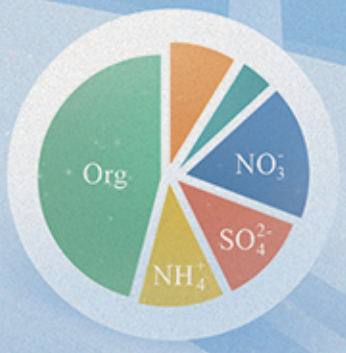
生态环境知识库
Eco-Environmental Knowledge Web

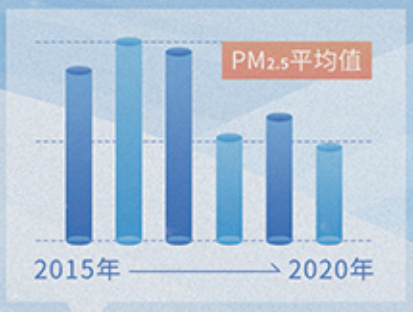
环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气$PM_{2.5}$污染特征分析

刘玥晨，满睿琪，裘彦挺，杨佳炜，王均睿，谭瑞，汤丽姿，俞颖，宋锴，郭松，陈仕意，曾立民，吴志军，胡敏





■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年8月
第43卷 第8期
Vol.43 No.8

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷　第 8 期
2022 年 8 月 15 日

目　次

北京冬季奥运会历史同期大气 $PM_{2.5}$ 污染特征分析 …… 刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析 …… 郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)
长江中游地区 $PM_{2.5}$ 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响 …… 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)
滇中典型工矿业城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价 …… 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性 …… 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅(3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源 …… 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径 …… 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估 …… 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征 …… 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子 …… 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)
长江流域着生藻类群落结构的空间格局及其生态评价 …… 胡愈炘, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析 …… 庞阔, 李敏, 刘璐, 杨珺斓, 赵洪军(4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例 …… 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算 …… 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响 … 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐熙平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源 …… 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价 …… 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策 …… 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估 …… 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)
再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例 …… 袁训超, 王敏, 郭逍宇, 吴东丽(4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析 …… 杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)
太湖氧化亚氮(N_2O)排放特征及潜在驱动因素 …… 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价 …… 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果 …… 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)
环境 pH 条件下 Fe^{2+} 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素 …… 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价 …… 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 …… 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素 …… 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法 …… 王锐, 余京, 李瑜, 周皎, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价 …… 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测 …… 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属积累效应与健康风险 …… 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性 …… 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞祯, 赵海洋(4232)
橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力 …… 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力 …… 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)
连续施硅对双季稻镉硅累积效应的影响 …… 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响 …… 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉砷复合污染土壤的影响 …… 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩廿, 黄永春(4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与镉活性变化的耦合关系 …… 李明远, 张小婷, 刘汉燚, 魏世强(4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响 …… 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响 …… 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响 …… 庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子 …… 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较 …… 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素 …… 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响 …… 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N_2O 排放的影响 …… 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响 …… 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响 …… 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比 …… 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)
《环境科学》征订启事(4211)　《环境科学》征稿简则(4312)　信息(3922, 4031, 4107)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第8期 2022年8月
Vol.43,No.8 Aug.,2022

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算

王有霄[1,2], 黄翀[1], 刘高焕[1,2,3], 赵忠贺[1,2*], 李贺[1], 刘庆生[1]
(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 以黄河三角洲为典型研究区,通过分析区域地表污染物流失风险与入海通量的关系,构建了海岸带农业总氮(TN)和总磷(TP)面源污染排海估算模型. 在此基础上,计算了包含水田、水浇地和旱地等耕地类的 TN 和 TP 面源污染排海系数,验证表明输出系数估算结果较好. 研究区耕地的 TN 和 TP 排海系数分别为 18.33 kg·(hm^2·a)$^{-1}$和 1.02 kg·(hm^2·a)$^{-1}$,在夏季面源污染负荷较高. 子流域尺度较大的耕地类农业面源污染负荷主要位于支脉河、广利河和小岛河管控区域. TN 和 TP 总负荷较大的行政区主要位于北部黄河口镇和永安镇; 较大的单位面积负荷在西南部. 因此,需要关注农业面源污染的时间效应,同时协调社会经济发展,从子流域和行政单元的角度制定综合性面源污染防控策略,陆海统筹治理海域污染.

关键词: 黄河三角洲; 农业面源污染; 土壤流失; 入海通量; TN 和 TP 排海系数
中图分类号: X55 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)08-4032-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202111302

Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss

WANG You-xiao[1,2], HUANG Chong[1], LIU Gao-huan[1,2,3], ZHAO Zhong-he[1,2*], LI He[1], LIU Qing-sheng[1]
(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Taking the Yellow River Delta as a typical research area, we constructed a coastal agricultural TN and TP non-point source pollution estimating model by analyzing the relationship between the surface soil pollutant loss risks and the monitored pollutant flux into the sea. On this basis, TN and TP non-point source export coefficients of paddy fields, irrigated land, and dry land were calculated, and the verification showed that the estimated export coefficients were acceptable. In the study area, the TN and TP export coefficients into the sea of arable land were 18.33 kg·(hm^2·a)$^{-1}$ and 1.02 kg·(hm^2·a)$^{-1}$, respectively. The agricultural non-point source pollution loads of arable land were relatively high in summer. The sub-basins with larger agricultural non-point source pollution loads were mainly located in the control areas of the Zhimai River, Guangli River, and Xiaodao River. The administrative regions with larger total agricultural TN and TP loads were mainly in the northern Huanghekou Town and Yong'an Town, and areas with larger loads per unit area were in the southwest. Therefore, it is necessary to pay more attention to the temporal effects of agricultural non-point source pollution, simultaneously coordinate the social and economic development, and formulate comprehensive agricultural non-point source pollution prevention and control strategies from the perspective of sub-basins and administrative units. This will allow us to improve the offshore pollution status from the perspective of land and sea coordination.

Key words: Yellow River Delta; agricultural non-point source pollution; soil loss; flux into the sea; TN and TP export coefficients

目前,我国的近海污染问题主要来自于陆源排放[1,2],其中海岸带面源污染贡献较大[3,4]. 在渤海沿岸城市的总氮(TN)和总磷(TP)面源污染负荷分别占到陆域总负荷的17%和13%,其中土壤流失是主要输出形式(TN 和 TP 占比分别为 53% 和 79%)[5,6]. 但因其污染物排海过程较为直接和排放路径较具多样化,海岸带的近海面源污染贡献被进一步放大. 其中,对于经济发展相对滞后的沿海地区,农业依然是区域经济的重要来源,农业生产形成的面源污染依然是区域内水环境健康的主要威胁[7]. 在海陆统筹发展的今天[8],掌握海岸带农业面源污染产输及排海基本规律,对于制定近海污染的陆源治理方案和改善我国海岸带水环境污染现状等,均具有重要意义.

在我国的面源污染研究中,模型模拟是较为常用的研究方法,其中输出系数模型有着广泛的应用[9~11]. 输出系数模型通过获得合适的面源污染排放系数,可以方便快速地对区域面源污染进行评估. 目前,相关学者在输出系数模型应用中的输出系数值多采用查阅文献法[12~14],或涉及在前人系数基础上的简单校正[15,16],其主要为已有地区输出系数的直接应用,大部分研究中的输出系数值并不能全面反映区域特征[17]. 少数研究者通过实验方法获取相关输出系数值[18~20],但常因地区差异性或实验条件的局限性,存在输出系数值的区域代表性不确定的问题,造成应用效果较差的现状.

