

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435)	
《环境科学》征稿简则 (4445)	
信息 (4606, 4625, 4732)	

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响

高晓曦¹, 左德鹏^{1*}, 马广文², 徐宗学¹, 胡小红¹, 李佩君¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 针对地形起伏和降水空间差异较大的农业区非点源污染问题, 基于 SWAT 模型评估了阿什河流域在异质性降水和均匀降水两种情景下总氮、总磷关键源区空间变化规律, 统计了两种情景下识别的关键源区面积变化, 并分析其与降水特征参数的关系。结果表明, 降水量一定时, 两种情景下识别的总氮、总磷关键源区面积变化趋势大致相同, 且总磷关键源区面积不易受降水空间异质性的影响, 但总氮关键源区面积却明显受到其影响。对各年份总氮和总磷关键源区面积与降水特征参数的相关分析表明, 总磷关键源区面积与当年降水量呈显著正相关, 而总氮关键源区面积却与前一年降水量呈显著正相关。研究结果对进一步探讨降水这一重要驱动因子的不确定性对非点源污染关键源区的影响, 以及农业非点源污染的治理具有重要意义。

关键词: 非点源污染; 关键源区 (CSAs); 降水空间异质性; SWAT 模型; 总氮 (TN); 总磷 (TP)

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4564-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202002036

Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution

GAO Xiao-xi¹, ZUO De-peng^{1*}, MA Guang-wen², XU Zong-xue¹, HU Xiao-hong¹, LI Pei-jun¹

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Environment Protection Key Laboratory of Environmental Monitoring Quality Control, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: Aiming at non-point sources pollution in the agricultural areas with large topographic fluctuations and spatial differences in precipitation, a SWAT model was used to evaluate the spatial variations in the critical source areas (CSAs) of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) under two precipitation scenarios, i. e., heterogeneous precipitation and uniform precipitation. A change in the CSAs identified based on the two precipitation scenarios during the study period were statistically calculated, and the relationship between the CSAs and precipitation variables was discussed. The study results showed that when the total precipitation was the same, the variation tendency of the identified CSAs for TN and TP under the two precipitation scenarios were similar, and very close for a few years. According to the results of the pair *t* test, the CSAs of TP were not affected by the spatial variation of precipitation, while the change in CSAs for TN was more significant under different precipitation scenarios, which is likely due to the difference in the physical properties of nitrogen and phosphorus. The correlation analysis between the CSAs of TN and TP with precipitation variables showed that the variation in the CSAs of TP was positively correlated with the precipitation variables in the same year, while the variation in the CSAs of TN was strongly related to the precipitation variables of the previous year. The results obtained in this study are of great significance for further exploring the impact of uncertainty of precipitation, which is an important driving factor, on the CSAs of non-point sources pollution and the governance of agricultural non-point sources pollution.

Key words: non-point sources pollution; critical source areas (CSAs); spatial heterogeneity of precipitation; SWAT model; total nitrogen (TN); total phosphorus (TP)

近年来, 河流环境问题日益突出, 河流监测断面水质超标问题屡见不鲜。点源污染无疑是其中一个重要影响因素, 但随着点源污染的逐步控制, 非点源污染引发的环境问题逐渐凸显。在非点源污染输出比重较大区域, 仅通过点源排放控制无法从根本上达到水质改善目标^[1]。据估计, 全世界有 30%~50% 的地表已受到非点源污染影响, 其中农业活动是造成全球非点源污染的主要原因^[2]。然而, 由于非点源污染具有分布广、随机性和模糊性等特点, 导致其治理区域难以确定^[3-5]。而在实际治理中, 限于人力和财力资源, 不可能进行大范围治理, 因此需要对危害性最大而范围相对较小的区域优先重点治理^[6]。因此, 准确识别非点源关键源区对非点源污染控制及提高非点

源污染治理效率具有重要意义^[7,8]。

非点源污染的产生实际上受地形^[9]、土壤^[10]、土地利用^[11,12]、降雨和土地管理方式^[13]等多种因素影响, 而降雨作为非点源污染发生的驱动力, 无疑是最重要因素之一^[14]。但与其它因素相比, 降雨具有时空分布不均且不确定性较大的特点^[15-17]。因此, 基于降水驱动而识别的关键源区很可能受到降水时段的限制而导致识别出的关键源区并不准确。在降

收稿日期: 2020-02-06; 修订日期: 2020-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502703); 北京市自然科学基金项目(8202030); 国家自然科学基金项目(31400449)

作者简介: 高晓曦(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水文过程模拟, E-mail: xxgao@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

水对关键源区影响方面,苏保林等^[18]采用丰、平、枯年份流域平均降水来探究不同水平年污染物的流失潜力;Huang 等^[19]基于 SWAT 模型在 HRUs 尺度上通过分析污染输出负荷与降水的相关性来识别污染源关键源区.陈洁等^[20]探究了不同降水强度下太湖河网区河道入湖负荷特征变化以及降水强度可能对太湖面源污染产生的影响.虽然降水空间分布不均对非点源关键源区的识别会产生一定的影响,但目前却少有相关研究.

