

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.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测

俞映惊¹, 杨林章^{1*}, 李红娜², 朱昌雄², 杨根¹, 薛利红¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 种植业对农业面源污染贡献不容小觑. 已有治理技术并不在少数, 但受技术参数模糊和技术应用效果不明朗等因素的影响, 现阶段技术应用和污染治理效果不理想. 对此, 本研究基于近 20 年国内外种植业面源污染防治的发表论文, 明确种植业面源污染防治技术的体系框架, 梳理技术的发展历程, 比较不同方向技术对生产投入、产量及污染物排放的作用效果, 对新时期下我国种植业面源污染防治的发展前沿趋势作出预测. 本研究构建了源头削减、过程拦截和养分回用这 3 个领域以及栽培、生态沟渠和尾/废水等 14 个方向的技术体系. 结果发现, 源头削减领域获得了最高关注度, 研究方向多且热度仍在不断提升; 我国对其中肥料方向技术的研究集中度较高. 相比之下, 过程拦截和养分回用领域的技术较为单一和欠缺. 养分利用效率提升、转运过程调控和土壤添加剂使用将是种植业面源污染防治未来的主要着力点和抓手. 农田基础设施的配套及后端净化体系的构建, 将有助于集成、耦合多领域技术, 进一步确保种植业面源污染防治的作用效果.

关键词: 种植业; 面源污染; 防控技术; 发展历程; 前沿趋势

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3870-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201911028

Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution

YU Ying-liang¹, YANG Lin-zhang^{1*}, LI Hong-na², ZHU Chang-xiong², YANG Bei¹, XUE Li-hong¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The contribution of crop planting to agricultural non-point source pollution should not be underestimated in China. Although many modern technologies have been developed to prevent non-point source pollution in recent decades, their impacts on pollution control in farmland are far from expectation. The application of technologies for non-point source pollution control for crop farming has been delayed due to unclear technical parameters and application effectiveness. Therefore, based on studies of the non-point source pollution control for crop farming in China and abroad that were published in the last 20 years, the present research was carried out to determine the development process of planting non-point source pollution control technologies and to illuminate the framework construction. The technologies in different fields and directions were compared by their effects on fertilizer input, yield, and pollutant emission. The development trend in the field of prevention and control technologies for planting non-point source pollution was subsequently predicted. In addition, a technical framework was developed with 3 fields (pollutant source reduction, pollutant interception in the migration process, and nutrient recycling) and 14 directions. The analysis showed that the technologies for reducing pollutants from the source have attracted the most (and increasing) concern with many research directions, and that many of the studies in this field have focused on the regulation of fertilizer application. On the contrary, there is a lack of technologies in the fields of pollutant process interception and nutrient recycling. Promoting nutrient-use efficiency, regulating nutrient transformation, and using soil supplements will be the main entry points for non-point source pollution control for crop farming. Furthermore, technologies will operate better with the help of farmland infrastructure and downstream purification systems.

Key words: planting; non-point source pollution; prevention and control technologies; development process; trend

随着我国经济的迅猛发展, 水体污染与湖泊富营养化现象屡屡出现. 第一次全国污染源普查数据显示, 主要污染物排放中, 农业源排放的氮磷分别占到总污染排放量的 57% 和 67%, 远超工业与生活污染源排放, 成为污染源之首. 农业源污染在对河流湖泊水体产生负面影响的同时, 也成为了制约农业可持续发展的重要因素, 更是实现乡村振兴战略道路上不可逾越的屏障. 近年来, 中央 1 号文件多次提及农业面源污染治理, 习总书记更是在“十九大”报告中明确要求加强农业面源污染防治. 这些无不体现

了农业面源污染防治在新时代社会经济发展中的重要地位.

当前, 我国存在农业面源污染风险的农田面积超过 2 000 万 hm^2 ^[1]; 以农田径流形式产生的氮、磷流失, 对河流水体氮、磷含量贡献率分别超过 50%

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2020-02-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07401002); 江苏省农业科技自主创新基金项目 (CX(19)3095)

作者简介: 俞映惊 (1986~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农田养分循环和面源污染, E-mail: yu.colleen@gmail.com

* 通信作者, E-mail: lzyang@issas.ac.cn

和 60%^[2],由此可见,种植业是农业面源污染中不可小觑的一部分^[3,4].另一方面,我国作为农业大国,粮食生产、粮食安全供给是国家战略需求重要部分.这也决定了,种植业面源污染防治不可能一刀切或以牺牲产量为代价.资料显示,化肥对我国农业生产的贡献率达到了 57%^[5],但是,带来的资源环境代价也非常之高^[4,6].自 20 世纪 70 年代至今 10 a,我国粮食总产量增长翻番,氮和磷肥的消费量分别增长了 1.8 和 2.7 倍^[7],过量施肥导致的氮排放量增加了 240%,而磷则以沉积态大量存于土壤,带来了巨大污染隐患^[3,8].如何在保证产出的前提下实现农业面源污染防治是当前我国种植业亟需解决的问题.

为缓解水体污染与湖泊富营养化问题,我国自“十一五”起已启动诸多科研专项,研发并形成了很多面源污染防治技术.然而,相关技术的落地却较为滞后,甚至出现了技术应用断链,导致农业面源污染防治效果不佳的状况.现有技术体系不完整、技术参数模糊、实用性与可操作性不强、技术应用效果不明确是当前技术大面积推广遇到的普遍问题.同时,对技术发展过程与趋势的认识不深、把握不准也是影响技术先进性与实用性的关键.

