

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

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

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析

王雪蕾¹, 蔡明勇², 钟部卿³, 姚延娟¹, 殷守敬¹, 吴迪¹

(1. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 应用遥感技术研究了辽河流域非点源污染发生特征. 将环境卫星遥感数据耦合非点源(non-point Source, NPS)污染负荷估算模型, 探索基于遥感像元尺度的非点源污染估算方法, 目的是分析2010年辽河流域非点源污染特征, 从而明确非点源污染的重点防治区和防治措施, 为辽河流域水环境污染防治提供技术支持. 结果表明, 2010年辽河流域总氮排放量为10.3万t, 总磷排放量为0.68万t, 化学需氧量排放量为13.1万t, 氨氮排放量为1.8万t; 目前, 对于辽河流域主要的非点源污染类型为农业面源; 2010年辽河流域面源污染对水质污染的贡献率表现为总氮67.4%, 总磷76.4%, 化学需氧量39.4%和氨氮21.9%; 空间分布上辽河流域的南部是污染最严重的地区, 其次是东北部. 本研究结合遥感技术发展了以遥感像元为基本模拟单位的非点源污染负荷估算方法, 明确了2010年辽河流域的非点源污染产生量和空间分布特征, 为辽河流域污染防治工作提供了理论依据.

关键词: 环境卫星; 非点源污染; 遥感; 估算; 辽河流域

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3788-09

Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin

WANG Xue-lei¹, CAI Ming-yong², ZHONG Bu-qing³, YAO Yan-juan¹, YIN Shou-jing¹, WU Di¹

(1. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China; 2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The spatial characteristic of non-point source pollution in the Liaohe River was studied. Coupling the remote sensing data and non-point source(NPS) models, a method of assessing NPS pollution by pixel unit was developed, aiming to analyse the NPS pollution characteristic of Liaohe River basin in 2010, in turn to identify the main polluted areas and prevention measures. The work will provide technical supports for pollution prevention in Liaohe River basin. The results showed that in 2010, the total discharge of total nitrogen (TN) was 1.03×10^5 t, the total phosphorus (TP) was 6.8×10^3 t, the chemical oxygen demand (COD) was 1.31×10^5 t and the ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was 1.8×10^4 t. The main pollution source of NPS was from agriculture. The contributions of NPS pollution to water quality were 67.4%, 76.4%, 39.4% and 21.9% for TN, TP, COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, respectively. The south of Liaohe River basin was the most serious polluted area, followed by the northeast areas. In this research, a method was build to estimate the NPS loads based on remote sensing pixel and the spatial characteristic of non-point source pollution in Liaohe River in 2010 was analysed, which will provide support for pollution prevention in Liaohe River.

Key words: HJ satellite; non-point source pollution; remote sensing; estimation; Liaohe River Basin

非点源污染的空间特征是进行流域陆源污染控制的重要依据^[1,2]. 非点源污染的空间特征包括污染负荷量化和污染物空间分布等, 其中我国的非点源污染定量研究始于20世纪80年代, 主要是农业非点源污染和城市径流污染的宏观性探讨与污染负荷定量模型的研究^[3~5]. 至今, 定量模型的研究仍然是我国进行非点源污染空间特征研究的重要瓶颈之一. 自80年代以来, 遥感(remote sensing, RS)与地理信息系统(geographic information system, GIS)技术在非点源研究领域的应用^[6~8], 相当程度上解决了非点源污染空间特征问题, 尤其针对机制模型和分散参数模型数据项繁多、难以收集与管理的问题,

大大推进了非点源污染空间特征研究的进程. 陈庆男等^[9]应用苏联“礼炮”号航天遥感图像信息源开展了天津市于桥水库流域1:10万比例尺土壤侵蚀的现状调查与制图工作, 并初步探讨了遥感调查土壤侵蚀与氮磷元素流失的关系. 施为光^[10]应用美国通用土壤流失方程(USLE), 采用彩红外航空遥感判读的方法来率定方程中的重要参数, 计算了邛海流域非点源污染中总氮总磷的输入负荷; 胡远

收稿日期: 2013-01-31; 修订日期: 2013-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901280, 41271349)

作者简介: 王雪蕾(1978~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为流域生态水文过程模拟, E-mail: wxlbnu@gmail.com

安等^[11]应用 Landsat TM 遥感数据对江西省袁水上游小流域进行逐级分类提取非点源信息,从而提高了非点源污染负荷估算的精度. 万兴等^[12]利用遥感技术,结合现场试验构建经验模型,估算了乐安河流域沿岸的非点源污染负荷;王雪蕾等^[13]应用 Landsat TM 卫星数据对官厅水库库滨带的释氮效应进行模拟分析,实现了流域尺度氮非点源污染物的迁移转化模拟.

