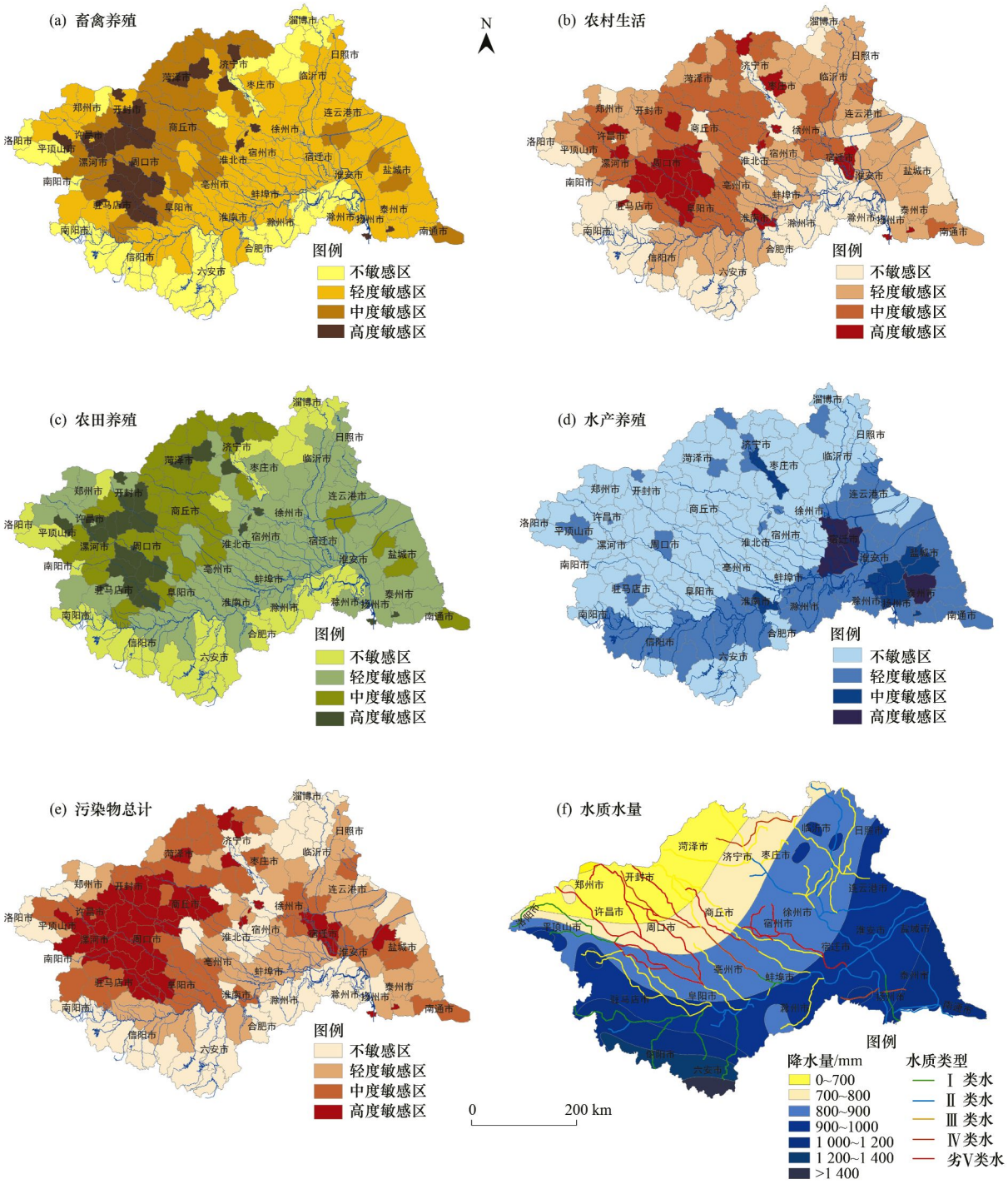

图 2 淮河流域农业非点源污染敏感性评

Fig. 2 Agricultural non-point source pollution sensitivity evaluation in the Huaihe River Basin

不经过处理排放是导致水环境压力的主要原因. 因此,畜禽集中规模化养殖,养殖场舍的合理选址和布局,畜禽粪便的资源化、产业化循环利用等方法是有效控制畜禽污染型地区水环境的污染关键.