有不少关于农业面源污染研究发展态势的研究较多依赖于文献计量学手段^[5,9,10],缺少对技术内容和作用参数的解读,指导性不强;或仅立足于技术^[11],缺少大尺度全局视角,无法进行前瞻性预测.对此,本研究以近 20 年国内外种植业面源污染防治领域的发表论文为数据基础,借助文献计量学手段,配合对具体技术内容和参数的梳理,分析种植业面源污染防治技术的热点及其变迁,比较全球和中国相关领域的技术发展历程,明确各领域和方向技术的作用效果,预测种植业面源污染防治技术的前沿趋势,以此推动种植业面源污染防治技术在我国规模化应用.

1 文献调研及信息提取的方法

1.1 数据源

本研究分别对中英文数据进行特征性检索.其中英文文献数据来源于 Web of Science 核心合集中 SCI-E (science citation index expanded) 和 CPCI-s (conference proceedings citation index-science) 两个数据库;中文文献数据来源于中国科学引文数据库 (Chinese science citation database, CSCD),检索时段为 1999 年 1 月 1 日至 2019 年 3 月.因此,统计的 2019 年发文数据不能代表该年全部发文量.

1.2 文献检索

本研究所采用的文献检索基于污染物迁移转化路径,以技术特征为出发点,罗列各分支特征性搜索词,并搭建检索逻辑关系,分别得到:污染物源头削减领域(源头削减)、污染物过程拦截领域(过程拦截)以及养分回用领域(养分回用)检索式(中英文对应)如下.

源头削减领域:TS = [化肥 near/1 (减少 or 减量)] or (化肥 near/2 替代) or 间作 or 缓释肥 or 有机肥 or 畜肥 or 廐肥 or 绿肥 or 饼肥 or 沼肥 or 养分损失 or 养分流失 or 营养损失 or 营养流失 or 硝化 or 反硝化

过程拦截领域:TS = [(土壤 or 废水 or 废液 or 污水) near (氮 or 磷 or 污染物 or 农药) near/2 (拦截 or 阻断 or 切断 or 消减 or 削减 or 消耗 or 消除 or 封闭 or 隔断 or 隔离 or 渗滤 or 渗透 or 过滤 or 平衡)] or 秸秆覆盖 or 植物篱 or 渗滤池 or 渗滤液 or [(氮 or 磷) near/1 转化 or 生态沟渠 or 径流]

养分回用领域:TS = [秸秆还田 or 秸秆归田 or (氮 or 磷 or 污染物 or 农药) near/5 (再利用 or 再回收 or 再循环 or 再生 or 重复利用 or 二次利用)]

检索得到全球尺度种植业面源污染防治技术相关英文论文 (SCI) 21 006 篇和中文论文 (CSCD) 9 717 篇.本次检索所得英文文献中作者地址或通讯地址中包含中国的文献占比 17%.本文将英文文献和中文文献数据分别视为全球和中国尺度的数据来源,分析所得结果分别反映全球和中国尺度的热点和发展趋势.

1.3 信息提取分析

利用 Derwent Data Analyzer (科睿唯安软件, <https://clarivate.com/tw/products/derwent-data-analyzer>) 对搜索出的文献进行文本挖掘,导出相关高频特征词汇.人工筛选各领域关键词(关键词指某一领域中出现频率较高且具有技术识别特征的词语或短语),通过 VOSviewer (基于文献计量关系进行图谱构建工具, <http://www.vosviewer.com>) 对关键词共现矩阵实现聚类,进行各领域技术方向的划分及种植业面源污染防治技术体系的构建.

1.3.1 热点分析

以各领域技术方向的研究发文数量为基础数据,理清其年际变化,以我国 5 年计划为时间切片

(“十一五前”1999~2005年、“十一五”2006~2010年、“十二五”2011~2015年和“十三五”2016年至2019年3月),分析全球和中国尺度在多个时间切片下各技术领域的热点变迁及研究重点的转移,实现全球和中国尺度的技术发展历程的比较。

1.3.2 技术效果分析

从肥料(氮、磷)投入削减比例、产量影响率及污染物(氮、磷)排放削减率这3个方面量化种植业面源污染防治技术的作用效果。在明确技术领域及方向的前提下,人工提取对应论文中摘要部分的有效数据,并实现数据的标准化。氮/磷肥投入削减比例[RIN or RIP,%,式(1)]、产量影响率[YE,%,式(2)]和氮/磷排放削减率[RMN or RMP,%,式(3)]如下:

$$\text{RIN or RIP} = (1 - \text{TIN or TIP} \div \text{CKIN or CKIP}) \times 100\% \quad (1)$$

式中,TIN or TIP指使用技术处理的氮/磷肥投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);CKIN or CKIP指对照处理氮/磷肥投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

$$\text{YE} = (\text{TY} \div \text{CKY} - 1) \times 100\% \quad (2)$$

式中,TY指使用技术处理的单季产出($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);CKY指对照处理单季产出($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

$$\text{RMN or RMP} = (1 - \text{TMN or TMP} \div \text{CKMN or CKMP}) \times 100\% \quad (3)$$

式中,TMN or TMP指使用技术处理的氮/磷肥排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);CKMN or CKMP指对照处理氮/磷肥排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 发展趋势分析

(1) 引用导向趋势

基于被检索出文献的数据挖掘,在确定关键词的基础上,结合Citespace(引文可视化分析软件, <http://cluster.cis.drexel.edu/~cchen/citespace/>)构筑的共被引网络关系,以关键词为输出形式,进行研究前沿的遴选分析,反映引用文献中技术关注点的移动趋势。