本文针对降水空间异质性对非点源污染关键源区识别的影响,以位于黑龙江省的阿什河流域为研究区,从降水空间异质性对关键源区识别面积影响的角度,探究流域非点源污染关键源区在均匀降水和异质性降水条件下不同年份的面积变化,并分析关键源区面积与降水量的相关关系,以期为流域非点源污染控制和治理提供指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿什河流域位于黑龙江省南部(图 1),属松花江右岸一级支流(126°40′20″~127°43′33″E, 45°05′30″~45°50′28″N),干流全长 213 km,流域总面积 3 581 km²^[21].流域上游东南部主要为山区,中下游为丘陵和平原.土壤类型以暗棕壤、黑土和草甸土为主,其中暗棕壤主要分布在流域上游,黑土分布在流域下游,草甸土自上游至下游沿河道两侧分布.流域属温带、中温带大陆性季风气候,冬长夏短,多年平均降水量 400~750 mm,年内降水分布不均,主要集中在 6~9 月,该时段降水量可占全年降水量的 65%~70%^[22].流域上游为林区,植被覆盖良好,中下游为农业区,主要作物为水稻、玉米和大豆.阿什河流域作为我国重要粮食生产基地之一,近年来受工业废水、沿岸村镇生活污水及农业面源污染的影响,水体污染严重,河段多为劣 V 类水质,已被国家列入水质较差的支流^[23].

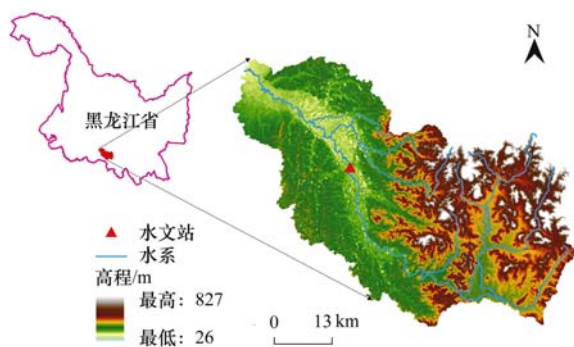


图 1 阿什河流域地理位置示意

Fig. 1 Location of the Ashi River basin

1.2 数据来源

本研究使用的流域数字高程数据来源于地理空间数据云,空间分辨率 30 m;土地利用栅格数据、土壤类型矢量数据以及河网矢量图由中国科学院资源环境科学数据中心提供,数据分辨率分别为 1:10 万、1:100 万和 1:25 万;气象数据采用由寒区旱区科学数据中心提供的 SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(CMADS V1.0)^[24~26],选取流域内 4 个气象格点 2008~2015 年逐日气象要素(包括降水、气温、风速和相对湿度);水文及水质监测数据分别来源于阿城水文站和哈尔滨市环境监测中心,时间长度为 2008~2015 年.研究区农业化肥施用量根据哈尔滨市统计年鉴及实际情况得到.由于阿什河产沙量较低,该流域没有泥沙监测,因此本研究不进行泥沙参数校准.选取的水质指标总氮总磷只有 8 个月的例行监测,监测时间为 1 月、2 月及 5~10 月.

1.3 数据处理

1.3.1 SWAT 模型

SWAT(soil and water assessment tool)是由美国农业部农业研究中心开发的流域尺度模型^[27],用于模拟水量和水质,预测土地管理措施对具有不同土壤类型、土地利用和管理条件下的大面积复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质输出的影响^[28].SWAT 模型根据流域数字高程数据和实际水系将流域划分为若干子流域,在此基础上结合土地利用、土壤类型和坡度进一步划分水文响应单元(HRU)^[29].HRU 是水文模拟的基本单位,每个子流域划分的 HRU 是相同的植被类型、土壤、坡度的单一组合,每个子流域可划分为一个或者多个 HRU. SWAT 水文循环的模拟基于水量平衡,其中水量平衡方程如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})_i \quad (1)$$

式中, SW_t 表示土壤最终含水量(mm); SW_0 表示土壤初始含水量(mm); t 表示时间步长(d); R_{day} 表示降水量(mm); Q_{surf} 表示地表径流(mm); E_a 表示蒸发量(mm); W_{seep} 表示土壤剖面进入包气带的水量(mm); Q_{gw} 表示地下水出水量(mm).

SWAT 模型也可模拟流域内多种形式 N 和 P 的运移和转化.营养物可进入干流河道,或者通过地表径流和壤中流向下游迁移^[30].

1.3.2 模型评价

本文采用 SWAT-CUP 软件对 SWAT 进行参数的率定和验证以评估 SWAT 模型在该流域的适用性.模型模拟期为 2008~2015 年,其中 2008 年为预热期,以减少模型初始条件对模拟结果的影响,

2009 ~ 2013 年为率定期, 2014 ~ 2015 年为验证期. 以纳什效率系数 (NSE) 和判定系数 (R^2) 作为评估模拟结果好坏的指标, 其中 NSE 和 R^2 计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

式中, $Q_{obs,i}$ 和 $Q_{sim,i}$ 分别代表实测序列和模拟序列; $\bar{Q}_{obs}$ 和 $\bar{Q}_{sim}$ 分别表示实测序列均值和模拟序列均值. 理论上, NSE 和 R^2 越接近 1, 拟合效果越好. 一般认为 NSE > 0.6 和 R^2 > 0.6 时, 模拟效果满足精度要求^[31].