遥感技术拓展了非点源污染研究的时空领域,弥补了地面监测技术的不足^[14],是地面监测技术的重要补充. 可以说遥感技术的发展对流域非点源污染空间特征的研究起到了阶段性的推进作用,为宏观流域非点源污染研究提供了一种新思路. 本研究以辽河流域为案例区,将环境卫星遥感数据与非点源污染负荷估算模型耦合,探索基于遥感像元尺度的非点源污染空间特征分析方法,对辽河流域非点源污染的空间特征进行遥感解析,以便明确非点源污染的重点防治区和

防治措施,以期为辽河流域水环境污染防治提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽河流域是我国七大流域之一,位于我国东北地区南部,涉及内蒙古自治区东南部、吉林省西部和辽宁省的大部分地区,包括 15 个地市、56 个县(市、旗),流域面积 22.9 万 km². 研究区位置见图 1. 辽河流域地势相对较低,农业发达,城镇化在全国居领先水平,水资源利用率高,地表水利用程度达 81.2%,促进了流域社会经济的发展. 但随着经济的迅速发展,污水排放问题突出,出现了水质恶化问题. 近几年,国家加大对辽河流域水质的综合治理,并取得成效. 当前辽河流域的点源污染已经得到相对有效的控制,需要进一步明确流域非点源污染空间特征,以便从宏观角度开展辽河流域水环境综合防治工作.

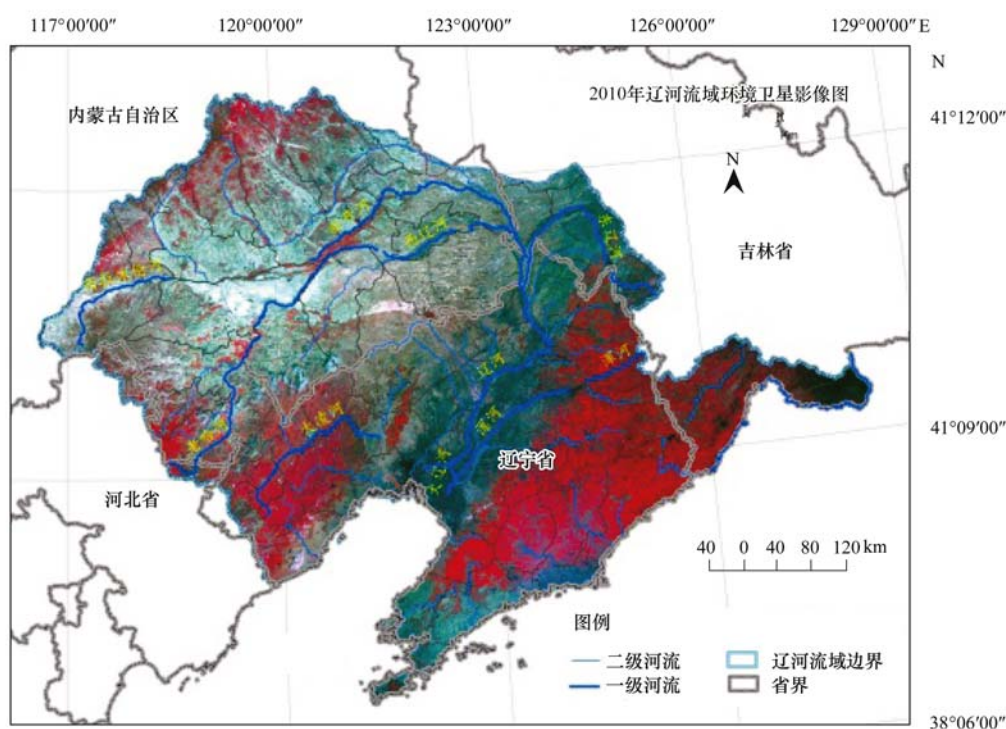


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Map of study areas

1.2 模型算法

以二元结构模型^[15]为基础模型,结合遥感技术,构建以遥感像元为最小模拟单元的非点源污染空间特征分析模型. 模型可以概括为 5 个污染类型和 2 个元素形态^[16],即:农田径流型、城市径流型、

农村生活型、畜禽养殖型和水土流失型;溶解态污染物和吸附态污染物. 具体污染指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)和化学需氧量(COD). 溶解态污染物即表明非点源污染物具有水溶性,能随地表径流发生迁移,整个过程受水循环控

制,污染源主要来自农田生产过程中肥料(TN 和 TP),农村生活和城市生活中非集中处理和排放的生活垃圾和生活污水污染、散养和集中养殖过程未集中处理的粪便污染(TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD)等;吸附态污染物即通过附着在土壤颗粒体而实现迁移运动的污染元素(TN 和 TP),其过程同水土流

失密切相关.模型主要包括4大模块,分别为农田氮磷平衡核算模块、植被覆盖度反演模块、溶解态污染负荷估算模块和吸附态污染负荷估算模块^[17].模块基于 ENVI/IDL 软件平台开发.辽河流域非点源污染空间特征遥感解析算法流程见图2.模型框架和基本原理见表1,模型主要参变量见表2.