(2) 效果导向趋势

比较不同领域及方向的技术作用效果差异,以技术效果为目标,以技术方向为输出形式,用于反映技术方向上的需求趋势,对未来我国可能的技术发展方向进行讨论和预判。

2 结果与讨论

2.1 种植业面源污染防治技术的发展历程

2.1.1 技术体系构建

种植业面源污染具有分散性强、发生过程随机性强和污染物浓度较低等特征^[12],从污染物排

放、迁移、转化过程入手是实现种植业面源污染防治的必然途径。因此,现有技术可由此根据源头削减、过程拦截和养分回用为3个领域。基于文献的关键词聚类,将各领域下的多个技术进行方向分类,最终形成种植业面源污染防治的三级技术体系(表1)。

2.1.2 时间尺度下技术领域关注度的变化

比较近20年各技术领域发文占比发现,源头削减领域技术始终是种植业面源污染防治的重点,发文量占总发文量(SCI+CSCD)的59%~69%;且时间轴上呈持续增长态势[图1(a)]。相比于全球,中国对源头削减领域技术的关注度更高,这充分说明我国“先污染后治理”的观念已有所改变,从污染到治理的曲线拐点提前到来。虽然,“先污染后治理”是经济发展初期环境和发展权衡取舍的必然过程,但利用后发优势,在借鉴汲取发达国家经历的污染教训和成功治理经验后,我国在种植业面源污染防治问题上已意识到源头污染控制将是最为行之有效的手段,并将源头削减领域技术的研发放在了整个污染防治工作的首位。

此外,过程拦截领域中国和全球的发文比例较为接近,处于25%~32%尺度,且时间轴上呈减少趋势[图1(b)]。对于过程拦截领域发文比例的降低,可以从两方面去解释。一方面,污染物的过程拦截往往需要外部沟-渠-塘的配套构建,会一定程度占用现有耕地面积;此外,构建后的定期维护需要额外的经济投入。因此,管理面积较小且经济不宽裕的农业生产者一般不倾向于选择过程拦截领域的技术对污染物进行拦截。另一方面,具有较成熟过程拦截体系的农田系统在国外规模化农场以及中国经济较发达的农村已初具雏形;它的建设往往在农田早期规划、工程实施阶段就有所实现,而后期进行改动、变更、增设的并不多。因此,受限于应用环境和经济基础,对过程拦截领域技术的相关研究发文热度有所减退。

我国对养分回用领域的关注则稍显不足。虽然自“十一五前”到“十三五期间”养分回用领域发文比例有一定幅度增加,但相比全球发文的整体占比还有所欠缺[图1(c)]。作为不同圈层间物质迁移环节,养分回用既能减少农田化肥氮的投入,同时有效削减排入到水环境或者转移到其他圈层的养分,是保证农业生产实现环境保护的关键^[13],更是满足绿色生产和资源最优化利用的有效途径^[14]。

2.1.3 热点变迁

本研究以种植业面源污染控制各技术领域及方向近20年发文量衡量其研究热度,并比较全球和中

表 1 种植业面源污染防控技术体系及各领域方向发文情况¹⁾

Table 1 Framework of prevention and control technologies for planting non-point source pollution and number of associated published papers

技术领域	技术方向	关于技术方向的说明	发文量/篇
源头减排	栽培技术	调整作物种植方法(如特殊品种选育、错窝栽培等)或种植制度调整	全球: 4 278 中国: 783
	肥料技术	以肥料运筹优化为抓手,调控肥料种类(普通化肥、有机肥、缓控释肥等),肥料施用量,肥料施用方法	全球: 474 中国: 668
	添加剂使用	向土壤中添加功能性试剂(如硝化抑制剂、生物炭等),提高养分转运效率,改良土壤环境	全球: 2 965 中国: 476
	灌溉技术	通过改变灌溉供水方式、灌溉时间点、单次灌溉量等,实现节水	全球: 582 中国: 141
	耕作技术	通过改良农田耕作方式,如少耕或翻耕配合泡田等,提高土壤保水保能力	全球: 2 390 中国: 198
	农药减量技术	通过物理阻隔、生物防止或新型农药选用,实现农药减量	全球: 309 中国: 30
过程拦截	生态沟渠	对排水沟渠进行生态化改造,增加其对农田排水中所携带氮磷的吸收、吸附和降解等生态功能	全球: 1 799 中国: 419
	湿地技术	将经过生态沟渠等系统处理的排水引入下游区域的湿地系统,实现排水进一步净化	全球: 200 中国: 85
	植物篱	通过较窄植物带(行)的种植,实现地表径流分散、降速,增加污染物的入渗和拦截量	全球: 698 中国: 83
	渗滤池	放置在农田排水口临近处,通过增加农田排水的水力停留时间,促进颗粒态污染物的沉降;利用填料布设实现对污染物的拦截、过滤和沉淀;并依赖填料表面和内部形成的微生物群落,进一步降解去除污染物	全球: 251 中国: 24
养分回用	秸秆或植物残体还田	前茬作物秸秆或其他作物残体翻耕进土层,经过腐解和养分转运,实现秸秆或残体中养分的再次利用	全球: 435 中国: 1 101
	尾、废水利用	在保证土壤和产品安全的前提下,以一定比例回灌达标排放的生活污水或养殖废水	全球: 69 中国: 1
	粪肥沼液回用	将产生的粪肥和沼液回田,替代部分化肥养分投入	全球: 124 中国: 10
	生物固氮	在农闲期种植豆科植物并及时翻耕还田,通过根瘤菌固定大气氮,增加土壤中的氮库存	全球: 24 中国: 2