本文立足于我国海岸带农业面源污染问题,通过构建区域地表土壤污染物流失与入海通量的关系

收稿日期: 2021-11-29; **修订日期**: 2021-12-17
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23050101); 国家自然科学基金项目(42001227)
作者简介: 王有霄(1993~),男,博士研究生,主要研究方向为海岸带面源污染评估与模拟,E-mail: wyx@lreis.ac.cn
* 通信作者,E-mail:zhaozhh@lreis.ac.cn

模型，建立了一种估算区域耕地输出系数的方法. 本文以黄河三角洲为典型研究区，计算了区域水田、水浇地和旱地等耕地类的 TN 和 TP 面源污染排海系数，并且在子流域和行政区完成了污染物的空间负荷评估. 通过形成一套计算海岸带农业 TN 和 TP 面源污染输出系数的方法体系，从陆源污染减控的角度提出相应的时空针对性策略，以期为陆海统筹治理海域污染提供决策支持.

1　材料与方法

1.1　研究区

黄河三角洲为黄河携带黄土高原的泥沙于入海口处形成的淤积平原，是我国海岸带典型的农业发达区域. 如图 1 和图 2，本文研究区为黄河三角洲黄河以南的部分，南抵支脉河，东临莱州湾，总面积 2 902 km^2（118°13′～119°17′E，37°16′～37°50′N）. 该区域属于温带大陆性季风气候，年均降雨量 563 mm，夏季（6～8 月）降雨量占比达 67%，地势低平，作物熟制为一年两熟. 根据第二次全国土地调查数据，研究区的耕地和城镇用地比例较大，分别达 24% 和 10%. 行政区划隶属于山东省东营市，包括东营区和垦利区两县区 17 个镇级行政单位. 与我国其它大河三角洲（长江三角洲和珠江三角洲）相比，黄河三角洲农业经济占比仍然较高，且农业生产方式较为粗放，农田翻耕和复种指数较高，已有资料显示研究区每年农业面源 TN 和 TP 入海量分别约为 4 764 t 和 1 412 t[7]，由农业生产导致的氮磷面源污染物排河入海量大.

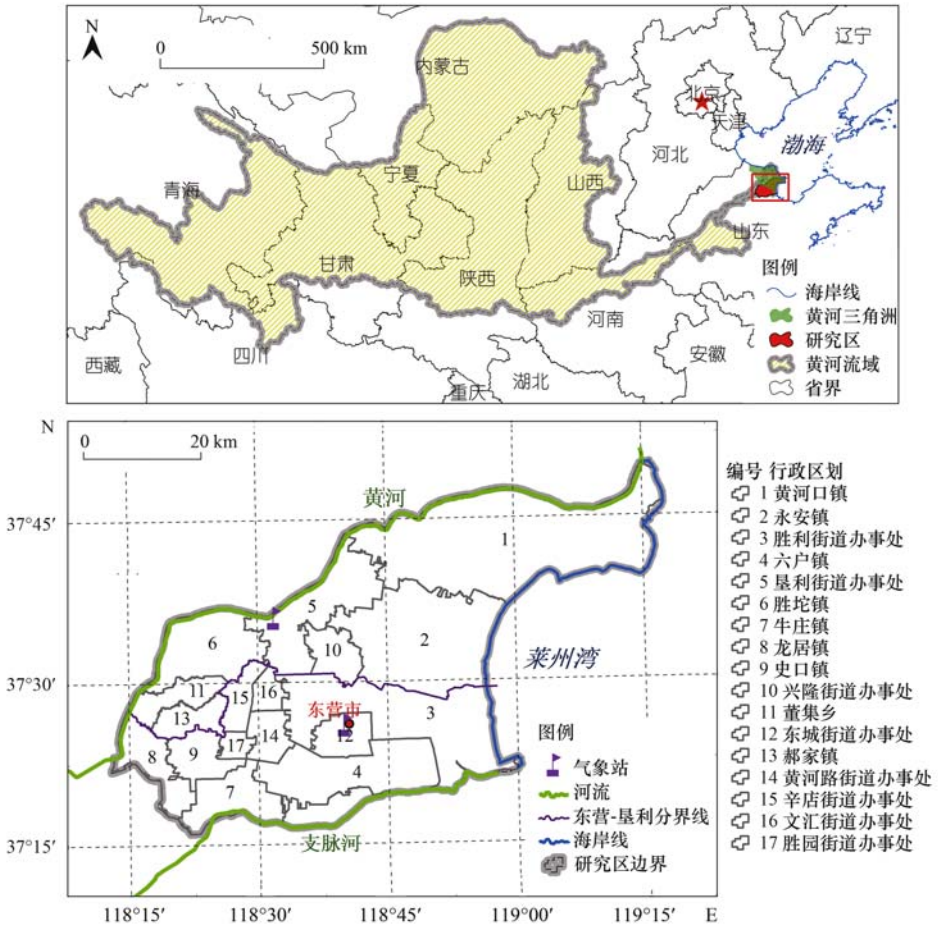


图 1　研究区地理位置示意

Fig. 1　Location of the study area

1.2　数据基础

1.2.1　区域 TN 和 TP 面源污染风险数据

前期工作中基于 RUSLE 模型[21]，构建了一种海岸带面源污染风险指数（CNSPRI，图 3）. 该数据描述了地表土壤氮磷污染物随水土流失过程向水环境的排放潜力，其计算过程见式（1）：

$$CNSPRI = SC \times W_{sc} + K \times W_K + S \times W_S + C \times W_C + R \times W_R + Fl \times W_{Fl} + Fp \times W_{Fp} \quad (1)$$

式中，CNSPRI 为 TN 或 TP 面源污染风险指数；SC、K、S、C、R、Fl 和 Fp 分别为影响面源污染输出的土壤污染物含量因子、土壤可蚀性因子、地形坡度因子、植被覆盖因子、降雨侵蚀因子、流量因子和径流路径因子；W 为根据各因子图层的空间标准差计算的权重.