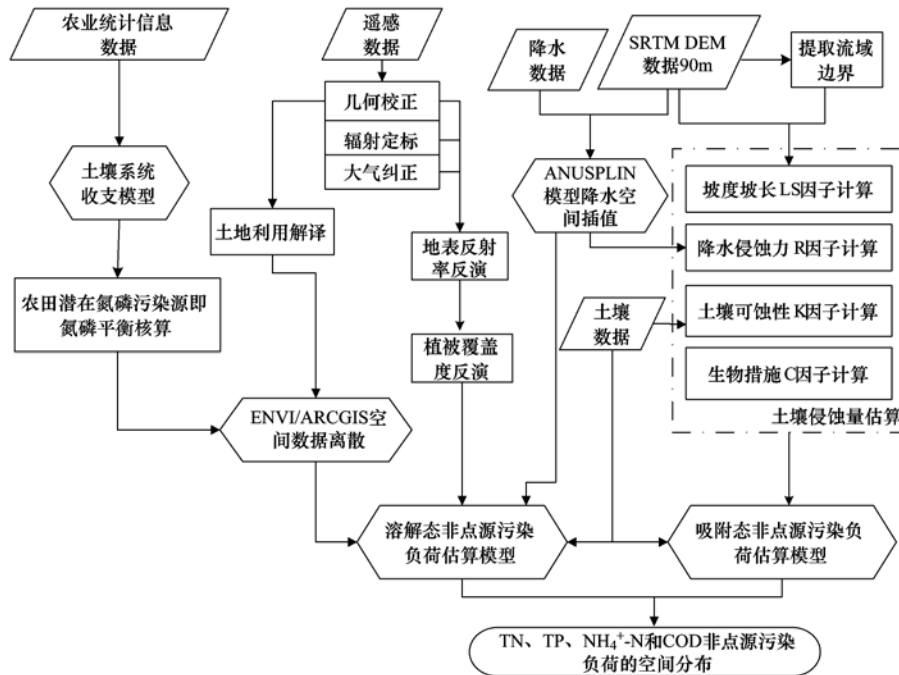


图2 辽河流域非点源污染空间特征算法流程示意

Fig. 2 Flow chart of research on spatial characteristic of NPS pollution in Liaohe River Basin

1.3 数据库构建

用于非点源污染空间特征分析的数据库包括遥感数据、气象数据、农业经济数据和土壤类型、数字高程等国家基础地理信息数据,具体数据类型、来源和在本研究中的处理方法及理论基础详见表3.模型输入的数据为格式矢量数据,具体包括遥感数据解译后得到的辽河流域土地利用数据、定量遥感反演得到的植被覆盖度数据和空间插值后的年降水数据等,见图3.

2 结果与讨论

2.1 农田氮磷平衡空间特征

氮磷平衡计算的参数取值参照文献[19],县级核算结果氮平衡量为 $-29.16 \sim 333.97 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,磷平衡量为 $-4.36 \sim 249.15 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$;结合空间分析技术,将计算结果与土地利用数据进行空间离散,得到2010年辽河流域氮磷平衡的空间分布图,如图4所示.从中可以看出,辽河流域大部分地区表现为农田氮磷营养元素盈余状态,且流域

中部地区明显高于东西部地区,仅在南部局地出现氮磷亏缺状态.辽河流域氮磷营养平衡整体情况表明辽河流域当前的农田管理方式不利于流域非点源污染的防治.

2.2 辽河流域土壤侵蚀空间特征

吸附态氮磷量化是建立在土壤侵蚀估算的基础上,因此土壤侵蚀情况间接反映了水土流失类型的非点源污染空间分布特征.研究中利用USLE方程对辽河流域土壤侵蚀强度进行估算,再结合氮磷吸附系数和输沙系数最终确定伴随土壤颗粒进入水体的吸附态氮磷负荷.本次模拟结果表明,2010年辽河流域平均土壤侵蚀强度为 $1\,253.9 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,年侵蚀量为 $3.9 \times 10^8 \text{ t}$.土壤侵蚀强度的空间分布结果见图5.从中可以看出,辽河流域土壤侵蚀平均属于轻度水平,但是东部地区土壤侵蚀强度较大,多数属于极强度级别.统计结果表明,辽河流域2010年土壤侵蚀微度级别占流域的47.0%,轻度级别为28.5%,中度为6.2%,强度为3.9%,极强度为5.1%,剧烈级别为9.2%.