1) 单一文献中可能涵盖多个领域或方向的技术,故某一领域不同方向发文数量总和可能大于该领域发文总量

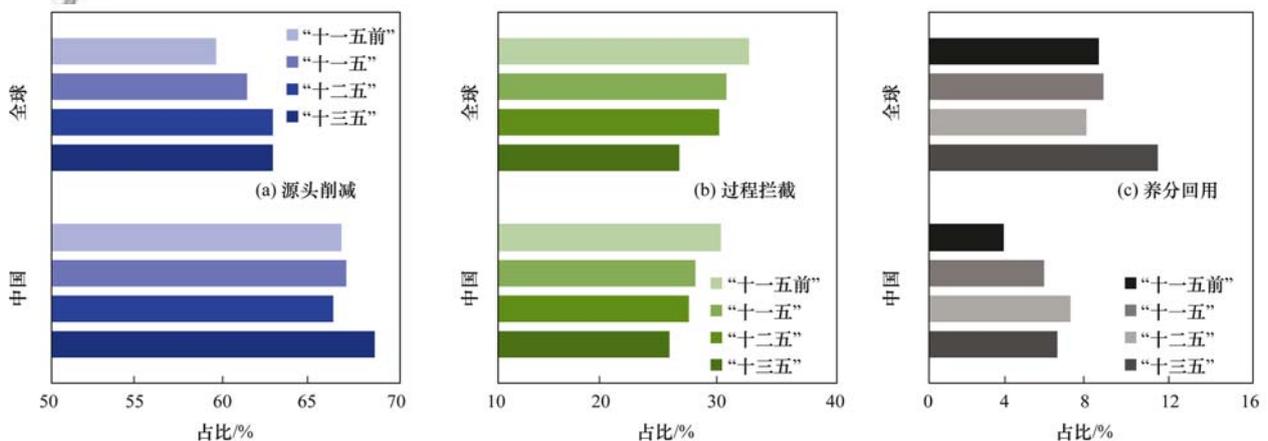


图 1 不同技术领域发文占比变迁

Fig. 1 Variation in the ratio of paper published numbers in different technical fields

国的技术变迁特点. 如图 2 (a) 所示,栽培技术和添加剂使用是全球和中国在源头削减领域集中度较高的方向. 对栽培技术的关注一方面说明,促进作物生长是提高养分利用效率、减少污染排放最为直接的途径;另一方面也说明,面源污染调控要以保证生产为前提. 对添加剂使用的关注则体现了以养分转

运和提升土壤养分库存储为为抓手的调控方法对于种植业面源污染防控的重要性. 以氮为例,不同作物对氮的吸收形态不同,且不同形态氮的面源污染损失途径也各有不同,在不同作物种植环境中为保证作物喜好的氮形态能够较大限度地被利用,使用添加剂可以实现脲酶水解、硝化及反硝化过程的调控,减少

不同途径的氮素损失^[15,16]. 以生物炭为代表的添加剂则通过调节土壤理化性质, 增加土壤持水持肥能力, 减少养分的渗漏损失^[17], 并间接影响养分的转运过程. 在时间轴上, 中国对源头减排领域主要技术方向(栽培、肥料和添加剂)的研究主要兴起于“十一五”期间, 大量发文出现于“十二五”或此后的时段, 且热度持续增加. 对耕作技术的关注度自“十三五”始有降低趋势, 而优化灌溉技术则在“十二五”后不断得到重视.