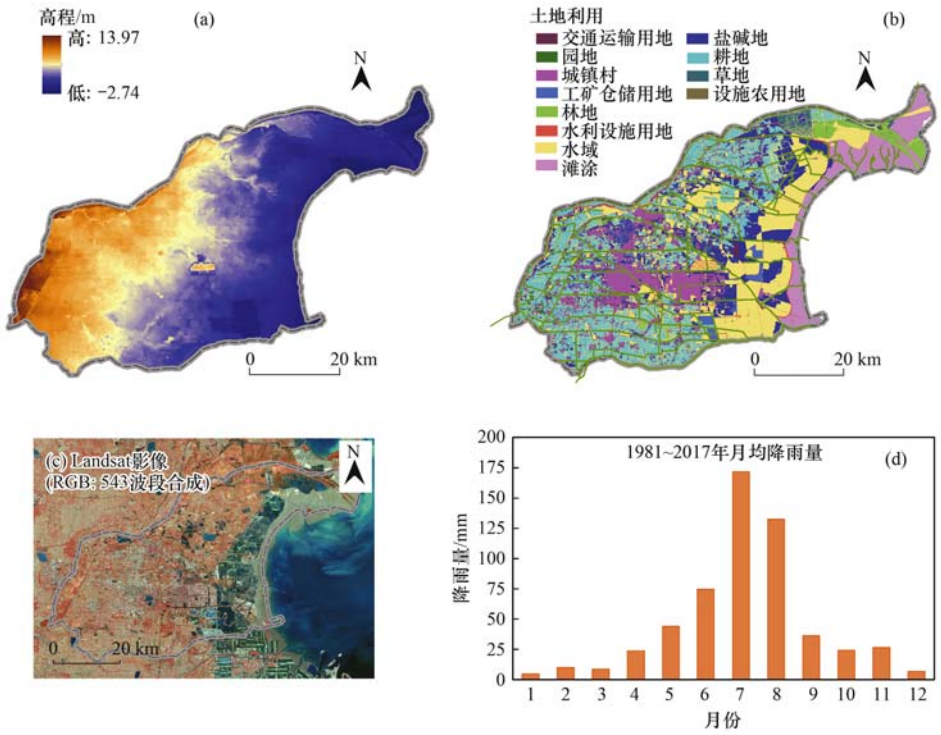


图 2 研究区区域特征

Fig. 2 Regional characteristics of the study area

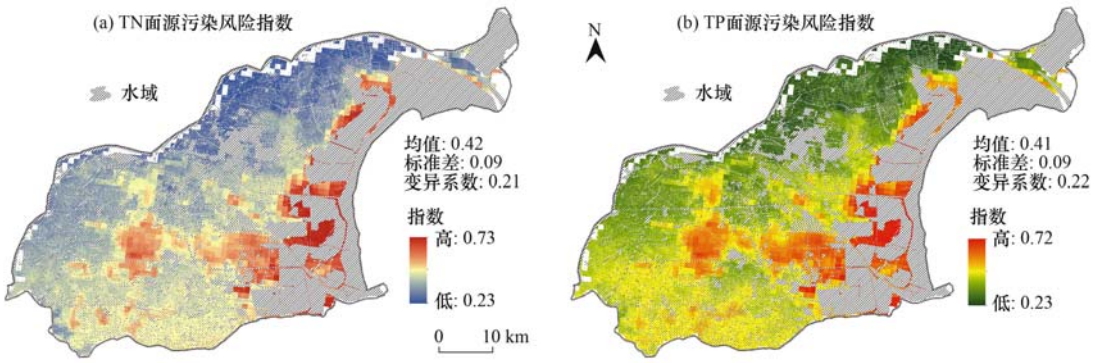


图 3 TN 和 TP 面源污染风险指数空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of TN and TP non-point source pollution risk index

1.2.2 污染物入海通量监测数据

于 2020 年 6 ~ 9 月在研究区 9 个入海口(图 4),开展了每 5 d 一次的水文水质监测. 为保证监测点处水流为自然陆域排海过程,减少因海洋潮汐作用对监测结果的影响,本研究通过分析潮汐规律,选择低潮点合适时间开展采样工作. 另外,于 2019 年的 7、8 月和 2020 年的 6、10 月在包含 w19 在内的关键河流断面,开展了 4 次区域水文水质采样. 监测水文指标包括径流水深与流速; 水质数据包括 TN 和 TP 浓度. 水质数据分析在实验室环境下进行,分别采用凯氏定氮法(TN)和碱熔-钼锑抗比色法(TP)进行测定.

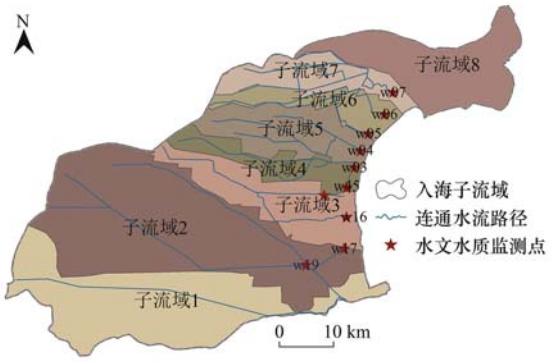


图 4 基于 2020 年 9 个水文水质监测点的入海子流域划分

Fig. 4 Division of the sub-basins into the sea based on nine hydrological and water quality monitoring samples of 2020

1.2.3 辅助地理数据

辅助地理数据包括: ①第二次全国土地利用现状调查数据集,本文对其进行了一定的实地考察与校正; ② 数字高程模型(DEM, http://www.

geodata. cn/); ③Landsat 8 OLI 遥感影像(15 m 融合分辨率, http://www. gscloud. cn/)和高分二号遥感影像(1 m 融合分辨率, http://www. dsac. cn/).

1.3　研究方法

1.3.1　入海子流域划分

以确定的 9 个入海口位置作为子流域出口,进行水流主路径上溯,同时结合地形规律、河流沟渠水流走向以及主干道路分布,确定研究区入海子流域分布,见图 4. 研究区地势低平,流域边界不明显,且近年来由于人为因素对原始地形的改造较大,因此在子流域边界确定时,根据实际情况以部分主干道路作为边界.

1.3.2　土地利用面源污染贡献分类

不同土地利用由于污染物含量、地表覆被和地面硬化程度等存在异质性,其对面源污染物的输出潜力也具有差异性. 因此,本文基于第二次全国土地利用现状调查数据,根据各土地利用对面源污染的贡献性质,将研究区包含的 30 个二级土地利用划分了 4 个面源污染贡献类,即农业用地(6 类)、不透水面(10 类)、水域(6 类)和其它用地(8 类),见表 1.

表 1　基于面源污染贡献性质的土地利用分类

Table 1　Land use classifications based on their contributions to non-point source pollution

分类	土地利用类型
农业用地(6 类)	水浇地(16. 75%)、旱地(4. 68%)、水田(2. 07%)和其它农业用地[村庄(4. 97%)、果园(0. 29%)、设施农用地(0. 19%)]
不透水面(10 类)	城市(4. 23%)、水工建筑用地(2. 11%)、采矿用地(1. 80%)、道路用地[公路用地(1. 48%)、铁路用地(0. 06%)、农村道路(0. 52%)]、建制镇(0. 88%)、风景名胜及特殊用地(0. 13%)、机场用地(0. 11%)和港口码头用地(0. 03%)
水域(6 类)	坑塘水面(13. 73%)、沟渠(8. 27%)、滩涂[内陆滩涂(3. 58%)、沿海滩涂(5. 76%)]、水库水面(5. 32%)和河流水面(2. 76%)
其它用地(8 类)	盐碱地(15. 25%)、林地(灌木林地(2. 01%)、有林地(0. 84%)、其他林地(0. 39%))、草地[人工牧草地(0. 82%)、其他草地(0. 69%)、天然牧草地(0. 001%)]和其他园地(0. 26%)

1.3.3　农业面源污染入海量

(1) TN 和 TP 入海通量　本文所监测的 9 个入海口水文水质管控了子流域 2 ~ 子流域 7 的陆源污染排海,TN 和 TP 入海通量计算见式(2):

$$Q_n = c_n \times R_n \tag{2}$$

式中,Q_n 为第 n 个入海口的 TN 或 TP 入海通量, $g \cdot s^{-1}$; c_n 为污染物浓度, $g \cdot m^{-3}$; R_n 为第 n 个入海口的径流量, $m^3 \cdot s^{-1}$.

子流域 2 的入海出口包括 w17 和汇入支脉河的分支(缺少监测数据)两部分,故将 w19 设为其水流控制点. 由于在 w19 未开展长期水文水质监测,对于其 TN 和 TP 入海通量确定采用 w17 样点的数据进行推算: 根据 4 次区域水文水质采样数据,确定了 w19 处的水流约有 1/14 通过 w17 汇入莱州湾,进而确定 2020 年 6 ~ 9 月相应采样时间 w19 样点处的 TN 和 TP 入海通量.

(2) 农业面源污染入海量估算　基于监测的 TN 和 TP 入海通量,考虑土壤流失农业面源污染贡献与年降雨量分布,参考相关文献资料[6,22],文中估算了全年尺度耕地类 TN 和 TP 土壤流失面源污染输出量,具体过程: ① 确定水环境农业面源污染物占比. 水环境 TN 和 TP 污染物中的农业(农业和农村生活)TN 和 TP 面源污染占比分别达 61. 20% 和 78. 92%[22],以此计算农业面源 TN 和 TP 排海贡献量; ② 确定土壤流失农业面源污染贡献比例. 根据 Huang 等[6]在渤海海岸带的面源污染来源分析结果,研究区 TN 和 TP 面源污染主要为农业源,包括农村生活污水、畜禽水产养殖和土壤流失等 3 个方面,其对水环境污染的贡献分布见表 2. 而研究区农业 TN 和 TP 污染物土壤流失的主体是耕地类. 因此,确定耕地类土壤流失导致的农业 TN 和 TP 面源污染贡献比分别约为 39. 67% 和 70. 18%; ③ 全年尺度 TN 和 TP 面源污染入海通量估算. 降雨是面源污染产输的主要驱动因素,一般来说,降雨量越大、强度越高,TN 和 TP 面源污染输出也就越多. 本文通过获得 6 ~ 9 月水文水质监测期间的降雨量全年占比(约为 73. 66%),等比估算年尺度 TN 和 TP 面源污染物入海量.