表 1 非点源污染空间特征分析模型结构和构建原理

Table 1 Construction and theories of the model

子模块	模型描述	主方程	文献
农田氮磷平衡估算	依据物质守恒原理定量描述农田年均氮磷营养负荷的盈亏,作为模型中的农田污染源强	$NUT_{bal} = (Input - Output) / Area$ $Input = Filz + Mnr + Irg + Seed + Dpzt + Bnf$ $Output = Hvst + Gas + Water$	[18,19]
植被覆盖度反演	基于多光谱遥感数据定量描述地表植被覆盖度情况	$FVC = NDVI_s = (NDVI - NDVI_{low}) / (NDVI_{high} - NDVI_{low})$ $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$	[20,21]
溶解态污染负荷估算	依据降雨冲刷原理定量描述 4 种类型的非点源污染负荷,即城市径流型、农田径流型、农村居民点型和畜禽养殖型	$c_{Dis-urb} = \begin{cases} \sum_{m=1}^4 \sum_{j=1}^{12} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \times (1 - e^{-krt}) \times (\gamma_m \times C_{refuse} \times D + L_m) \times (1 - W) \times (1 - U) & (P \geq r) \\ 0 & (P < r) \end{cases}$ $c_{Dis-agr} = \begin{cases} \sum_{m=1}^2 \sum_{j=1}^{12} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \times (1 - e^{-krt}) \times (Q_{bal_m} + L_m) \times N & (P \geq r) \\ 0, & (P < r) \end{cases}$ $c_{Dis-rur} = \begin{cases} \sum_{m=1}^4 \sum_{j=1}^{12} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \times (1 - e^{-krt}) \times (\gamma_m \times C_{refuse} \times D + L_m) \times (1 - W) & (P \geq r) \\ 0 & (P < r) \end{cases}$ $c_{Dis-liv} = \begin{cases} \sum_{m=1}^4 \sum_{j=1}^{12} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \times (1 - e^{-krt}) \times (\gamma_m \times C_{refuse} \times D + L_m) & (P \geq r) \\ 0 & (P < r) \end{cases}$ $N = slop_{co} \cdot vegcover_{co} \cdot soil_{co}$ $slop_{co} = (slop - slop_{min}) / (slop_{max} - slop_{min})$ $vegcover_{co} = (vegcover_{max} - vegcover) / (vegcover_{max} - vegcover_{min})$ $soil_{co} = (in - in_{min}) / (in_{max} - in_{min})$	[15, 17]
吸附态污染负荷估算	依据土壤侵蚀估算结果定量描述吸附态氮磷的污染负荷	$C_{Ads} = A \times Q_a \times E_r \times 10^{-6}$ $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$ $R = \sum_{j=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5 \times \lg(P_j^2 / P_{year}) - 0.8188}$ $K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{Si}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{Si}{cl + Si} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25 C_{org}}{C_{org} + \exp(3.72 - 2.95 C_{org})} \right]$ $\times \left[1 - \frac{0.7(1 - S_a)}{1 - S_a + \exp[-5.51 + 22.9(1 - S_a)]} \right]$ $K_{china} = -0.01383 + 0.51575 K_{EPIC}$ $K = 0.1317 \times K_{china}$ $S = \begin{cases} 10.8 \sin(\theta) + 0.03 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.8 \sin(\theta) - 0.5 & 5^\circ < \theta < 10^\circ (\text{坡长} > 5) \\ 21.9 \sin(\theta) - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases}$ $S = 3.0 \sin^{0.8}(\tan^{-1} \theta) + 0.56 (\text{坡长} \leq 5)$ $L = (\lambda / 22.13)^m = \begin{cases} m = 0.2 & \theta < 0.5^\circ \\ m = 0.3 & 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ \\ m = 0.4 & 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ m = 0.5 & \theta \geq 3^\circ \end{cases}$ $C = \begin{cases} 1 & FVC = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg FVC & 0 < FVC \leq 78.3\% \\ 0 & FVC > 78.3\% \end{cases}$	[17,22 ~24]
入河量估算	依据径流系数和输沙系数定量评估污染物入河量	$M_{NPS} = (C_{Dis} \times CR + C_{Ads} \times SDR) \times Area$ $CR = P_{year} / Q_{runoff}$ $SDR = Q_{sed} / A \times 100\%$	[17]

2.3 辽河流域非点源污染物空间特征

2010 年辽河流域总氮、总磷、氨氮和化学需氧量空间分布见图 6。从中可以看出,辽河流域的中南部是污染较严重的地区,其次是东北部,具体表现为

辽宁省的大辽河流域、辽河流域、太子河流域和吉林省的东辽河流域,北部内蒙古的西辽河流域非点源污染也有加重趋势。对比辽河流域内的内蒙古自治区和吉林省,辽宁省仍然是非点源污染负荷较高

的省份. 基于辽河流域非点源污染空间特征分析结果,在非点源污染较为严重的地区,建议在现有水质国控监测断面的基础上,在太子河-大辽河-饶阳河-大凌河片和东辽河片适当增加国控监测断面.