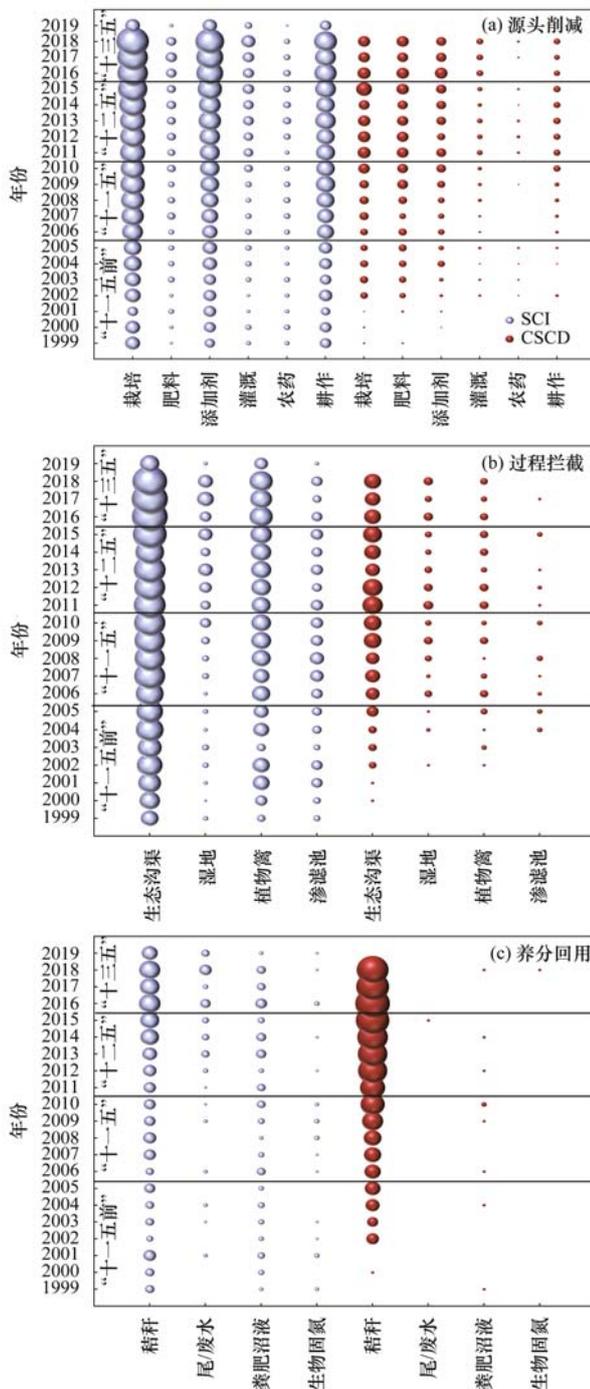


图2 不同技术领域及方向近20年年季发文热度

Fig. 2 Rate of papers published in different technical fields and directions during the last 20 years

生态沟渠是全球和我国在过程拦截领域关注度较高的技术方向[图2(b)]. 此外, 全球尺度对植物篱的关注度也较高. 生态沟渠和植物篱技术主要始于“十一五”期间, 而湿地技术则从“十二五”开始增多.

对养分回用领域的关注度主要集中在秸秆和植物残体回用方向[图2(c)]. 全球尺度对粪肥、沼液的回用也有所关注, 而中国在这一方向发文寥寥. 反观, 中国畜禽养殖行业有关粪肥沼液处理的发文并不在少数, 这说明种-养结合的跨生产模块研究开展不多, 对沿物质链通过有机肥生产并将回用实现在种植业上的连贯研究较为缺乏^[4]. 全球尺度, 对尾/废水回用的关注则主要出现在近5年; 中国则较为滞后.

2.1.4 国内外种植业面源污染防治技术比较

中国对种植业面源污染防治技术的关注略滞后于全球, 但“十一五”起, 不少方向的技术热度应需而涨. 源头削减领域, 全球尺度对耕作技术保持较高关注度, 而我国则十分重视肥料运筹的把控, 这一差异主要源于我国较为破碎化的耕地结构^[18]以及较高的肥料施用现状. 当肥料施用量超过作物所需时, 过量施用的部分有着极高的流失风险, 合理减少肥料施用对于污染物的控制效果十分显著^[19]. 过程拦截领域, 全球尺度对植物篱重视程度较高, 而我国这一方向的研究较为薄弱. 植物篱对污染物的拦截一般用于坡耕地环境. 我国坡耕地的种植多以果树和蔬菜为主, 相对面积较小, 因此对该技术的关注度不如全球占比高, 但近年呈现热度渐增趋势. 养分回用领域, 我国对秸秆和植物残体的回用高度关注, 而其他方向的研究仍处于初级阶段. 不同生产模块间物质流通不畅是我国养分回用领域, 尤其是尾/废水和粪肥沼液回用未受到高度关注的主要原因^[14], 也是未来发展的方向.