综上所述,耕地类土壤流失导致的年尺度农业 TN 和 TP 面源污染物入海量计算可由下式来表示:

$$Q = (Q' \times r_{ansp} \times r_{sl}) / r_{rain} \tag{3}$$

式中,Q 为年尺度耕地 TN 或 TP 面源污染物入海通量, $t \cdot a^{-1}$; Q' 为监测时间内的实际污染物入海通量,t; r_{ansp} 为水环境污染物中农业面源占比; r_{sl} 为耕地土壤流失导致的农业面源污染物入海占比; r_{rain} 为监测期间内的降雨量全年占比.

1.3.4　农业面源污染入海产输模型

根据"源""汇"景观理论[23~25],表 1 中的水域主要为面源污染的"汇",其它 3 类则是"源"景观类型. 在不透水面类和其他地表暴露程度较

表 2 农业 TN 和 TP 面源污染主要来源贡献率[6]/%

Table 2 Contribution rate of main sources of agricultural TN and TP non-point source pollution/%

面源污染物	农村生活污水	畜禽与水产养殖	土壤流失
TN	35.48	24.86	39.67
TP	15.74	14.08	70.18

小的土地利用中,以土壤流失形式产生的氮磷面源污染输出基本较少,研究区土壤流失污染物输出的主体为耕地类. 因此,本文通过提取水浇地、旱地、水田和果园这 4 类土地利用的 CNSPRI 值,分子流域统计分析了耕地类的 TN 和 TP 的累计 CNSPRI 值与其年尺度土壤流失面源污染入海量的关系,结果见图 5. 并进一步得到了耕地类农业面源 TN 和 TP 入海通量计算模型,见式(4)和式(5):

$$Y_{TN} = 149.34 \times \ln(X_{TN}) - 1\,352.2 \quad (R^2 = 0.96,\ X_{TN} \geqslant 8\,557.01) \tag{4}$$

$$Y_{TP} = 7.31 \times \ln(X_{TP}) - 64.63 \quad (R^2 = 0.86,\ X_{TP} \geqslant 6\,915.52) \tag{5}$$

式中,Y_{TN}和 Y_{TP}分别为全年耕地 TN 和 TP 面源污染排海量,$t \cdot a^{-1}$; X_{TN}和 X_{TP}分别为耕地的 TN 和 TP 累计 CNSPRI 值.

可以发现,图5中的对数曲线拟合度较高,其决

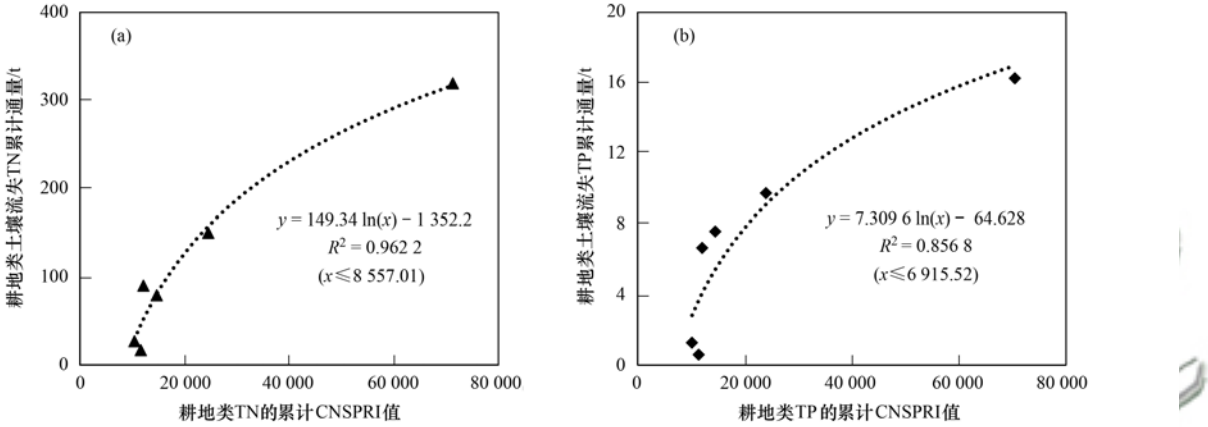


图 5 耕地类 TN 和 TP 的累计 CNSPRI 值和年尺度污染物入海通量的关系分布

Fig. 5 Relationship between the accumulated CNSPRIs of TN and TP and annual pollutant flux into the sea

定系数(R^2)均在 0.85 以上[图 5(a)和 5(b)的 R^2 分别为 0.96 和 0.86]. 式(4)和式(5)所拟合的耕地类 TN 和 TP 面源污染入海量与耕地类累计 CNSPRI 的对数关系较理想,但模型需要一定的 CNSPRI 值来保证 TN 和 TP 入海通量处于正值区间.

1.3.5 农业面源污染排海系数

基于上述确定的耕地类农业面源污染入海产输模型[图 5(a)、5(b)和式(4)、式(5)],本文通过统计水田、水浇地和旱地(由于果园累计 CNSPRI 较小,将其归并为旱地类型进行统计)这 3 类农业用地的累计 CNSPRI 值,来确定各自的 TN 和 TP 入海通量贡献值,将入海量贡献平均到单位面积上,即可得到 3 种耕地类的 TN 和 TP 面源污染入海输出系数,即:

$$C_i = Q_i / S_i \tag{6}$$

式中,C_i 为第 i 种耕地类的排海系数; Q_i 为第 i 种耕地类的面源污染排海量; S_i 为第 i 种耕地类的面积.

2 结果与分析

2.1 农业 TN 和 TP 面源污染输出系数

通过统计水田、水浇地和旱地这 3 类农业用地的累计 CNSPRI 值,并嵌入式(4)和式(5)得到各自的入海通量贡献,利用式(6)计算得到研究区耕地类 TN 和 TP 面源污染排海系数,结果见表 3. 研究区水田、水浇地和旱地 3 类用地的 TN 排海系数分别为 25.96、9.64 和 19.40 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$; TP 排海系数分别为 1.50、0.50 和 1.05 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$. 由此可得,耕地类农业 TN 和 TP 排海系数的均值分别为 18.33 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$和 1.02 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$.

通过分子流域对比由耕地类输出系数计算的 TN、TP 负荷和由式(3)获得的耕地类农业面源 TN 和 TP 入海通量,对文中的输出系数进行验证,结果见图 6. 从中发现,图 6(a)拟合的线性函数与 $y = x$ 的偏离程度较小,由 TN 输出系数模拟的面源污染负荷的相对误差为 -15.4%; TP 输出系数计算结果的相对误差为 -25.7%,不如 TN 理想. 整体上来说,应用文中输出系数模拟的 TN 和 TP 污染负荷结果较好[26~28].