表 2 模型中的主要参变量列表

Table 2 List of main parameters

参数	意义	参数	意义
$NUT_{bal}/t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	氮磷平衡负荷	Mnr/t	有机肥养分输入量
$Input/t$	养分输入量	Irg/t	灌溉养分输入量
$Output/t$	养分输出量	$Seed/t$	种子养分输入量
$Area/hm^2$	为耕地面积和园地面之和	Bnf/t	生物固氮氮输入量
$Ftlz/t$	化肥养分输入量	$Dpzt/t$	干湿沉降养分输入量
$Hvst/t$	作物带走养分输出量	Gas/t	氨气挥发和反硝化氮输出量
$Water/t$	淋失和径流养分输出量	FVC	植被覆盖度
$NDVI_s$	标准化归一化植被指数	$NDVI_{low}$	裸土像元的 NDVI
$NDVI_{high}$	植被像元的 NDVI	NIR	近红外波段地表反射率
RED	红光波段地表反射率	$C_{Dis_urb}/t \cdot km^{-2}$	城市径流型溶解态污染负荷
ε (无量纲)	地表径流系数	m (无量纲)	污染元素类型 (1TN; 2TP; 3 COD; 4 NH_4^+-N)
j (无量纲)	月份	N (无量纲)	自然修正因子
$P_j/mm \cdot month^{-1}$	j 月降雨量	ε_0 (无量纲)	标准化地表径流系数
S (无量纲)	社会修正因子	$C_{Dis_rur}/t \cdot km^{-2}$	农村居民点型溶解态污染负荷
γ_m (无量纲)	污染物转化系数	$C_{Dis_liv}/t \cdot km^{-2}$	畜禽养殖型溶解态污染负荷
$C_{refuse}/t \cdot km^{-2}$	累积垃圾/粪便量	D/d	两次降雨期之间的未降雨天数
$L_m/t \cdot km^{-2}$	降雨过后 m 污染物残留量	$r/mm \cdot month^{-1}$	月标准降雨强度
$Q_{bal_m}/t \cdot km^{-2}$	污染源强即氮磷平衡负荷	k (无量纲)	地表冲刷系数
$C_{Dis_agr}/t \cdot km^{-2}$	农田型溶解态污染负荷	$C_{Ads}/t \cdot km^{-2}$	吸附态非点源污染负荷
E_r (无量纲)	氮磷富集系数	$Q_a/mg \cdot kg^{-1}$	土壤氮磷含量
CR (无量纲)	年径流系数	SDR (无量纲)	输沙系数
$A/t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	年土壤侵蚀量	M_{NPS}/t	非点源污染物入河量
L, S (无量纲)	坡度、坡长因子	$R/MJ \cdot mm \cdot (hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$	降雨侵蚀力
$K/t \cdot hm^2 \cdot h \cdot (MJ \cdot mm \cdot hm)^{-1}$	土壤侵蚀性因子	$S_a/\%$	土壤砂粒含量
$K_{China}/[t \cdot hm^2 \cdot h \cdot (hundred \cdot hm^2 \cdot ft \cdot t \cdot in)^{-1}]$	中国修正的土壤侵蚀性因子	$cl/\%$	土壤黏粒含量
$C_{org}/\%$	土壤有机碳含量	$S_i/\%$	土壤粉粒含量
$K_{EPIIC}/[t \cdot hm^2 \cdot h \cdot (hundred \cdot hm^2 \cdot ft \cdot t \cdot in)^{-1}]$	美国制单位的土壤侵蚀性因子	P (无量纲)	水土保持措施因子
C (无量纲)	生物措施因子	0.1317	单位转换系数
λ/m	坡长	Q_{runoff}/mm	年径流量
Q_{sed}/t	年产沙量	$slop_{co}, vegcover_{co}, soil_{co}$	标准化坡度因子、植被覆盖度因子和土壤因子

表 3 模型所需数据列表

Table 3 List of input data

数据类型	来源	数据处理和理论方法
遥感数据	以 2010 年为主的 HJ1A/B 和 Landsat TM 遥感数据	用于辽河流域土地利用解译和植被覆盖度反演,具体方法见文献[12]
月降水数据	国家气象数据中心免费数据	采用 ANUSPLIN 模型方法进行空间插值,其中 DEM 因子为插值的协变量,具体操作见文献[25]
统计数据	统计年鉴(包括施肥量,作物产量等 56 个指标)	用于氮磷平衡估算
DEM 数字高程数据	NASA 发布的全国免费 AsterG-DEM 30m 空间数据 http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/	用于提取坡度和坡长
土壤数据	国家基础信息数据 1:100 土壤类型数据,土壤性质数据 下载地址: http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soil	用于土壤侵蚀计算,土壤性质数据处理方法请见文献[26]

对模拟结果进行逐栅格像元统计,结果表明辽河流域 2010 年 TN 平均产生负荷为 $1.06 t \cdot km^{-2}$, 年排放量为 10.3 万 t; TP 平均产生负荷为 $0.07 t \cdot km^{-2}$, 年排放量为 0.68 万 t; COD 平均产生负荷