1.3.3 正态分布检验

Shapiro-Wilk 检验 (SW 检验), 由 Shapiro-Wilk 在 1965 年提出, 用来检验样本是否符合正态分布. 其优点是计算简单, 不需要大样本数据, 只要样本 $n < 50$ 就能推断总体的正态性. 具体计算时首先需要将样本从小到大顺序排列, 根据 $\alpha_{k,n}$ 系数表查询对应 n 值的 $\alpha_{k,n}$, 统计量 W 的计算公式为:

$$W = \frac{\left[\sum_{k=1}^l a_{k,n} (x_{n+1+k} - x_k) \right]^2}{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (4)$$

当 n 为偶数时, 式中 $l = n/2$; 当 n 为奇数时, $l = (n-1)/2$. 根据统计量 W 的分布, 基于 SPSS 软件, 得到 P_{sw} 值, 设置显著性水平为 0.05, 若 $P_{sw} < 0.05$, 拒绝原假设, 否则, 则认为样本符合正态分布.

1.3.4 均值检验

配对样本 t 检验是单样本 t 检验的特例, 用来判断两配对序列有无明显差异. 具体计算时只需判断配对序列差值的均值是否与 0 有统计上的显著差异. 配对 t 检验统计量计算公式为:

$$\text{统计量} = \frac{\bar{D} - 0}{S/\sqrt{n}} \quad (5)$$

式中, $\bar{D}$ 为差值序列均值; S 为差值序列标准差, n 为对子数. 设置检验水准为 0.05, 根据统计量, 基于 SPSS 软件, 得到 P_t 值, 若 $P_t < 0.05$, 认为前后有明显变化; 否则, 无明显变化.

1.3.5 情景假设

基于 SWAT 模型, 将流域实际降水格点和人为设置的均匀降水作为气象驱动数据来对比其非点源

关键源区识别的影响. 本文设定 2 种情景方案, 分别为: ①情景一方案, 采用反映研究区实际降水空间分布的 4 个降水格点数据作为气象驱动要素之一, 得到降水空间分布不均时的关键源区识别结果; ②情景二方案, 以研究区 4 个降水格点数据为基础, 将基于泰森多边形计算的流域平均降水作为模型的气象驱动数据之一, 得到均匀降水下关键源区识别结果.

1.3.6 非点源关键源区定义

非点源关键源区指少部分区域污染物输出占整个区域绝大部分输出量的区域, 该部分区域对受纳水体质量起决定性影响^[32]. 这里采用林晓娟^[17] 识别关键源区的方法, 以 SWAT 最小模拟尺度水文响应单元为例, 即将各水文响应单元单位输出负荷值由大到小排序, 以累积面积百分比为自变量, 累积污染输出量百分比为因变量, 将 50% 作为污染负荷阈值下, 流域对应的区域即为非点源污染关键源区.

2 结果与讨论

2.1 模型校准和验证

根据阿城水文站 2009 ~ 2015 年月径流监测资料, 采用 SUFI2 算法对模型参数进行率定和验证. 径流、总氮和总磷实测值与模拟值对比见图 2. 从中可知, 率定期和验证期月径流和总氮模拟效果优于总磷, 而总磷拟合效果相对较差. 张培培^[33] 研究表明, 模型参数校准与否对关键源区识别影响不大, 只对具体污染物数值有一定影响. 考虑到本文针对的是不同降水情景下关键源区面积变化和分布, 不涉及污染物的量, 因此可根据该校准好的模型进行进一步分析.

2.2 阿什河流域降水空间变化特征

根据阿什河流域内 4 个气象格点 2008 ~ 2015 年日尺度降水统计得到该流域多年平均降水量在 381.0 ~ 490.4 mm 之间, 其中汛期降水 (6 ~ 8 月) 占全年降水的 51.3% ~ 71.3%. 基于流域内气象格点分布, 采用克里格插值得到流域多年平均降水量空间分布, 如图 3 所示. 从中可知, 阿什河流域上游降水普遍偏高, 且存在局部降水较高区域, 而流域下游降水量较上游偏低, 整个流域降水量呈自东南向西北逐渐递减趋势. 产生该现象的原因极有可能与地形有关, 流域上游地形较高, 且为迎风坡, 受东南季风影响, 使得降水偏高; 而输送到流域西北部的水汽因受地形阻隔, 相对较少, 导致降水偏低.

各气象格点逐年降水量分布情况如图 4 所示, 其展示了阿什河流域降水空间变异程度. 从各年平均降水量变化趋势上来看, 2012 年后降水量明显高于 2012 年以前, 流域降水量呈增长趋势. 从各年降