2.2 区域耕地 TN 和 TP 面源污染负荷

2.2.1 入海子流域 TN 和 TP 负荷空间分布

应用上述各耕地类的 TN 和 TP 面源污染输出系数,分子流域对其 TN 和 TP 面源污染负荷进行计算,结果见图 7. 对于耕地类 TN 和 TP 面源污染总负

表 3　耕地类农业 TN 和 TP 面源污染排海系数计算结果

Table 3　Calculated export coefficients of agricultural TN and TP non-point source pollution of arable land

农业用地分类	面积 /hm^2	TN 累计 CNSPRI	TP 累计 CNSPRI	年 TN 入海贡献量/kg	年 TP 入海贡献量/kg	TN 排海系数 /kg·(hm^2·a)$^{-1}$	TP 排海系数 /kg·(hm^2·a)$^{-1}$
水田	6 020. 08	24 371. 22	23 873. 84	156 306. 97	9 056. 70	25. 96	1. 50
水浇地	48 608. 30	196 934. 07	195 939. 14	468 347. 83	24 443. 57	9. 64	0. 50
旱地和果园	14 435. 47	55 823. 04	54 913. 80	280 077. 55	15 145. 47	19. 40	1. 05
耕地	69 063. 854 4	277 128. 34	274 726. 78	904 732. 35	48 645. 73	18. 33	1. 02

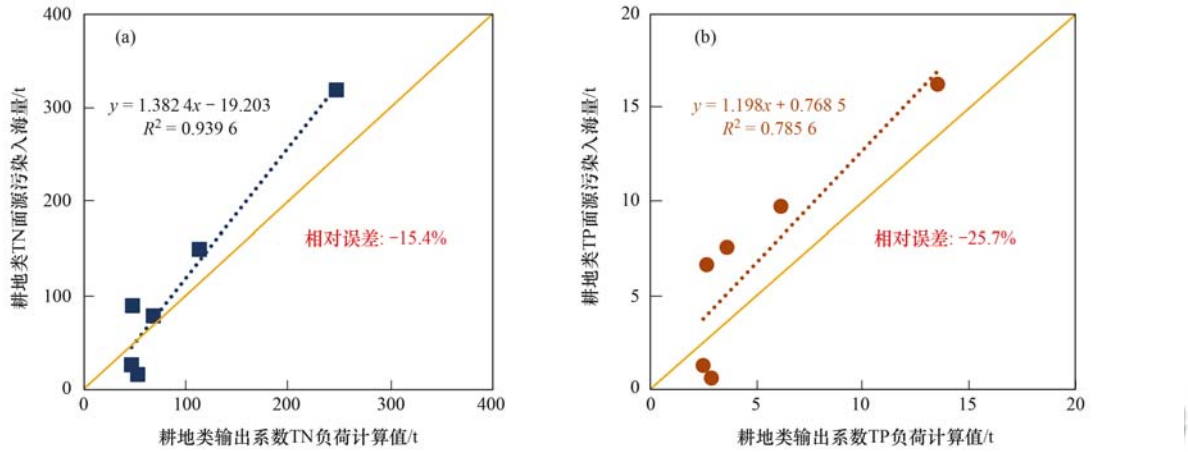


图 6　子流域尺度耕地类 TN 和 TP 农业面源污染输出系数验证结果

Fig. 6　Validation of the agricultural TN and TP non-point source pollution export coefficients of arable land at a sub-basin scale

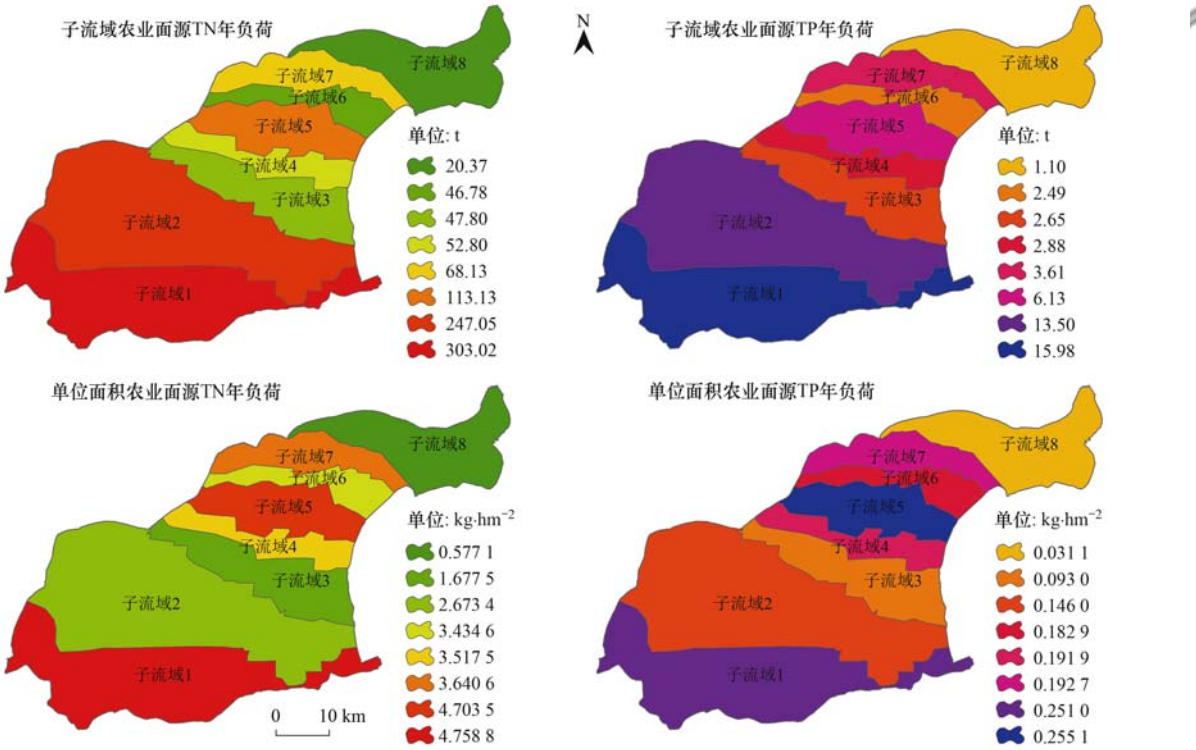


图 7　入海子流域耕地 TN 和 TP 面源污染负荷空间分布

Fig. 7　Spatial distributions of TN and TP non-point source pollution loads of arable land in sub-basins

荷来说,高值区域主要位于子流域 1、子流域 2 和子流域 5；子流域 8 的污染负荷最小. 对于单位面积 TN 和 TP 面源污染负荷,高值区域则主要位于子流域 1 和子流域 5；低值区在子流域 8 和子流域 3. 可以发现,子流域 1 和子流域 5 的耕地类 TN 和 TP 面源污染总负荷和单位面积负荷均处于较高水平；而控制东营主城区的子流域 2 的 TN 和 TP 总负荷较大,单位面积负荷较小. 子流域 1、子流域 2 和子流域 5 的污染物分别主要通过支脉河、广利河和小岛河水系汇入莱州湾,需

要对 3 个子流域的耕地类农业氮磷面源污染及排海进行重点关注. 子流域 8 污染负荷较小的原因主要与该区域的湿地面积较大和耕地面积较小有关.

2.2.2 分行政区 TN 和 TP 负荷空间分布

本文中以镇级行政单位为分区线,同时完成了相应的耕地类 TN 和 TP 面源污染负荷评估,如图 8 所示. 在空间分布上,耕地类 TN 和 TP 面源污染总负荷呈现北部高、南部低的状态,在东营主城区附近较低; 而单位面积 TN 和 TP 负荷则整体呈现与总负荷相反的分布,即在北部低、南部尤其是西南部区域较高,而东营主城区的状态值依然较低. 可以看出,耕地类 TN 和 TP 面源污染总负荷最大的行政单位主要位于北部黄河口镇和永安镇; 而单位面积 TN 和 TP 负荷较大的区域则主要是西南部的史口镇和牛庄镇.