(2)生活污染型 是流域污染物来源中农村居民生活排放的污染物在污染贡献中比重最高的类型. 主要分布在沂沭泗水系上游沂河、沭河、浚河、汶河以及安徽西部史河、濉河等子流域,面积约 50 448 km^2,生活污染平均贡献率超过 40%,主要包括砀山县、沂源县等 34 个县市区. 该污染类型多数县区地处沂蒙山、大别山等经济发展落后的山区,城市化率较低,农业人口比例高,人地矛盾突出,农村生活污水、垃圾及人粪尿处理设施发展相对滞后,传统的旱厕、坑厕使用比例高,污染物只经简单

处理或不经处理直接排放是水环境恶化的主要原因,因此,普及沼气工程,改造农户厕所,建设乡村给排水系统,建立简易垃圾集中处理点,提高农村居民的环保意识是生活污染型区域污染的控制重点.

(3)农田种植型　即流域各类污染物贡献中农药、化肥、地膜、秸秆以及水土流失等产生的污染贡献高于其他污染类型占主导地位.集中分布在流域中部的涡河中下游、沱河、浍河以及山东西南的梁济运河、泗河等流域,面积约44 410 km^2,污染平均贡献率为40.85%,包括射阳县、鱼台县及濉溪县等28个县市区.该类型县区多地处国家粮食主产区,粮食增产压力大,农业高度集约化生产中化肥、农药、地膜过量施用和农田秸秆的遗弃是污染物流失的主要因素.因此,调整改善农业种植的布局,优化种植比例,普及测土配方施肥技术,推广高效、低毒、低残留无公害农药,提高地膜和秸秆的回收利用率,开展农业清洁生产技术等是从源头控制农业系统对水环境污染的有效途径.

(4)水产污染型　即水产养殖污染贡献在流域内各类污染源贡献中具有典型性.集中分布在淮河干流的洪泽湖、成于湖、高邮湖和沂沭泗河流域的南阳湖、独山湖、微山湖、骆马湖等湖区水库地区.面积约35 445 km^2,污染平均贡献率为18.86%.主要包括泗洪县、金湖县和洪泽县等18个湖区水库周围的县市.饲料、鱼饵、药剂大量投放是该区域水环境污染最重要因素之一,因此减少饵料的投放,禁止清塘水的直接排放以及降低养殖密度提高养殖质量是水产污染控制的基础.

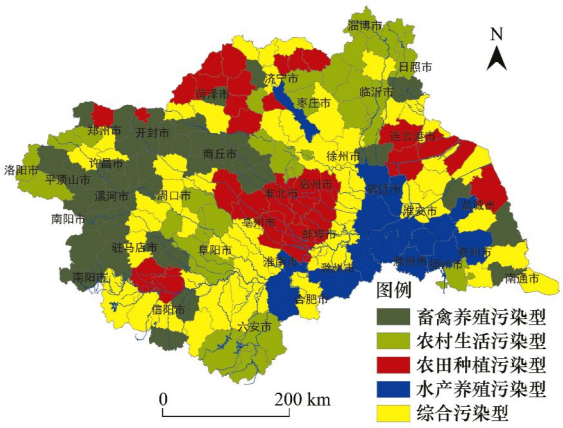

图3　淮河流域5种污染类型空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of five kinds of pollution in the Huaihe River Basin

表4　淮河流域5种污染类划分基本情况

Table 4　Basic information about the five kinds of pollution of the Huaihe River Basin

污染类型	面积 /km^2	占流域面积比率 /%	平均贡献率 /%	最大贡献率 /%	最大贡献强度 /$t\cdot hm^{-2}$	县(市、区)个数	典型代表区域
畜禽污染型	54 907	20.42	49.65	56.45	15.52	44	确山县、泌阳县
生活污染型	50 448	18.77	40.03	47.86	27.03	34	砀山县、沂源县
种植污染型	44 410	16.52	40.85	60.34	17.68	28	济宁市区、鱼台县
水产污染型	35 445	13.19	18.86	29.65	4.05	18	泗洪县、泗阳县
综合污染型[1)]	83 616	31.10	—	—	—	49	涟水县、姜堰市

1)共有10种不同的污染组合,如畜禽-农田型、畜禽-生活-水产型、复合污染型等

(5)综合污染型　即非点源污染来源复杂多样、监测识别和防治困难,区域畜禽污染、生活污染、化肥污染和水产污染均占有一定的比例的污染类型.其空间分布较为分散,主要分布在安徽阜阳、宿州,河南信阳、周口,江苏徐州等养殖业、水产业、种植发展比较均衡的地区,面积83 616.87 km^2,占整个流域面积30.1%.污染来源的复杂,污染源难以识别,没有重点,是流域非点源治理中最为困难的类型.因此,分析识别污染源的来源结构,制定综合的防控策略是综合污染型控制的关键.