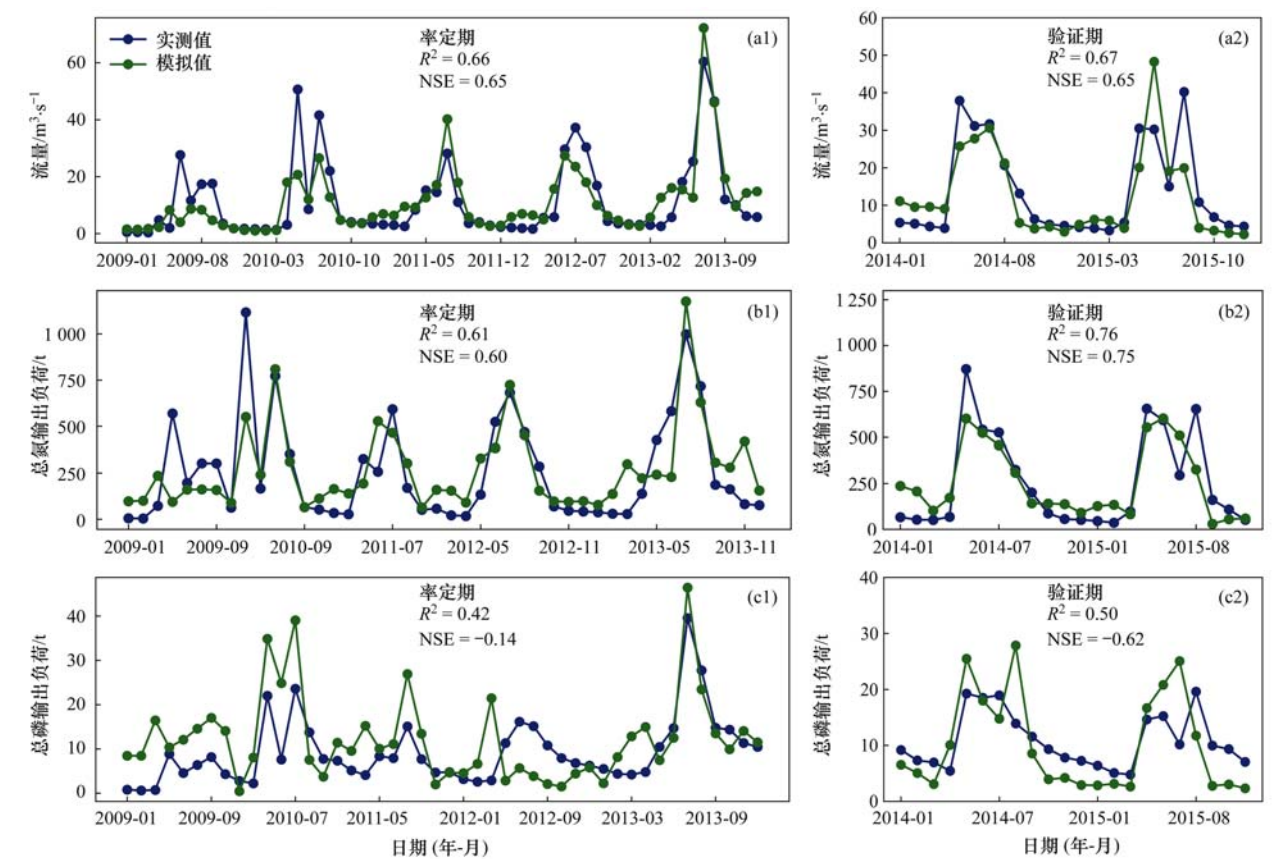


图2 阿什河流域径流、总氮和总磷模拟与实测值过程对比

Fig. 2 Fitting results of simulated and measured values for flow, TN, and TP in the Ashi River basin

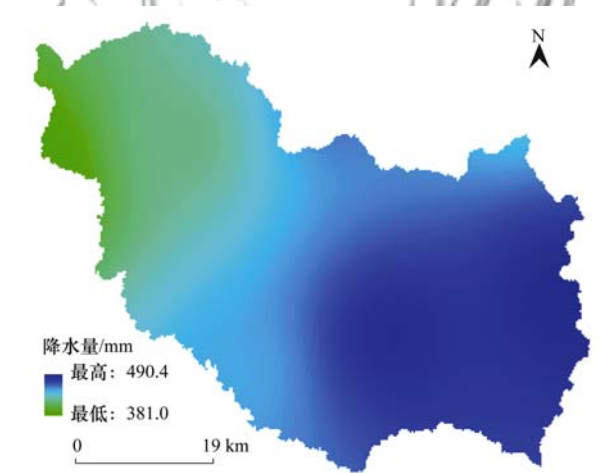


图3 阿什河流域多年平均降水空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean annual precipitation in the Ashi River basin

水量箱体长度来看,2014 年箱体较长,说明该年降水空间差异变化较大;2011、2012、2013 和 2016 年降水量箱体较短,说明降水空间差异较小,但 2011 年和 2016 年的离群值表明该年份存在局部降水异常的现象。