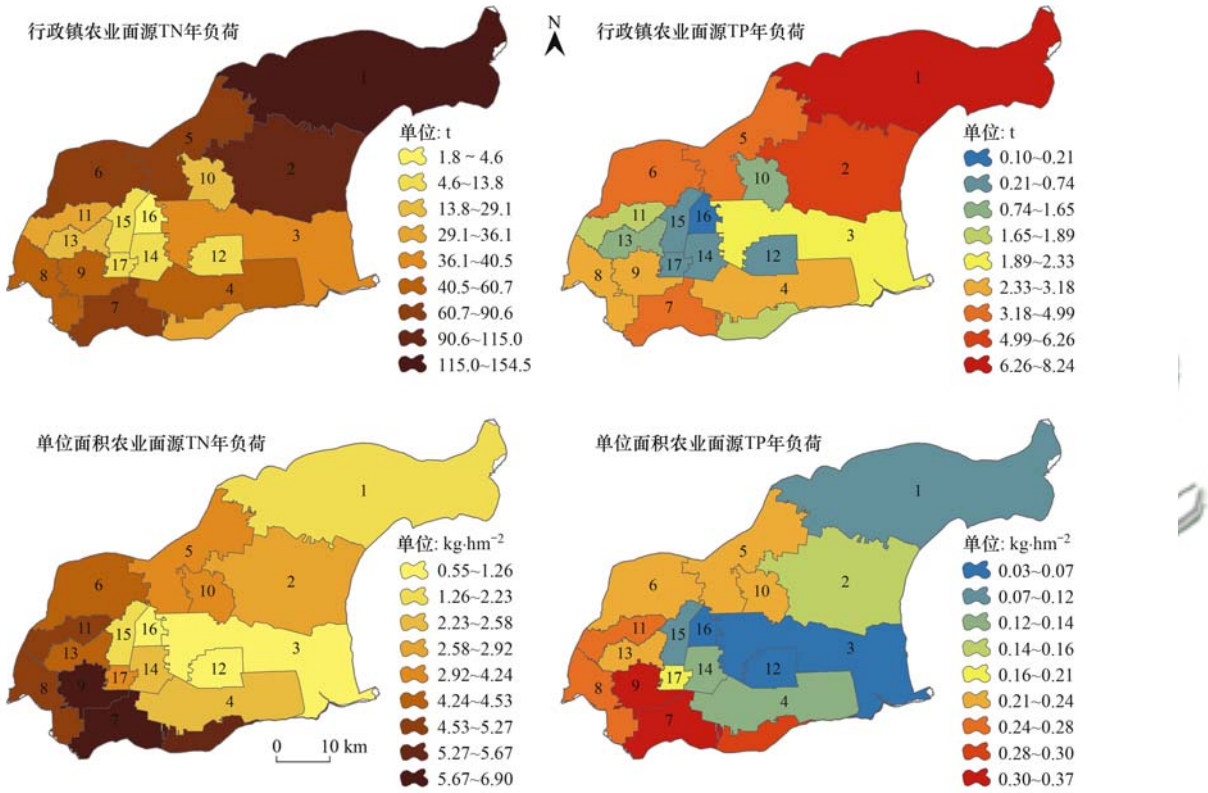


图 8 镇级行政区耕地 TN 和 TP 面源污染负荷空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of TN and TP non-point source pollution loads of arable land in town-level administrative units

3 讨论

3.1 研究区农业 TN 和 TP 面源污染排放系数水平

本文统计分析了国外相关耕地类输出系数研究和国内相似区域输出系数确定结果,见表 4. 可以发现,文中计算的 3 种耕地类的 TN 和 TP 输出系数值与前人研究均处于同一数值水平,符合黄河三角洲的自然地理特征与社会经济发展现状. 通过对比黄河流域其它区域的 TN 输出系数值[13.18 ~ 32.88 kg·(hm^2·a)$^{-1}$],研究区耕地的输出系数值[18.33 kg·(hm^2·a)$^{-1}$]整体处于中等偏下的水平; 而 TP 输出系数值[1.02 kg·(hm^2·a)$^{-1}$]则比黄河流域整体水平[0.78 ~ 0.9 kg·(hm^2·a)$^{-1}$]偏高. 另外,文中计算的水田 TN 和 TP 输出系数均大于旱地和水浇地,这可能与研究区存在的水稻田洗盐活动密切相关,在这种情况下将有大量的水田排水和 TN、TP 面源污染增加输出[29,30]. 综上所述,本文所确定的农业面源污染排海模型具有较好的预测性,得到的黄河三角洲耕地类 TN 和 TP 面源污染排海系数较为合理.

3.2 陆海统筹下的面源污染防控时空对策

海岸带农业面源污染具有其特有的地域分布特点,需要有针对性地制定相应时空对策,来减少陆源污染产生和控制排海量. 以黄河三角洲研究区为例进行农业面源污染防控对策分析.

从面源污染的时间效应上来说,研究区降雨和作物生长季均集中在夏季,在该时间段内,由于化肥施用、农田耕作和降雨冲刷地表产生的农业面源污染风险较高. 因此,夏季作物生长季是管控农业面源污染入海的重点时期,但同时需要兼顾当地经济发展需要,在制定相应的农业面源污染时间策略时,考虑污染治理和社会生产发展的协调可持续,例如可

表 4　国内外典型流域耕地 TN 和 TP 面源污染输出系数

Table 4　Export coefficients of the TN and TP non-point source pollution of arable land in typical watersheds at home and abroad

编号	所属区域	用地类型	TN 输出系数/kg·(hm²·a)⁻¹	TP 输出系数/kg·(hm²·a)⁻¹
1	英国斯拉普顿流域	耕地	—	0.9（距离河流 <50 m）[31] 和 0.7（距离河流 >50 m）[31]
2	日本富士河流域	农业用地	5.5 ~ 52.5[32,33]	0.36[32,33]
3	长江三角洲平原太湖流域	耕地	18.32[34]	2.56[34]
4	长江中上游	耕地	28.83[35]、46.3（旱地）[36]、21.5（水田）[36]、26.25（水田）[37] 和 19.21（旱地）[37]	5.94[35]、1.82（水田）[37] 和 0.79（旱地）[37]
		果林	14.57[35] 和 14.3[36]	3.81[35]
5	黄河流域黑河流域	耕地	29[38]	0.9[38]
6	黄河流域渭河流域	耕地	13.18[39] 和 32.88[40]	0.9[40]
7	黄河流域山西运城段汾河流域	耕地	17.43[41] 和 32.18[26]	0.78[26]
8	黄河流域宁夏灌区	耕地	19.26[42]	0.79[42]
9	松花江流域	耕地	17.43 ~ 33.29[43]	0.25 ~ 0.9[43]
10	山东胶州湾海岸带	耕地	13.45[44]	2.24[44]

以实施施肥与强降雨错时开展和加强农田排水管理等措施，减小农业面源污染排海的时间效应.

从面源污染的空间效应上来说，海岸带面源污染排海遵循基本的流域汇流机制，需要准确把握排海口和对应管控流域位置，有空间针对性地开展农业面源污染治理. 前人研究中已经尝试通过调控流域内土地利用布局等，实施最佳管理措施（BMPs）[45,46]，制定面源污染物排放的源头减量、过程调控和流域内增耗等措施，来减少水环境污染威胁. 另外，在空间上制定相应的农业面源污染防控政策，需要同时基于相应的行政单元实施：通过定位面源污染风险重点源区，由上级主管部门领导，充分调动各级政府和有关部门的力量，结合相关立法与规定，提高农业面源污染的危害意识，提升社会群体的行为积极性，减少由农业生产活动产生的面源污染物排海.

3.3　模型方法的局限性

本文所构建的农业面源污染入海产输模型（图 5），由于数据和研究尺度的局限性，仅针对黄河三角洲研究区主要耕地类的 TN 和 TP 面源污染排海系数进行了估算和验证，且取得了较好的效果，但该模型方法在其它区域的适用性仍有待于进一步验证. 另外，模型结果［式（4）和式（5）］需要一定数值水平的 CNSPRI 值来保证 TN 和 TP 入海通量为正值，对于具有小面积和较小 CNSPRI 累计值的农业用地类（例如文中的果园用地）则无法完成相应的输出系数计算，这种情况可能与研究区的土地利用空间布局和面源污染复杂的产输机制有关.

4　结论

（1）研究区耕地类的 TN 和 TP 排海系数分别为 18.33 kg·(hm²·a)⁻¹ 和 1.02 kg·(hm²·a)⁻¹，水浇地为主要的农业面源污染贡献类.