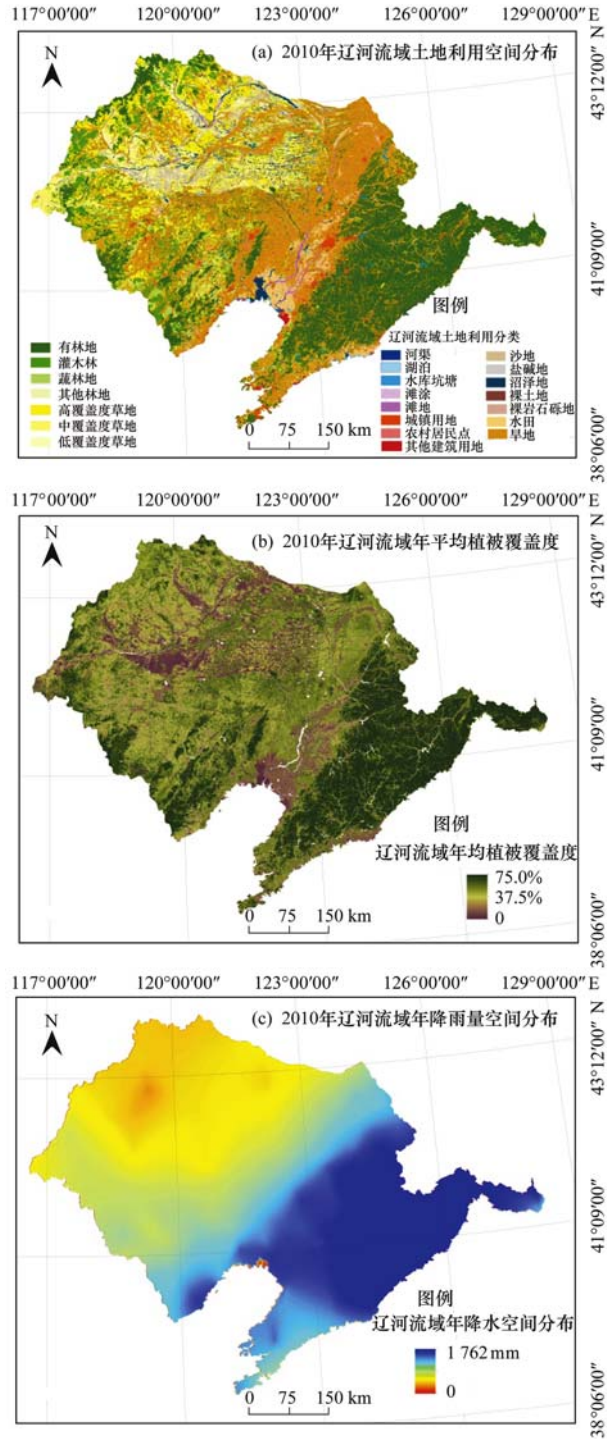


图3 辽河流域主要空间数据(2010年)

Fig. 3 Spatial database of Liaoh River basin in 2010

为 $1.35 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 年排放量为 13.1 万 t; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均产生负荷为 $0.19 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 年排放量为 1.8 万 t.

2.4 辽河流域非点源污染类型分析

对 5 种非点源污染类型进行统计分析, 结果表明: 对于氮磷类指标, 农田径流污染仍然是辽河流域最主要的非点源污染源, 占总污染的 95% 以上; 其他类型顺序如下: 畜禽养殖型 > 城市生活型 > 水土

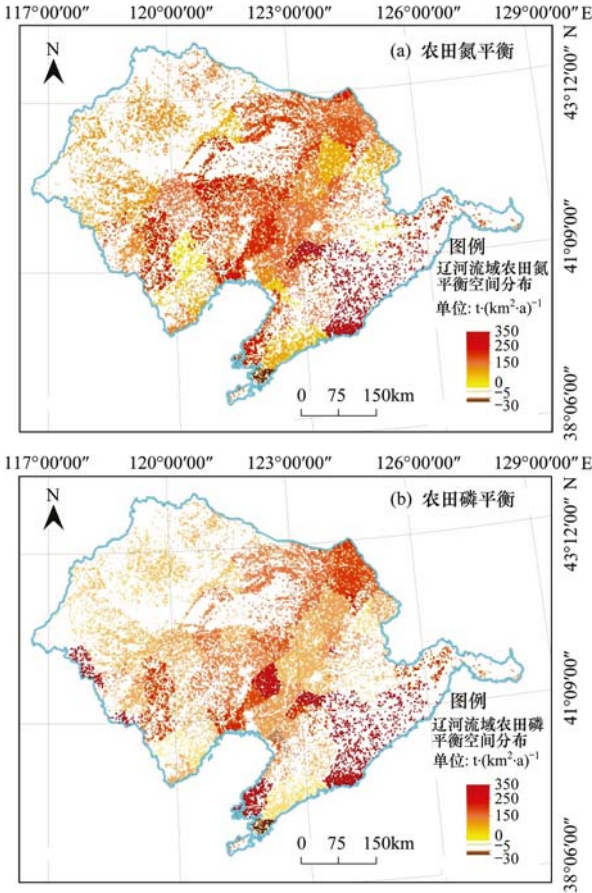


图4 辽河流域农田土壤氮磷平衡空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of agriculture nutrients (N and P) balance

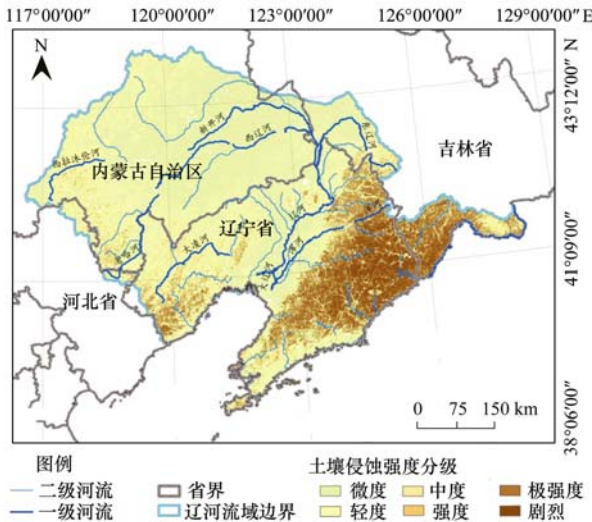


图5 辽河流域土壤侵蚀强度空间分布(2010年)

Fig. 5 Spatial distributions of soil erosion intensity in Liaoh River Basin in 2010