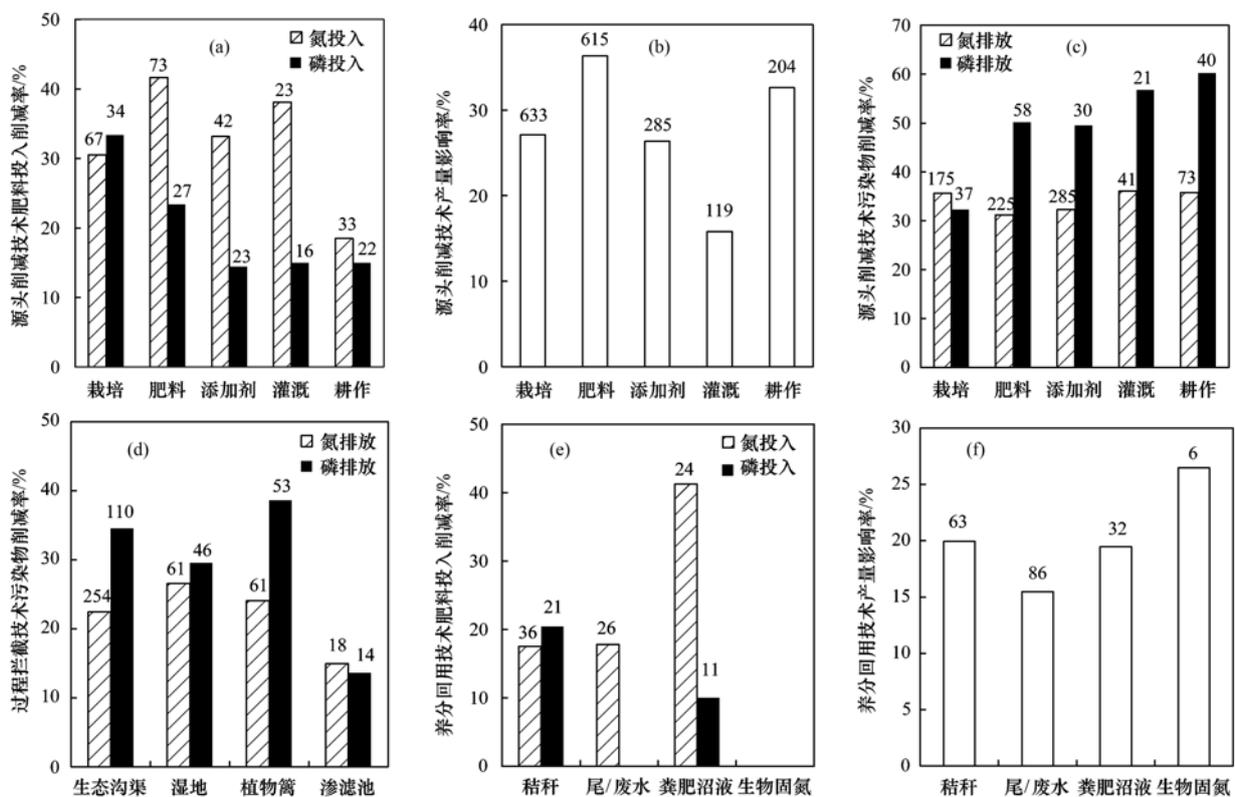
2.2 种植业各领域面源污染防治技术的作用效果

在划分技术领域和方向的基础上, 根据相关发文摘要中的技术效果数据, 比较其作用效果差异. 鉴于养分-污染物迁移变化过程, 对不同领域技术的比较角度选择侧重略有不同(图3).

源头削减领域技术平均削减氮磷肥投入18%~42%和15%~33% [图3(a)], 增加作物产量13%~37% [图3(b)], 减少氮磷排放31%~36%和32%~60% [图3(c)]. 肥料运筹优化、灌溉水分管理、土壤添加剂应用和优化栽培等技术均具有30%以上的氮投入削减效果, 且栽培技术优化对于磷投入的影响显著[图3(a)]. 由于过量施肥可能导致作物减产^[20,21], 肥料运筹优化(含减量)技术对产量

提升效果显著^[4];但由于多数文献数据的时效仅为 1~3 a,不少源头削减技术缺少多年连续使用的相关评估.各技术方向对氮排放的作用效果较为接近,但都达到了 30% 以上的削减效率[图 3 (c)].相比于氮排放,源头削减技术对减少种植业磷排放的效果更为突出.颗粒态磷是种植业农田中磷损失的主要形态^[8,22],因此灌溉水分管理和耕作优化技术的作用效果显著.值得注意的是,多数源头削减技术以氮投入的削减作为主控抓手,而效果上氮排放却不如磷排放的削减显著.这一结果暗示,种植业污染物

中氮素的控制难度较高.这与氮进入农田系统后多个转运形态产物均具有易迁移和易损失的特征有关.对单一转运环节的调控,存在增加反应两侧物质的损失风险^[16].从现有发文看,虽然氮一直是种植业的污染物管控重点,但依旧不能松懈.另一方面,实际生产中投氮是否充足是农户对于总化肥投放量的判定标准,而对施肥行为的磷投入却被一定程度忽视了,造成磷肥施用的两极分化(纯氮肥施用导致磷补给不足,复合肥施用导致磷供给过量)^[8].因此,对磷投入量的管控关注度有待加强.



图中所注数字为对应柱状数据的文献源获取量

图 3 不同领域及方向技术对面源污染防控的作用效果

Fig. 3 Effects of non-point pollution control by technologies in different technical fields and directions

过程拦截领域技术平均减少氮磷排放 15%~40% 和 14%~42% [图 3 (d)].与源头削减领域技术相似,过程拦截领域技术对磷排放的削减效果要优于氮.其中,湿地系统具有最高的氮磷削减比例,均超过 40%.较高的氮磷削减比例与湿地系统的区位密切相关,其一般与植物篱、渗滤池或生态沟渠串联,且位于农田排水下游区,水力停留时间较长,为深层净化水质提供了条件^[23,24].

养分回用技术平均削减氮磷肥投入 17%~41% 和 0%~20% [图 3 (e)],增加作物产量 15%~27% [图 3 (f)].秸秆和植物残体还田后,其中的养分并不能被作物直接吸收,时效性较差,因此其替代氮磷肥投入带来的削减率往往不足 20%.尾/废水通常

包括生活污水处理后的尾水或初步处理后的其他废水,其中含氮量在 5~20 mg·L⁻¹,以灌溉形式进行回用^[25],能替代的养分投入比例有限.粪肥沼液的氮替代比例最高,这与畜禽粪便中高铵含量有关.此外,粪肥沼液回用带来的磷肥替代比例不高,计算其对减少磷排放的直接效果难度较大,但易增加磷素在土壤层面中的累积^[26],因此关注度不高.

本研究调研过程中,发现文献数据中技术作用效果往往较为乐观.一方面,研究发文多立足于试验结果较好或技术效果达到预期的基础上;另一方面,技术的实施条件尤其是尺度大小对技术效果有着决定性的影响.一个技术,在试验室或盆栽培养条件下,因环境条件稳定且反应条件最为适宜,往往能

获得技术效果的最佳展现.但是,用此数据作为对该技术效果的参考依据,会高估技术在实际应用时的作用,较为不妥.因此,本研究仅选小区、大田、连片农田或农场条件下(剔除盆栽或培养条件)技术的应用效果作为图3绘制的数据基础,予以展现,增加数据可信度.此外,技术应用的时长也是影响效果的一大因素.如,肥料优化的技术可能对最初几个种植季的产量并无负面影响,但如果对肥料施用量的减少程度已带来地力耗损,持续减投必会在后期影响作物产量.遗憾的是,多数论文的时间跨度较短.对于如何判定技术应用时长的有效性,本研究并未找

到适宜时间长度切点作为判据.这也是带来目前技术作用效果仍然较好的原因.