（2）在时空分布上，耕地类农业 TN 和 TP 面源污染排海主要集中在夏季. 支脉河、广利河和小岛河控制的子流域具有较大污染负荷；较大 TN 和 TP 污染负荷的行政镇主要位于北部，而较大单位面积负荷则在西南部，东营主城区总体负荷较小.

（3）对于农业面源污染防控建议，需要制定时空针对性面源污染防控策略，重点关注降雨集中期和主要作物生长季，加强该时间内的施肥和农田管理，减少耕地氮磷面源污染入海量；同时，应在子流域和行政区划尺度上综合分析农业面源污染关键源区位置，与社会经济现状相协调，实施相关空间管理措施，从源头减量-过程控制和增耗的角度来减控农业氮磷污染物排海.

参考文献：

[1] 姚瑞华，王金南，王东. 国家海洋生态环境保护“十四五”战略路线图分析[J]. 中国环境管理，2020，**12**(3)：15-20.
Yao R H，Wang J N，Wang D. A roadmap analysis of national marine eco-environmental protection during the 14th five-year period[J]. Chinese Journal of Environmental Management，2020，**12**(3)：15-20.

[2] 戴文芳，郭永豪，郁维娜，等. 三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响[J]. 环境科学，2017，**38**(4)：1414-1422.
Dai W F，Guo Y H，Yu W N，*et al*. Effects of coastal organic pollution on bacterioplankton community in Sanmen Bay[J]. Environmental Science，2017，**38**(4)：1414-1422.

[3] 李拴虎，雷坤，徐香勤，等. 海岸带狭义非点源污染的研究现状[J]. 环境污染与防治，2014，**36**(3)：94-98.
Li S H，Lei K，Xu X Q，*et al*. Study on the narrow non-point source pollution in coastal zone[J]. Environmental Pollution and Control，2014，**36**(3)：94-98.

[4] 侯西勇，张安定，王传远，等. 海岸带陆源非点源污染研究进展[J]. 地理科学进展，2010，**29**(1)：73-78.
Hou X Y，Zhang A D，Wang C Y，*et al*. Progress of studies on coastal land-based non-point source pollution[J]. Progress in Geography，2010，**29**(1)：73-78.

[5] 索安宁，王天明，王辉，等. 基于格局-过程理论的非点源污染实证研究：以黄土丘陵沟壑区水土流失为例[J]. 环境科学，2006，**27**(12)：2415-2420.

Suo A N, Wang T M, Wang H, *et al*. Empirical study on non-point sources pollution based on landscape pattern & ecological processes theory: a case of soil water loss on the Loess Plateau in China[J]. Environmental Science, 2006, **27**(12): 2415-2420.

[6] Huang J L, Li Q S, Huang L, *et al*. Watershed-scale evaluation for land-based nonpoint source nutrients management in the Bohai Sea Bay, China[J]. Ocean & Coastal Management, 2013, **71**: 314-325.

[7] 麻德明, 石洪华, 丰爱平. 基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例[J]. 生态学报, 2014, **34**(1): 173-181.
Ma D M, Shi H H, Feng A P. Estimation of agricultural non-point source pollution based on watershed unit: a case study of Laizhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(1): 173-181.

[8] 姚瑞华, 张晓丽, 刘静, 等. 陆海统筹推动海洋生态环境保护的几点思考[J]. 环境保护, 2020, **48**(7): 14-17.
Yao R H, Zhang X L, Liu J, *et al*. Study on promoting marine eco-environmental protection through land and marine development in a coordinated way[J]. Environmental Protection, 2020, **48**(7): 14-17.

[9] 胡晴, 郭怀成, 王雨琪, 等. 基于改进输出系数模型的农业源污染物负荷核算[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, **57**(4): 739-748.
Hu Q, Guo H C, Wang Y Q, *et al*. Estimation of agricultural non-point source pollution loads based on improved export coefficient model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, **57**(4): 739-748.

[10] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(4): 755-761.
Xue L H, Yang L Z. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, **28**(4): 755-761.

[11] 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.
Ding X W, Shen Z Y. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fujiang watershed[J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 4025-4032.

[12] 董斯齐, 黄翀. 粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5384-5393.
Dong S Q, Huang C. Land-based nitrogen pollution source structure and spatial distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5384-5393.

[13] 王萌, 王敬贤, 刘云, 等. 湖北省三峡库区1991—2014年农业非点源氮磷污染负荷分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(2): 294-301.
Wang M, Wang J X, Liu Y, *et al*. Analysis of nitrogen and phosphorus pollution loads from agricultural non-point sources in the three gorges reservoir of Hubei province from 1991 to 2014[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(2): 294-301.

[14] 张敏, 刘庆生, 刘高焕. 浙江省安吉县西部小流域非点源污染估算[J]. 资源科学, 2011, **33**(2): 242-248.
Zhang M, Liu Q S, Liu G H. Investigating non-point source pollution in the western region of Anji county, Zhejiang province[J]. Resources Science, 2011, **33**(2): 242-248.

[15] 马亚丽, 王兴繁. 基于改进的输出系数模型龙溪河流域氮磷负荷评估[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(31): 70-77.
Ma Y L, Wang X F. Evaluation of nitrogen and phosphorus load of Longxi River basin based on the improved export coefficient model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(31): 70-77.

[16] 徐立红, 陈成广, 胡保卫, 等. 基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(16): 159-166.
Xu L H, Chen C G, Hu B W, *et al*. Improvement of export coefficient model for N and P based on rainfall intensity and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(16): 159-166.

[17] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 77-88.
Chen X K, Liu X B, Peng W Q, *et al*. Estimation of and control strategies for pollution loads from non-point sources in the Chenghai watershed[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 77-88.

[18] 张汪寿, 李晓秀, 王晓燕, 等. 北运河下游灌区不同土地利用方式非点源氮素输出规律[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2698-2706.
Zhang W S, Li X X, Wang X Y, *et al*. Dissolved nitrogen runoff from different land use types in the downstream irrigation area of the Beiyunhe River basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(12): 2698-2706.

[19] 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 等. 水稻田非点源污染原位试验研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1145-1152.
Zhou J W, Su B L, Huang N B, *et al*. In situ experiment on non-point source pollution in paddy fields[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1145-1152.

[20] 廖雅, 苏保林, 豆俊峰, 等. 多径流出口水稻田非点源污染试验研究及验证[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(11): 2484-2492.
Liao Y, Su B L, Dou J F, *et al*. Experimental study and verification of non-point source pollution from paddy fields with multiple runoff outlets[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(11): 2484-2492.

[21] Wang Y X, Liu G H, Zhao Z H, *et al*. Using soil erosion to locate nonpoint source pollution risks in coastal zones: a case study in the Yellow River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117117.

[22] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, **48**(18): 8-10.
The second national pollution source census bulletin[J]. Environmental Protection, 2020, **48**(18): 8-10.

[23] 贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 基于"源-汇"理论的资江下游地区非点源污染风险区划[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(10): 3518-3528.
Jia Y X, Shuai H, Han L F. Zonation on non-point source pollution risk in the lower reaches of Zijiang River based on the "source-sink" theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(10): 3518-3528.

[24] Jiang M Z, Chen H Y, Chen Q H. A method to analyze "source-sink" structure of non-point source pollution based on remote sensing technology[J]. Environmental Pollution, 2013, **182**: 135-140.

[25] 刘鹏, 张紫霞, 王妍, 等. 普者黑流域土地利用及"源-汇"景观的氮磷输出响应研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(6): 1332-1341.
Liu P, Zhang Z X, Wang Y, *et al*. Effect of land use and the source-sink landscape on nitrogen and phosphorus export in the Puzhehei water-shed[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(6): 1332-1341.