流失型 > 农村生活型; 而化学需氧量指标, 不属于常规非点源污染指标, 且具有点源污染特征, 在模型中仅与 3 种污染类型相关. 模拟结果表明畜禽养殖

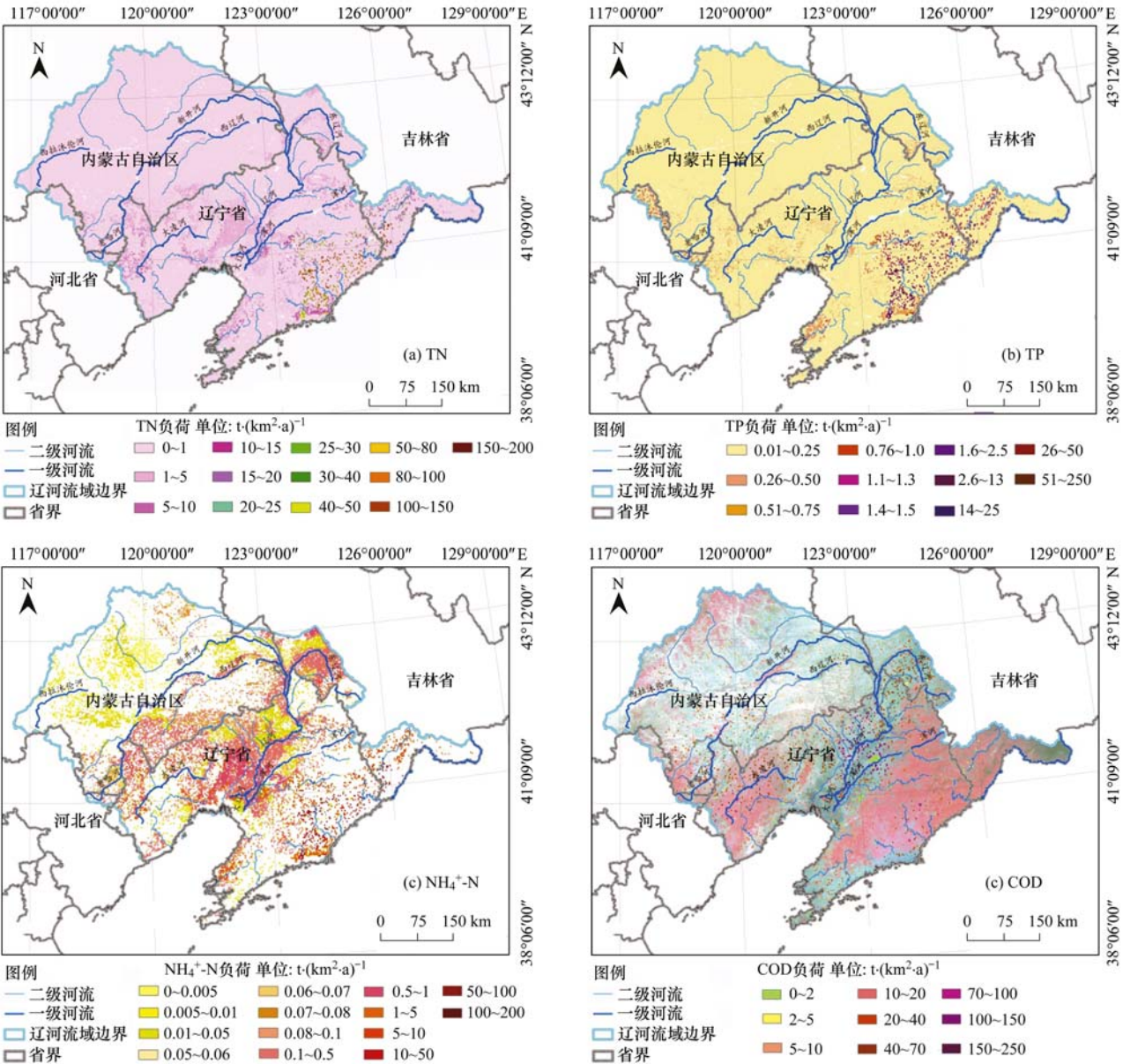


图 6 辽河流域非点源污染负荷空间分布(2010 年)

Fig. 6 Spatial distributions of NPS loads in Liaohe River Basin in 2010

对流域 COD 贡献最大, 占总污染的 98%, 其次为城市生活型, 最后为农村生活型. 不同类型非点源污染排放量统计结果见表 4.

2.5 辽河流域非点源污染贡献率分析

以 2010 年辽河流域国控监测断面的实测数据为依据, 参考 2010 年我国水资源公报的水资源量数据, 简单测算辽河流域 2010 年非点源污染对水质污染的贡献率, 计算公式为:

$$R_{NPS} = M_{NPS} / M_{total} \times 100\%$$

$$M_{total} = c_{monitor} \times Q_{water} \times 10^{-9}$$

式中, R_{NPS} 是非点源污染对水质污染的贡献率;

M_{NPS} 是模型模拟的非点源污染入河量, t; M_{total} 为水体污染物总量, t; $c_{monitor}$ 为水质监测浓度, $mg \cdot L^{-1}$; Q_{water} 为水资源量, L.

2010 年辽河流域水体污染物测算结果为: 总氮 15.2 万 t, 总磷 0.89 万 t, 化学需氧量 33.4 万 t, 氨氮 8.3 万 t. 结合模型模拟结果, 得到 2010 年辽河流域非点源污染对水质的贡献率分别为总氮 67.4%、总磷 76.4%、化学需氧量 39.4% 和氨氮 21.9%. 由此可见, 对于辽河流域总氮总磷非点源污染占水质污染的 50% 以上, 提高流域非点源污染的防治对流域水质改善具有重要作用.