2.3 降水空间异质性对非点源污染关键源区面积的影响

为探究降水空间异质性对非点源关键源区识别

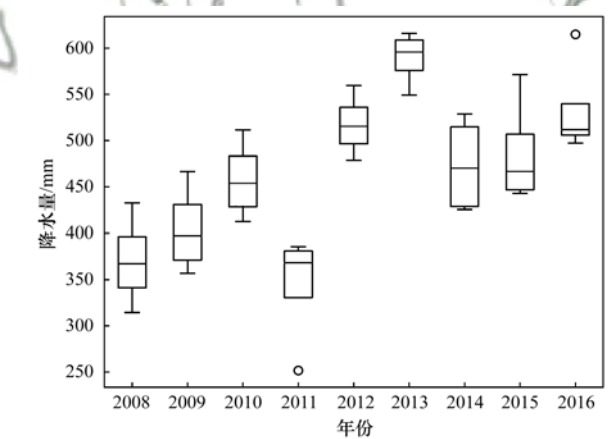


图4 阿什河流域逐年降水量变化

Fig. 4 Annual precipitation change in the Ashi River basin

面积的影响,对情景一和情景二识别出的氮磷非点源关键源区面积进行对比,结果如图 5 所示.从中可知,不同情景下总氮和总磷识别的关键源区面积变化趋势相似,其中总磷关键源区面积在部分年份几乎相等.为分析两种情景下关键源区面积大小是否具有统计上的显著差异,采用配对 t 检验进行差异检验.由于配对 t 检验要求用于检验的两序列的差值须服从正态分布,因此首先进行相关序列的正态性检验.由于时间序列较短,所以采用 SW 检验,计算结果如表 1 所示。

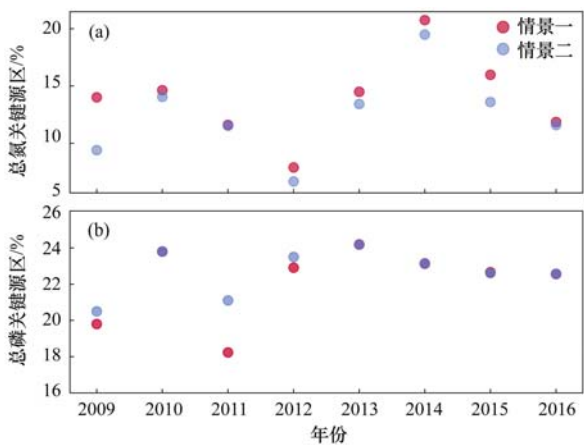


图5 实际降水和均匀降水条件下关键源区面积变化

Fig. 5 Changes in CSAs under heterogeneous precipitation and uniform precipitation

表1 Shapiro-Wilk 正态分布检验结果

Table 1 Normal distribution test of Shapiro-Wilk

关键源区类型	W	P_{sw}
总氮面积	0.083	0.057
总磷面积	1.447	0.191

由表1 检验结果可知, P_{sw} 值均大于置信度 0.05, 可认为总氮和总磷关键源区面积在两种情景下的差值符合正态分布. 在此基础上, 可使用配对 t 检验来判断两种情景下关键源区面积差异变化, 相关检验结果如表2 所示. 从中可知, 总氮关键源区的 P_t 值小于置信度 0.05, 表明总氮关键源区前后面积有明显变化; 而总磷关键源区面积前后变化 P_t 值大于置信度 0.05, 表明前后无明显变化. 也就是说, 在降水量一定时, 降水空间异质性对总磷关键源区识别的面积大小无明显影响, 却会对总氮关键源区的面积产生显著影响.

产生该结果的原因与氮磷理化性质的不同有

关. 磷素易附着于泥沙等颗粒物的表面(或内部)或与颗粒体中一些成分发生黏合作用形成颗粒态磷而被土壤固定, 导致磷素在进入土壤后, 较难溶解, 且溶解的磷也易被土壤吸附, 使得磷很难在土壤中移动, 而氮素易被淋洗而被径流携带流失^[34~36]. 流域上游主要为林地, 土壤本身氮磷含量较少; 而流域中下游主要为农业区, 农业生产活动大量使用的化学肥料决定了这部分区域为污染物主要产生地. 由于氮素极易受降水影响, 因此在流域降水量一定时, 对于均匀降水, 影响关键源区识别的因素主要与土壤类型和土地利用有关; 而对于异质性降水, 降水空间不均本身就是关键源区识别的一个重要因素, 因此异质性降水的不确定因素更大, 所以两种情景下总氮关键源区面积变化有明显差异. 而对于磷元素, 虽然降水空间异质性是影响其关键源区识别的因素, 但磷的吸附性决定了其“流动性”远不如氮元素, 而研究区土壤侵蚀较低, 所以吸附态流失的磷素很少, 因此总磷关键源区识别面积变化前后较为稳定.