[26] 胡文慧, 李光永, 郭亚洁, 等. 汾河灌区农业面源污染经验统计模型的构建与验证[J]. 中国农业大学学报, 2015, **20**

(2)：207-215.
Hu W H, Li G Y, Guo Y J, *et al*. Construction and verification of an empirical model for agricultural nonpoint source pollution in the Fenhe irrigation district[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, **20**(2)：207-215.

[27] 梁常德, 龙天渝, 李继承, 等. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1)：26-30.
Liang C D, Long T Y, Li J C, *et al*. Importation loads of non-point source nitrogen and phosphorus in the three gorges reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, **16**(1)：26-30.

[28] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, *et al*. Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, **37**(5)：1169-1188.

[29] 邹俏俏. 辽宁省水稻灌溉制度分析[J]. 东北水利水电, 2013, **31**(5)：55-56.
Zou Q Q. Analysis of rice irrigation system in Liaoning province [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2013, **31**(5)：55-56.

[30] 向镜, 张义凯, 朱德峰, 等. 盐碱地耕作和洗盐方式对水稻生长及产量的影响[J]. 中国稻米, 2018, **24**(4)：68-71.
Xiang J, Zhang Y K, Zhu D F, *et al*. Effects of tillage and salt washing on growth and yield of rice in saline-alkali soil[J]. China Rice, 2018, **24**(4)：68-71.

[31] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments [J]. Hydrological Processes, 1997, **11**(3)：269-286.

[32] Shrestha S, Kazama F, Newham L T H. A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, **23**(2)：182-194.

[33] Shrestha S, Kazama F, Newham L T H, *et al*. Catchment scale modelling of point source and non-point source pollution loads using pollutant export coefficients determined from long-term in-stream monitoring data [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008, **2**(3)：134-147.

[34] 周跃龙, 汪怀建, 余辉, 等. 应用输出系数模型对太湖流域面源污染负荷测算研究[J]. 江西农业大学学报, 2014, **36**(3)：678-683.
Zhou Y L, Wang H J, Yu H, *et al*. Estimation of nutrient export loads in Taihu Lake watershed based on the export coefficient model[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, **36**(3)：678-683.

[35] 应兰兰, 侯西勇, 路晓, 等. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报, 2010, **21**(6)：90-95, 99.
Ying L L, Hou X Y, Lu X, *et al*. Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, **21**(6)：90-95, 99.

[36] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, **42**(5)：534-538.
Ding X W, Liu R M, Shen Z Y. Method for obtaining parameters of export coefficient model using hydrology and water quality data and its application[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2006, **42**(5)：534-538.

[37] 方怒放, 史志华, 李璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(4)：7-12.
Fang N F, Shi Z H, Li L. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in Danjiangkou Reservoir area[J]. Journal of Hydroecology, 2011, **32**(4)：7-12.

[38] 李怀恩, 庄咏涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. 西安理工大学学报, 2003, **19**(4)：307-312.
Li H E, Zhuang Y T. The export coefficient modeling approach for load prediction of nutrient from nonpoint source and its application[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2003, **19**(4)：307-312.

[39] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, (7)：40-45.
Cai M, Li H E, Zhuang Y T, *et al*. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (7)：40-45.

[40] 杜娟, 李怀恩, 李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西沣河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(4)：827-837.
Du J, Li H E, Li J K. Analysis on export coefficients based on measured data and study on the sources of non-point load for Fenghe River watershed in Shaanxi province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(4)：827-837.

[41] 程静, 贾天下, 欧阳威. 基于 STELLA 和输出系数法的流域非点源负荷预测及污染控制措施[J]. 水资源保护, 2017, **33**(3)：74-81.
Cheng J, Jia T X, Ouyang W. Prediction of non-point source load based on STELLA and export coefficient method and prevention measures[J]. Water Resources Protection, 2017, **33**(3)：74-81.

[42] 张爱平. 宁夏引黄灌区农业非点源污染评价[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(1)：156-163.
Zhang A P. An assessment of agricultural non-point source pollution in Ningxia irrigation region, northwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(1)：156-163.

[43] 张立坤, 香宝, 胡钰, 等. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1)：148-154.
Zhang L K, Xiang B, Hu Y, *et al*. Risk assessment of non-point source pollution in Hulan River basin using an output coefficient model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1)：148-154.

[44] 王有霄, 钟萍丽, 于格, 等. 胶州湾氮、磷非点源污染负荷估算及时空分析[J]. 中国海洋大学学报, 2019, **49**(2)：85-97.
Wang Y X, Zhong P L, Yu G, *et al*. Estimation of N, P non-point source pollution loads and analysis of spatial and temporal characteristies in the Jiaozhou Bay [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, **49**(2)：85-97.

[45] Liu G W C, Chen L, Wei G Y, *et al*. New framework for optimizing best management practices at multiple scales [J]. Journal of Hydrology, 2019, **578**, doi：10. 1016/j. jhydrol. 2019. 124133.

[46] 徐华山, 徐宗学, 刘品. 漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选[J]. 环境科学, 2013, **34**(3)：882-891.
Xu H S, Xu Z X, Liu P. Estimation of nonpoint source pollutant loads and optimization of the best management practices (BMPs) in the Zhangweinan River basin [J]. Environmental Science, 2013, **34**(3)：882-891.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 8

Aug. 15, 2022

CONTENTS

Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games ····· LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, *et al.* (3895)

Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area ····· HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, *et al.* (3903)

Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy $PM_{2.5}$ Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin ····· WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, *et al.* (3913)

Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan ····· FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, *et al.* (3923)

Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer ····· QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, *et al.* (3934)

Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian ····· ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, *et al.* (3944)

One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities ····· LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, *et al.* (3953)

Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, *et al.* (3966)

Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020 ····· WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, *et al.* (3977)

Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry ····· YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, *et al.* (3990)

Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin ····· HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, *et al.* (3998)

Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model ····· PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, *et al.* (4008)

Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs: A Case Study of Liangtan River in Chongqing ····· WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, *et al.* (4018)

Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss ····· WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, *et al.* (4032)

Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley ····· LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, *et al.* (4042)

Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology ····· ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, *et al.* (4054)

Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province ····· LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, *et al.* (4064)

Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin ····· WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, *et al.* (4074)

Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia ····· LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, *et al.* (4087)

Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River ····· YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, *et al.* (4097)

Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake ····· DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, *et al.* (4108)

Emission of Nitrous Oxide (N_2O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors ····· LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, *et al.* (4118)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities ····· LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, *et al.* (4127)

Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater ····· HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, *et al.* (4136)

Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe^{2+}/PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions ····· LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, *et al.* (4146)

Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shaya County, Xinjiang ····· XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, *et al.* (4154)

Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia ····· SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, *et al.* (4166)

Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia ····· WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, *et al.* (4179)

Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale ····· WANG Rui, YU Jing, LI Yu, *et al.* (4190)

Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province ····· YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, *et al.* (4199)

Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model ····· YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, *et al.* (4212)

Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou ····· ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, *et al.* (4219)

Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties ····· REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, *et al.* (4232)

Remediation Potential of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil ····· ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, *et al.* (4253)

Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals ····· ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, *et al.* (4262)

Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application ····· PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, *et al.* (4271)

Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice ····· YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, *et al.* (4282)

Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using *Xanthium sibiricum* ····· ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, *et al.* (4292)

Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity ····· LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, *et al.* (4301)

Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice ····· ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, *et al.* (4313)

Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions ····· FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, *et al.* (4322)

High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function ····· PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, *et al.* (4333)

Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors ····· CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, *et al.* (4342)

Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field ····· LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, *et al.* (4353)

Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain ····· LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, *et al.* (4364)

Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon ····· LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, *et al.* (4372)

Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N_2O Emission in Guanzhong Plain ····· BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, *et al.* (4379)

Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of *Allium sativum* L. ····· QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, *et al.* (4387)

Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation ····· WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, *et al.* (4394)

Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems ····· CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, *et al.* (4402)