2.3 种植业面源污染防控技术的发展趋势

2.3.1 引用导向趋势

根据文献共引分析理论和寻径网络算法,分别就对全球和中国尺度下种植业面源污染防控技术引用趋势进行了推演.所得趋势方向如表2所示,排在前5个关键词中,全球和中国尺度共有前沿趋势占4个,分别是氮利用效率、氧化亚氮排放、氨氧化细菌和生物炭,充分体现我国种植业面源污染防治研究与国际趋势基本保持一致.

表2 全球和中国尺度内引用导向趋势

Table 2 Trends from citation analysis worldwide and in China

中国	氮利用效率	氧化亚氮排放	碳组分	氨氧化细菌	生物炭
全球	氮利用效率	氧化亚氮排放	土壤有机碳	氨氧化细菌	生物炭

提高利用效率成为减少面源污染的主流趋势.源头削减领域涉及的栽培、肥料等直接影响着作物生长的技术还将延续现阶段的热度.对养分回用技术的关注将在未来占有重要地位,也将改变种植业投入养分的来源结构,实现资源的循环利用.对氧化亚氮排放的关注,一方面暗示种植业面源污染在关注种植业对水环境质量影响的同时,也需将大气圈里的物质循环纳入面源污染的关注范围.土壤添加剂使用和碳氮比调控^[27,28]也直接影响着利用效率和氧化亚氮排放.氨氧化细菌的研究趋势同样验证了养分转运对面源污染防控的重要性,是着手于微观调控的技术方向.生物炭作为以碳封存为目的的土壤添加剂,早在20世纪末就开始应用,而其对种植业面源污染,尤其是对氮磷过程的影响的相关研究起步较为滞后,但也在“十一五”后期逐渐成为热点[图2(a)].

在全球和中国尺度的第三位关键词存在一定差异,但均有关于碳.环境中碳的含量并不直接关联面源污染,但是土壤环境中的碳含量与氮循环、土壤肥力等密切相关.一些土壤添加剂(如生物炭或菌剂)以及秸秆回用等技术在实施过程中,实际上也改变了土壤环境的碳氮比及矿化速率,以此影响着养分库存和形态转变.同样是对碳的关注,全球尺度的技术趋势关键词是土壤有机碳,而中国尺度则是碳组分.由此可见,全球尺度以碳总量控制作为目标,而我国更看重碳组分比例这一动态变化过程.的确,比起碳封存我国尚处于碳调控阶段,这也一定程度说明,现阶段种植业土壤中养分有望依赖化学计量法实现运转管控和面源污染减排^[29].

2.3.2 效果导向趋势

肥料减量是农业部农业面源污染防治“一控、两减、三基本”工作^[30]的重中之重.本研究调研所涉文献充分肯定了肥料减量对面源污染防控的实质性作用[图3(a)和3(c)].继文献^[31]的出台,在使用量零增长的目标^[32]前提下,肥料种类和施用方法等相关减量优化技术仍将是我国的源头削减领域的热点方向.除肥料方向外,在源头减排领域的耕作改良和灌溉水分管理对污染物减排也有着显著的作用效果[图3(c)],然而我国对这两个方向的关注度并不高[图3(a)].现阶段,我国在耕作方式和灌溉系统上的布设欠缺,一定程度上与农田碎片化有关^[18,33].随着土地流转的推进,面向规模化经营的智能灌溉系统搭建有望与生态沟渠一起成为高标准农田的建设内容,并随着农业机械化的推进,耕作管理方式的优化也将成为我国种植业面源污染防治的又一着力点.

湿地系统是承接生态沟渠、植物篱和渗滤池的后端净化措施,也是过程拦截领域氮磷削减效果最好的技术方向[图3(d)].以现阶段我国研究关注度来看[图2(b)],湿地系统正在成为保证排放水质达标的重要手段.相关技术研究的开展,将有助于在当前面积有限的情况下,通过农田与沟-渠-塘-湿地的适宜配比,构建有效的后端净化体系,提高其对农田排水中的污染物消纳效果.

不同生产模块间的物质链回路的构建,是实现资源循环、养分再利用的关键.事实上,全球对养殖废弃物和生活废水的农田回灌已开展了不少研究,我国也在这一领域开展了不少技术研发,但如何安全回用,相关的技术参数、标准、导则和指南等有待

完善. 鉴于粪肥和沼液回用对氮磷的替代和削减效果, 研发畜禽养殖废水和生活污水处理尾水的直接和间接回用技术, 将成为种植业面源污染防治技术研发的新方向.

3 结论

近 20 年间源头削减领域技术发文章量最多, 且研究热度不断提升. 目前, 我国种植业面源污染防治技术研究对肥料方向的技术集中度较高, 而过程拦截和养分回用领域的技术较为单一, 尤其缺少多来源养分的农田回用研究. 提高肥料利用效率、关注温室气体排放、重视养分转运过程、使用土壤添加剂、综合考虑土壤碳和养分间关系, 是种植业面源污染防治技术的发展趋势; 配套建设并优化灌排系统, 构建沟-渠-塘等后端净化体系, 将能更好保障相关技术在实际应用中的有效集成, 提升种植业面源污染防治效果.