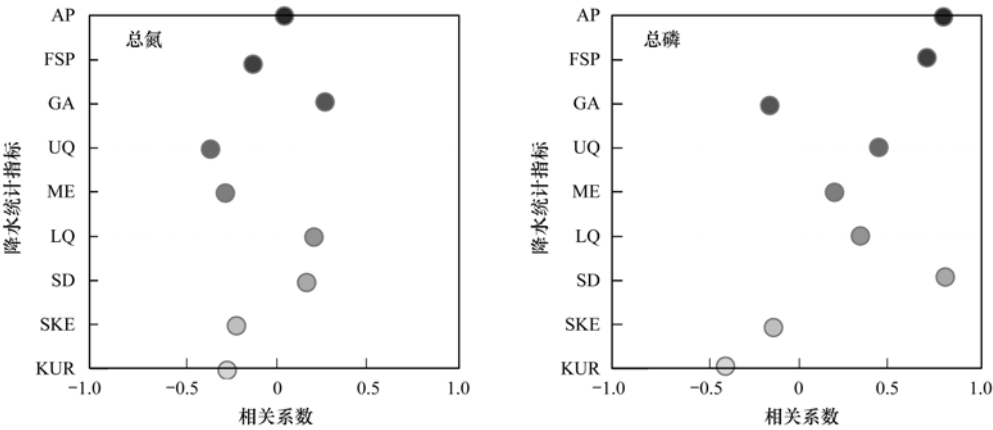
表2 配对 t 检验检验结果

Table 2 Results of pair t test

关键源区类型	统计量	P_t
氮关键源区	2.747	0.029
磷关键源区	-1.447	0.191

2.4 非点源污染关键源区面积与降水特征参数的关系

由于关键源区面积随各年降水量的不同而波动变化, 为探究关键源区面积与降水间的关系, 选取表征年降水时间序列分布特征的 9 个参数: 降水总量、汛期降水量、几何均值、上四分位数、中位数、下四分位数、标准差、偏度和峰度(如图6), 来分析其与关



AP 表示流域年降水量; FSP 表示流域汛期降水量; GA 表示几何均值; UQ 表示上四分位数; ME 表示中位数; LQ 表示下四分位数; SD 表示方差; SKE 表示偏度; KUR 表示峰度, 下同

图6 关键源区识别面积与当年降水特征参数的相关关系

Fig. 6 Correlation between the identification area of CSAs and the characteristic parameters of precipitation

键源区面积大小的关系,相关分析结果见图 6。从中可知,各年总氮关键源区面积与该年降水特征参数均无明显相关性,而总磷关键源区却与流域汛期降水量、流域年降水量以及降水序列标准差显示出很强相关性。

考虑到磷的吸附性,进一步分析各年总氮和总

磷关键源区识别面积与上一年降水特征参数的关系,结果如图 7 所示。从中可知,总氮关键源区与上一年降水总量、汛期降水量和标准差显示出极强的相关性,表明总氮关键源区识别与上一年降水量大小有直接关系,而总磷关键源区面积只与当年降水量有关。

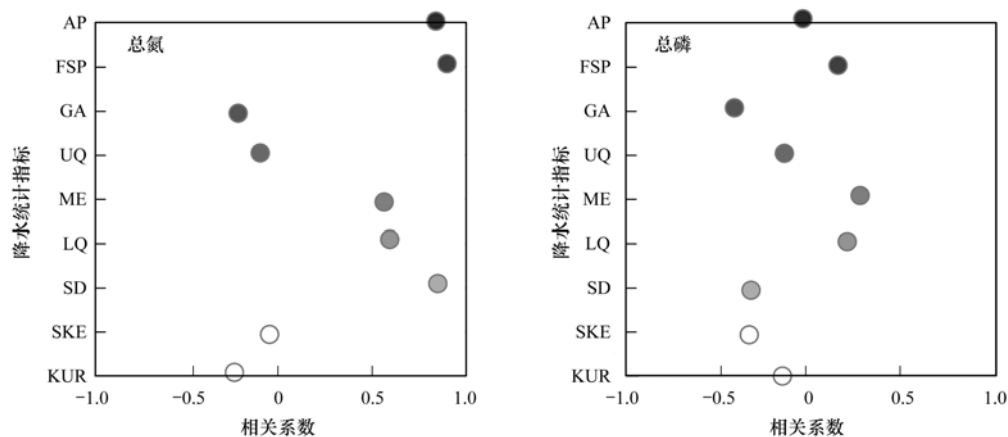


图 7 关键源区识别面积与上一年降水特征参数的相关关系

Fig. 7 Correlation between the identification area of CSAs and the characteristic parameters of last year precipitation

产生该现象的原因仍与氮素和磷素自身性质的差异有关。产生的原因可能有两个,一是降水对地表的冲刷作用。降水对地表的冲刷导致营养物流失,且降水量越大损失越明显,因此对于受降水影响较大的氮素来说,降水之后各区域污染负荷差距以及空间变异性降低,而对于吸附性较强的磷素而言影响却相对较小,所以前一年降水量越大,来年各子流域总氮负荷差异越小,导致该年总氮污染负荷累积曲线变化速度较上一年变缓,因此在 50% 污染累积输出阈值下该年识别的总氮关键源区面积较大。二是与区域至河流的距离有关。农业非点源污染物在随径流迁移过程中,可通过下渗、填洼、生化反应等多种机制被截留和削减,且迁移路径越长,其被削减可能性越大^[37]。当降水较大时,径流携带营养物迁移和转化得越多,一部分随径流进入河道,引起水质变化,另一部分则被截留,其截留分布区很可能在河流附近,因此在次年降水作用下,上一年截留的营养物极易进入河流,导致河流营养物浓度升高,而采用 SWAT 模拟时,该部分污染物残留区产生的污染会被认为是该区域所属的水文单元产生的,因此导致该年关键源区识别面积偏大。