3　结论

(1)淮河流域2009年农业非点源污染COD、TN和TP的排放量分别为206.74、66.49、8.74万t;排放强度分别为7.69、2.47、0.32 $t\cdot hm^{-2}$;其中COD是流域主要污染物,贡献率超过73%.流域污染空间特征解析得到流域非点源污染存在明显空间分异和敏感性分级,流域水环境敏感度西北部高于东南部,淮河干流北部高于干流南部,高度敏感区集中在淮河上游的沙河、颍河、北汝河等子流域,并以河南漯河市为中心呈环状分布.污染物空间解析得到河南省平顶山市、许昌市、漯河市、周口市、驻马店等地区为非点源污染的优先控制区,识别出畜禽养殖是流域优先控制区的重点污染源.流域污染源分类控制表明5种污染类型中综合污染型和生活污染型污染来源空间分布较为分散,重点污染源难以识别,尤其是综合污染型,污染源复杂且不确定,源识别和治理难度都较大.

(2)本研究中污染负荷核算结果及解析结果基本能反映淮河流域农业非点源污染实际情况. 污染物的空间分布特征与流域 2009 年实测水质空间分布基本一致,在一定程度上印证了研究的准确性. 然而,非点源污染发生与地区自然地理、社会经济、居民行为等因素密切相关,随着流域快速城市化、工业化和农业化推进,流域生态环境、土地利用、生产方式、农业管理方式、畜禽养殖等模式都在发生快速变化,因此,进一步研究中需重点考虑流域环境的动态变化性,研究数据连续性及多元性; 另外,污染物核算中应增加氨氮(NH_4^+-N)、生化需氧量(BOD)、高锰酸盐指数及重金属等污染物质,从而建立整个流域全面、准确、动态的污染核算系统,指导流域非点源污染防治工作.

参考文献:

[1] Lacroix A, Beaudoin N, Makowski D. Agricultural water nonpoint pollution control under uncertainty and climate variability[J]. Ecological Economics, 2005, **53**(1): 115-127.

[2] Edwards A C, Withers P J A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK[J]. Journal of Hydrology, 2008, **350**(3-4): 144-153.

[3] USEPA. National Water Quality Inventory: Report to Congress Executive Summary[R]. Washington DC: USEPA, 1995.

[4] Dowd B M, Press D, Huertos M L. Agricultural nonpoint source water pollution policy: the case of California's Central Coast[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, **128**(3): 151-161.

[5] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al*. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998, **8**(3): 559-568.

[6] Hunt J W, Anderson B S, Phillips B M, *et al*. Patterns of aquatic toxicity in an agriculturally dominated coastal watershed in California[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999, **75**(1-2): 75-91.

[7] Schulz R. Field studies on exposure, effects, and risk mitigation of aquatic nonpoint-source insecticide pollution[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(2): 419-448.

[8] Cho J, Park S, Im S. Evaluation of Agricultural Nonpoint Source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation[J]. Agricultural Water Management, 2008, **95**(4): 400-408.

[9] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010-02-06.

[10] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 375-383.

[11] 段华平, 孙勤芳, 王梁, 等. 常熟市农业和农村污染的优先控制区域识别[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 911-917.

[12] 刘瑞民, 何孟常, 王秀娟. 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 663-667.

[13] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1159-1168.

[14] Munafò M, Cecchi G, Baiocco F, *et al*. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2005, **77**(2): 93-98.

[15] 周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3368-3373.

[16] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, **19**(5): 87-91.

[17] 王少丽, 王兴奎, 许迪. 农业非点源污染预测模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, **23**(5): 265-270.

[18] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 农业非点源污染田间模型及其应用[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3509-3513.

[19] Thornton J A, Rast W, Holland M M, *et al*. Assessment and control of nonpoint source pollution of aquatic ecosystems: a practical approach[M]. Pearl River, New York: The Parthenon Publishing Group, 1999: 296-299.

[20] 李怀恩, 蔡明. 非点源营养负荷-泥沙关系的建立及其应用[J]. 地理科学, 2003, **23**(4): 460-463.