参考文献:

- [1] 叶婧, 耿兵, 李红娜, 等. 微生物技术在农业面源污染系统控制方案中的应用[A]. 见: 第五届全国微生物资源学术暨国家微生物资源平台运行服务研讨会文摘[C]. 广州: 广东省科学技术协会科技交流部, 2013.
- [2] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 21-25.
Xia X J, Hu Q Y, Zhu L Q, *et al.* Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in taihu region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 21-25.
- [3] 欧阳威, 黄浩波, 蔡冠清. 巢湖地区无监测资料小流域面源磷污染输出负荷时空特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 1024-1031.
Ouyang W, Huang H B, Cai G Q. Temporal and spatial characteristics of diffuse phosphorus pollution in the watershed without monitoring data at Chaohu lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(4): 1024-1031.
- [4] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1760-1769.
Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al.* Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng lake basin [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1760-1769.
- [5] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 等. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1140-1150.
Gao M F, Qiu J J, Liu S C, *et al.* Status and trends of agricultural diffuse pollution research based on bibliometrics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [6] 张福锁. 农业绿色发展战略与挑战[EB/OL]. <http://www.h2o-china.com/news/282165.html>, 2018-10-24.
- [7] FAO. FAO Stat Data[EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#home>, 2017.
- [8] 伦飞, 刘俊国, 张丹. 1961-2011 年中国农田磷收支及磷使用效率研究[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1681-1691.
Lun F, Liu J G, Zhang D. Trends in cropland P balance and P use efficiency in China from 1961 to 2011 [J]. Resources Science, 2016, 38(9): 1681-1691.
- [9] 于飞, 施卫明. 基于文献计量学的国内外面源污染研究进展分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5): 242-248.
Yu F, Shi W M. Non-point source pollution research in china and aboard based on bibliometrics [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(5): 242-248.
- [10] 李云霞. 基于 CNKI 数据库的农业面源污染文献定量研究[A]. 见: 中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 北京: 中国土壤学会, 2008.
- [11] 李卫华, 范平, 黄东风, 等. 稻田氮磷面源污染现状、损失途径及其防治措施研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(8): 118-123.
Li W H, Fan P, Huang D F, *et al.* Studies on plane source pollution situation, loss ways of nitrogen and phosphorus in rice paddy and prevention measures [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(8): 118-123.
- [12] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
Yang L Z, Shi W M, Xue L H, *et al.* Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: general countermeasures and technologies [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 1-8.
- [13] 薛利红, 何世颖, 段婧婧, 等. 基于养分回用-化肥替代的农业面源污染氮负荷削减策略及技术[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1226-1231.
Xue L H, He S Y, Duan J J, *et al.* Agricultural non-point source pollution nitrogen load reduction strategy and technology of nutrient reusing in agricultural fields to replace fertilizer [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1226-1231.
- [14] Zhang C Z, Liu S, Wu S X, *et al.* Rebuilding the linkage between livestock and cropland to mitigate agricultural pollution in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 144: 65-73.
- [15] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411-1419.
Zhang W X, Sun G, He P, *et al.* Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(6): 1411-1419.
- [16] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.
Lu Y H, Nie J, Liao Y L, *et al.* Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(1): 95-104.
- [17] Yao Y, Gao B, Zhang M, *et al.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [18] Ouyang W, Song K Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics[J]. Ecological indicators, 2014, 45: 579-589.
- [19] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural

- systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [20] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, *et al.* Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **146**(1): 103-112.
- [21] Min J, Zhao X, Shi W M, *et al.* Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China [J]. Pedosphere, 2011, **21**(4): 464-472.
- [22] 张晓龙, 张玉平, 高德才, 等. 不同施肥模式对旱地土壤氮磷钾径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(6): 36-40.
- Zhang X L, Zhang Y P, Gao D C, *et al.* Effects of different kinds of fertilization modes on soil nitrogen, phosphorus and potassium runoff in dryland field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(6): 36-40.
- [23] Wang R G, Zhao X, Liu H, *et al.* Elucidating the impact of influent pollutant loadings on pollutants removal in agricultural waste-based constructed wetlands treating low C/N wastewater [J]. Bioresource Technology, 2019, **273**: 529-537.
- [24] Min J, Shi W M. Nitrogen discharge pathways in vegetable production as non-point sources of pollution and measures to control it [J]. Science of the Total Environment, 2018, **613-614**: 123-130.
- [25] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(4): 768-776.
- Yin A J, Xue L H, Yang L Z, *et al.* Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth, N and P uptakes of rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(4): 768-776.
- [26] 王敏锋, 严正娟, 陈硕, 等. 施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(7): 1351-1359.
- Wang M F, Yan Z J, Chen S, *et al.* Effects of manure and biogas slurry applications on phosphorus accumulation and mobility in organic vegetable soil under greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(7): 1351-1359.
- [27] Baruah A, Baruah K K, Bhattacharyya P. Comparative effectiveness of organic substitution in fertilizer schedule; impacts on nitrous oxide emission, photosynthesis, and crop productivity in a tropical summer rice paddy [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2016, **227**(11): 410.
- [28] Wang Z Y, Zheng H, Luo Y, *et al.* Characterization and influence of biochars on nitrous oxide emission from agricultural soil[J]. Environmental Pollution, 2013, **174**: 289-296.
- [29] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(11): 3848-3858.
- Wang C J, Wang Q Q, Xu H, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(11): 3848-3858.
- [30] 中国政府网. 农业部: 确保到 2020 年实现“一控两减三基本”目标[EB/OL]. http://www.gov.cn/2015-04/14/content_2846156.htm, 2015-04-14.
- [31] 中华人民共和国农业农村部. 农业部关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见[EB/OL]. http://jiban.moa.gov.cn/zwillm/zwdt/201504/t20150413_4524372.htm, 2015-04-13.
- [32] 中华人民共和国农业农村部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/ztl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827907.htm, 2015-02-17.
- [33] Ju X T, Gu B J, Wu Y Y, *et al.* Reducing China's fertilizer use by increasing farm size [J]. Global Environmental Change, 2016, **41**: 26-32.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)