3 结论

(1) 阿什河流域多年平均降水呈从流域东南向西北递减趋势,流域降水空间分布变化很大程度上受地形起伏影响。

(2) 由于氮磷理化性质的不同,在降水量一定

时,总磷关键源区识别面积大小不受降水空间异质性的影响,总氮关键源区面积变化却明显受到降水空间分布不均的影响。

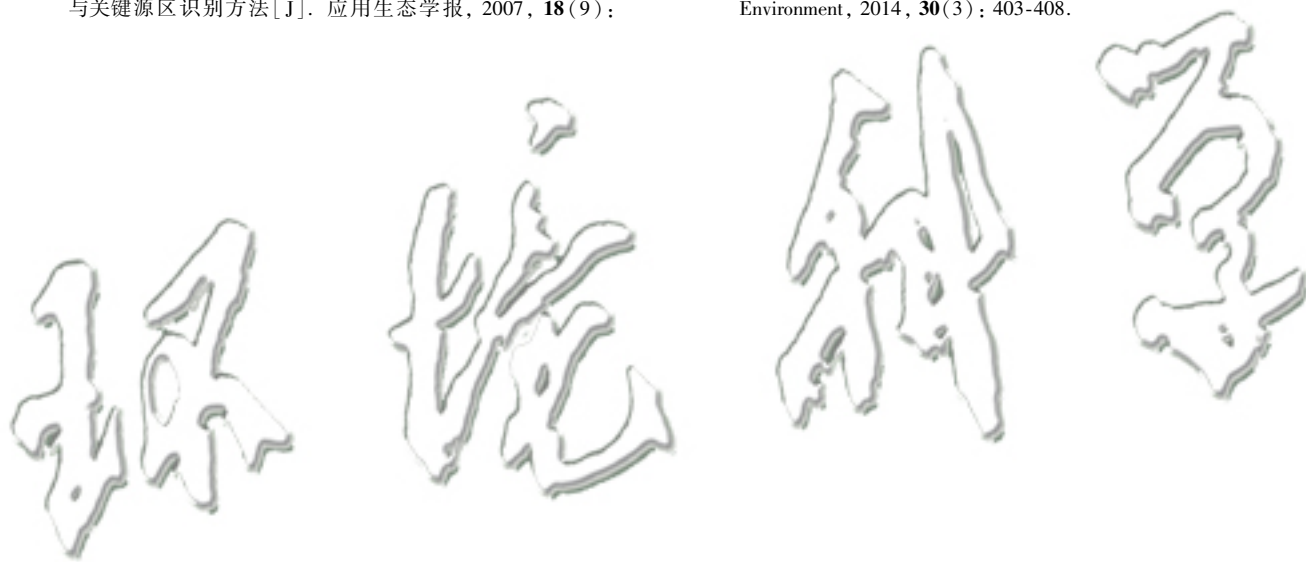
(3) 非点源关键源区识别面积大小与降水量呈显著正相关,其中总磷关键源区面积与当年降水量显著相关,而总氮关键源区面积却与上一年降水量呈显著性相关。

参考文献:

- [1] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明, 等. 基于 GIS 和 USLE 的非点源污染关键区识别[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 170-174.
Pang J P, Xu Z X, Liu C M, et al. Identification of critical nonpoint pollution source areas based on GIS and USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 170-174.
- [2] Pimentel D. World soil erosion and conservation [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [3] 黄宁, 王红映, 吝涛, 等. 基于“源-汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架——以厦门市马銮湾流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3325-3334.
Huang N, Wang H Y, Lin T, et al. Regulation framework of watershed landscape pattern for non-point source pollution control based on ‘source-sink’ theory: a case study in the watershed of Maluan Bay, Xiamen City, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3325-3334.
- [4] 李铸衡, 刘森, 李春林, 等. 土地利用变化情景下浑河-太子河流域的非点源污染模拟[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2891-2898.
Li Z H, Liu M, Li C L, et al. Non-point source pollution simulation under land use change scenarios in Hun-Taizi River watershed [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2891-2898.
- [5] 王赵飞, 林晨, 许金朵, 等. 巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间差异及关键影响因子研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 659-670.