[21] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 苏州河非点源污染负荷研究[J]. 环境科学研究, 2002, **15**(6): 20-23.

[22] 黄金良, 洪华生, 张珞平. 基于 GIS 和模型的流域非点源污染控制区划[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(4): 119-124.

[23] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷估算方法研究的意义、难点和关键技术[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 362-365.

[24] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(6): 751-755.

[25] 赖斯芸. 非点源污染调查评估方法及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

[26] 王浩. 湖泊流域水环境污染治理的创新思路与关键对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[27] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.

[28] 叶飞, 卞新民, 胡大伟, 等. 江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策[J]. 水资源保护, 2006, **22**(6): 86-88.

[29] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 汉阳非点源污染控制区划[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 31-36.

[30] 王夏晖, 陆军, 张庆忠, 等. 基于流域尺度的农业非点源污染物空间排放特征与总量控制研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2554-2561.

[31] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法[J]. 水土保持学报, 2001, **15**(2): 56-59.

[32] 孙才志, 杨磊, 胡冬玲. 基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价[J]. 生态学报, 2011, **31**(24): 7428-7440.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 2

Feb. 15, 2013

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in $PM_{2.5}$ and Its Impact on Hazy Weather During 16th Asian Games in Guangzhou ····· TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, *et al.* (409)

$PM_{2.5}$ Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area ····· ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, *et al.* (416)

Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China ····· WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, *et al.* (424)

Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou ····· XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, *et al.* (434)

Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters *n*-Alkanes in Baoding City ····· LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, *et al.* (441)

Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival ····· ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)

Characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Concentrations in Mountain Background Region of East China ····· SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)

Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose ····· TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, *et al.* (462)

Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control ····· ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, *et al.* (468)

Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique ····· XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, *et al.* (476)

Eco-environmental Evolution Inferred from *n*-Alkanes and $\delta^{13}C$ Records in the Sediments of Shijiu Lake ····· OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, *et al.* (484)

Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City ····· LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)

Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency ····· ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)

Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China ····· SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, *et al.* (509)

Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River ····· SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, *et al.* (517)

Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll-a Retrieval Model in Inland Water Body ····· HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, *et al.* (525)

Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate ····· QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, *et al.* (532)

Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland ····· ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, *et al.* (540)

Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin ····· ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, *et al.* (547)

Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River ····· CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, *et al.* (555)

Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area ····· DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)

Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage ····· REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, *et al.* (570)

Inactivation of *Mycobacteria mucogenicum* in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis ····· ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, *et al.* (576)

Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium ····· LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)

Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on *Skeletonema costatum* Antioxidant Enzyme Activities ····· YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, *et al.* (589)

Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO_2 Photocatalytic Combined Technologies ····· ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, *et al.* (596)

Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater ····· WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, *et al.* (604)

Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by *Streptomyces* sp. FX645 ····· XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)

Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline ····· YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, *et al.* (616)

Study on the *Chlorella pyrenoidosa* Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization ····· JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, *et al.* (622)

Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content ····· CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, *et al.* (629)

Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter ····· YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, *et al.* (635)

Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products ····· QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)

Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model ····· ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, *et al.* (647)

Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution ····· YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, *et al.* (653)

Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application ····· WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, *et al.* (662)

Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain ····· ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)

Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization ····· LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, *et al.* (676)

Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return ····· ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, *et al.* (685)

Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations ····· LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, *et al.* (692)

Aging Process of Cr(Ⅲ) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis ····· ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-chen, *et al.* (698)

Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise ····· PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, *et al.* (705)

Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant ····· LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, *et al.* (712)

Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin ····· YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, *et al.* (718)

Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments ····· WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, *et al.* (724)

Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds ····· YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, *et al.* (732)

Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field ····· WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, *et al.* (740)

Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity ····· NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, *et al.* (746)

Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic *Myroides odoratimimus* Strain Y6 ····· LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, *et al.* (753)

Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection ····· TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, *et al.* (760)

Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method ····· LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, *et al.* (767)

Assessment of the Effect of Influent NH_4^+-N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process ····· LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, *et al.* (773)

Biodegradation of Lignocellulose by *Penicillium simplicissimum* and Characters of Lignocellulolytic Enzymes ····· SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, *et al.* (781)

Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil ····· YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, *et al.* (789)

Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters ····· WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, *et al.* (795)

Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill ····· LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, *et al.* (804)

Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms ····· WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, *et al.* (810)

《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 2 月 15 日　34 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 2　Feb. 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