表 4 不同污染类型指标核算列表

Table 4 Discharge of different pollution type

污染类型	指标	污染负荷/ $t \cdot km^{-2}$	排放量/ t
农田径流型	TN	1.05	102 000
	TP	0.07	6 700
	$NH_4^+ - N$	0.19	18 000
畜禽养殖型	TN	0.003	315
	TP	0.000 3	32
	$NH_4^+ - N$	0.001	71
	COD	1.33	129 600
城市径流型	TN	0.000 5	50
	TP	0.000 04	4
	$NH_4^+ - N$	0.000 7	100
	COD	0.01	1 150
农村生活型	TN	0.000 4	40
	TP	0.000 03	3
	$NH_4^+ - N$	0.000 3	30
	COD	0.006	600
水土流失型	TN	0.008	50
	TP	0.003	20

3 结论

(1)辽河流域非点源污染模型估算结果表明:辽河流域 2010 年总氮排放量为 10.3 万 t,总磷排放量为 0.68 万 t,化学需氧量排放量为 13.1 万 t,氨氮排放量为 1.8 万 t.

(2)辽河流域非点源污染空间分布特征表现为南部污染严重,其次是东北部,具体为辽宁省的大辽河流域、辽河流域、太子河流域和吉林省的东辽河流域.

(3)对比不同类型非点源污染类型,辽河流域非点源污染主要表现为农田污染型,主要污染指标为总氮和总磷,不同类型污染源具体排序如下:农田径流型>畜禽养殖型>城市生活型>水土流失型>农村生活型.对于化学需氧量指标,畜禽养殖型是最主要的污染源,其次为城市生活型,最后为农村生活型.

(4)结合 2010 年辽河流域水质断面监测数据和水资源量,估算辽河流域非点源污染对水质污染的贡献率分别总氮 67.4%,总磷 76.4%,化学需氧量 39.4%,氨氮 21.9%.

致谢:在研究过程中,得到了北京师范大学郝芳华教授和杨胜天教授研究团队的技术指导,得到了环境保护部环境规划院在资料和数据上的支持,还有一起进行数据处理的实习生们,在此一并表示感谢!

参考文献:

[1] 孟晓云,于兴修,泮雪芹.云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J].环境科学,2012,33(6):1789-1794.

[2] 丁晓雯,沈珍瑶.涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J].环境科学,2012,33(11):4025-4032.

[3] 朱萱,鲁纪行,边金钟,等.农田径流非点源污染特征及负荷量化方法探讨[J].环境科学,1985,6(5):6-11.

[4] 李怀恩,沈晋,刘玉生.流域非点源污染模型的建立与应用实例[J].环境科学学报,1997,17(2):141-147.

[5] 欧阳威,王玮,郝芳华,等.北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J].中国环境科学,2010,30(9):328-332.

[6] Tim U S. Coupling vadose zone models with GIS: Emerging trends and potential bottlenecks[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(3): 535-544.

[7] Ouyang W, Skidmore A K, Toxopeus A G, et al. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3-4): 373-380.

[8] 白凤姣,李天宏.基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析[J].环境科学,2012,33(8):2667-2673.

[9] 陈庆男,魏成阶.“礼炮”号遥感图像在于桥水库流域土壤侵蚀调查及治理规划中的应用[J].环境遥感,1993,8(1):45-54.

[10] 施为光.邛海非点源污染及模型参数的彩红外遥感航片率定[J].重庆环境科学,1994,16(4):30-34.

[11] 胡远安,程声通,贾海峰,等.利用 TM 图像逐级分类提取非点源信息[J].环境科学,2003,24(1):152-156.

[12] 万兴,王金保,赵晋.基于遥感技术的流域非点源污染研究[J].水资源保护,2006,22(4):62-67.

[13] 王雪蕾,刘昌明,杨胜天,等.RIP_N 模型对官厅水库库滨带去氮效应的流域尺度模拟分析[J].环境科学,2009,30(9):2502-2511.

[14] 王雪蕾,杨胜天,智泓,等.官厅水库库滨带非点源污染控制效应的遥感分析[J].环境科学学报,2007,27(2):304-312.

[15] 郝芳华,程红光,杨胜天.非点源污染模型:理论方法与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2006.283-285.

[16] 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.

[17] Wang X L, Wang Q, Wu C Q, et al. A method coupled with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 430: 132-143.

[18] Sheldrick W F, Syers J K, Lingard J. A conceptual model for conducting nutrient audits at national, regional, and global scales[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62(1): 61-72.

[19] 傅靖.我国农田生态系统养分氮磷钾平衡研究[D].北京:中国农业大学,2007.10-14.

[20] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover

- changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, **25**(1-2): 49-65.
- [21] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Plaza A, *et al.* Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area[J]. *Sensors*, 2009, **9**(2): 768-793.
- [22] Sharply A N, Williams J R. EPIC—Erosion productivity impact calculator: I Model documentation [R]. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin. No. 1768. Washington, DC, 1990.
- [23] McCool D K, Brown L C, Foster G R, *et al.* Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1987, **30**(5): 1387-1396.
- [24] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, **14**(2): 19-24.
- [25] 刘志红, Li L T, McVicar T R, *et al.* 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. *气象*, 2008, **34**(2): 92-100.
- [26] Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, *et al.* A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China[J]. *Geoderma*, 2012, **171-172**: 85-91.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 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