- Wang Z F, Lin C, Xu J D, *et al.* Spatial differences in non-point source particle phosphorus loads and critical influence factors in the Chaohu Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 659-670.
- [6] Lee S, Sadeghi A M, McCarty G W, *et al.* Assessing the suitability of the soil vulnerability index (SVI) on identifying croplands vulnerable to nitrogen loss using the SWAT model[J]. *CATENA*, 2018, **167**: 1-12.
- [7] Sharpley A, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(1): 176-181.
- [8] 邓欧平, 孙嗣阳, 吕军. 长乐江流域非点源氮素污染的关键源区识别[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2307-2313.
- Deng O P, Yang S Y, Lü J. Identification of critical non-point source areas of nitrogen in Changle River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2307-2313.
- [9] Liu Y, Gao P, Zhang L Y, *et al.* Spatial heterogeneity distribution of soil total nitrogen and total phosphorus in the Yaoxiang watershed in a hilly area of northern China based on geographic information system and geostatistics[J]. *Ecology & Evolution*, 2016, **6**(19): 6807-6816.
- [10] He Z L, Wilson M J, Campbell C O, *et al.* Distribution of phosphorus in soil aggregate fractions and its significance with regard to phosphorus transport in agricultural runoff[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **83**(1-2): 69-84.
- [11] Cheng Y T, Li P, Xu G C, *et al.* Spatial distribution of soil total phosphorus in Yingwugou watershed of the Dan River, China[J]. *CATENA*, 2016, **136**: 175-181.
- [12] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
- Fang N, Lin L L, You Q H, *et al.* Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
- [13] 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1468-1474.
- Wang T, Huang Z L, Zeng L X, *et al.* Effects of fertilization on the nitrogen residual amounts and leaching from citrus orchard soil in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1468-1474.
- [14] 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 等. 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- Li X H, Lei Q L, Zhou J G, *et al.* Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in plateau areas: a case study of the Fengyu River watershed[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- [15] Strauch M, Bernhofer C, Koide S, *et al.* Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **414-415**: 413-424.
- [16] Zhang Q, Peng J T, Singh V P, *et al.* Spatio-temporal variations of precipitation in arid and semiarid regions of China: the Yellow River basin as a case study[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, **114**: 38-49.
- [17] 林晓娟. 岳城水库流域非点源污染研究及关键源区识别新方法探讨[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Lin X J. Study of non-point source pollution in Yuecheng Reservoir basin and a new approach to identify the critical source pollution areas[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [18] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源污染识别[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, **46**(3): 360-365.
- Su B L, Wang J P, Jia H F, *et al.* Identification of non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, **46**(3): 360-365.
- [19] Huang J J, Lin X J, Wang J H, *et al.* The precipitation driven correlation based mapping method (PCM) for identifying the critical source areas of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **524**: 100-110.
- [20] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4924-4931.
- Chen J, Zhu G W, Xu H, *et al.* Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from an inflowing river in the plain river network of the Taihu catchment[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4924-4931.
- [21] 杨洪学. 阿什河流域森林植被水源涵养功能综合评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- Yang H X. The estimate of water conservation function of forests in Ashihe-Drainage Basin[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005.
- [22] 周浩, 雷国平, 冯晓娟, 等. 基于 MUSLE 模型的阿什河流域农业非点源污染风险评估[J]. *农业现代化研究*, 2015, **36**(3): 469-476.
- Zhou H, Lei G P, Feng X J, *et al.* MUSLE-based risk evaluation of agricultural non-point source pollution in the Ash River watershed[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, **36**(3): 469-476.
- [23] 潘世虎. 哈尔滨市阿什河流域综合整治规划[J]. *上海水务*, 2011, **27**(3): 63.
- [24] Meng X Y, Wang H, Lei X H, *et al.* Hydrological modeling in the Manas River basin using soil and water assessment tool driven by CMADS[J]. *Tehnički Vjesnik*, 2017, **24**(2): 525-534.
- [25] 孟现勇, 师春香, 刘时银, 等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用——以黑河流域为例[J]. *人民珠江*, 2016, **37**(7): 1-19.
- Meng X Y, Shi C X, Liu S Y, *et al.* CMADS datasets and its application in watershed hydrological simulation: a case study of the Heihe River basin[J]. *Pearl River*, 2016, **37**(7): 1-19.
- [26] Shi C X, Xie Z H, Qian H, *et al.* China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(9): 1430-1440.
- [27] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Xu Z X. Hydrological models[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [28] 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.
- [29] 吕乐婷, 彭秋志, 郭媛媛, 等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. *自然资源学报*, 2014, **29**(10): 1746-1757.
- Lü L T, Peng Q Z, Guo Y Y, *et al.* Runoff simulation of Dongjiang River basin based on the soil and water assessment tool[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1746-1757.
- [30] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, *et al.* Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. College Station: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [31] 屈吉鸿, 石红旺, 李志岩. 基于 SWAT 模型的青龙河流域气候变化径流响应研究[J]. *水力发电学报*, 2015, **34**(4): 8-15.
- Qu J H, Shi H W, Li Z Y. Runoff responses to climate change in Qinglong River watershed based on SWAT model[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, **34**(4): 8-15.

- [32] 李振伟, 于兴修, 姚孝友, 等. 农业非点源污染关键源区识别方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2907-2914.
- Li Z W, Yu X X, Yao X Y, *et al.* Identification approaches of critical source area of agricultural non-point source pollution: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(12): 2907-2914.
- [33] 张培培, 郑秀苹, 吕红迪, 等. 模型率定前后的大沽河流域关键源区识别[A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第二卷)[C]. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2017. 746-755.
- [34] 李高明, 铁柏清, 李杰峰, 等. 湖南典型土壤类型和耕作方式的氮磷损失特征研究[J]. 湖南农业科学, 2009, (4): 52-54.
- Li G M, Tie B Q, Li J F, *et al.* Study on nitrogen and phosphorus loss character of typical agrotype and cultivation in Hunan[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009, (4): 52-54.
- [35] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 流域尺度农业磷流失危险性评价与关键源区识别方法[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(9): 1982-1986.
- Li Q, Chen L D, Qi X, *et al.* Catchment scale risk assessment and critical source area identification of agricultural phosphorus loss[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, **18**(9): 1982-1986.
- [36] 康智明, 张荣霞, 叶玉珍, 等. 基于 GIS 的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(12): 1887-1897.
- Kang Z M, Zhang R X, Ye Y Z, *et al.* GIS-based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(12): 1887-1897.
- [37] 张丽, 陆海明, 邹鹰, 等. 缺资料小流域非点源磷素输出关键源区识别方法初探[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(3): 403-408.
- Zhang L, Lu H M, Zou Y, *et al.* Method of identifying critical source areas of non-point source phosphorus output in data deficient small watersheds [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(3): 403-408.



CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)