

南方低山丘陵区小流域不同土地利用方式下面源污染分布特征

纪仁婧¹, 洪大林¹, 和玉璞¹, 芮旭倩¹, 吴七斤², 邱娅柳²

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 南京市高淳区水务局, 江苏 南京 211300)

摘要: 南方低山丘陵地区经水土保持综合整治后, 水土流失得到了有效遏制, 但面源污染问题依然突出。研究小流域面源污染的空间分布规律, 对面源污染的治理尤为重要。以松溪河小流域为南方低山丘陵区典型代表, 结合实地调研, 选择小流域内最具有代表性的3种土地利用类型各自汇水范围内的水塘及松溪河下游和小流域出口处作为采样点, 利用2016年6-11月采集的3次水样, 分析不同土地利用类型对总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总磷(TP)空间分布的影响。结果表明: 总氮是小流域水体主要污染物, 小流域出口处总氮浓度最高, 为0.90~3.15 mg/L; 居民点和农田对小流域面源污染贡献最高, 这是因为南方低山丘陵小流域近年来经济发展较快, 社会经济活动频繁但基础设施建设相对滞后; 硝态氮浓度与总氮浓度的空间分布特征较一致, 硝态氮、铵态氮与总氮在时间上的变化趋势相同; 小流域氮素面源污染受到降雨的显著影响, 磷素面源污染受到施肥习惯的影响。

关键词: 土地利用类型; 面源污染; 水土保持; 南方低山丘陵区

中图分类号: X501

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0181-05

Non-point source pollution distribution characteristics under different land uses in small watershed in the hilly regions of south China

JI Renjing¹, HONG Dalin¹, HE Yupu¹, RUI Xuqian¹, WU Qijin², QIU Yaliu²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Gaochun Water Authority, Nanjing 211300, China)

Abstract: Soil and water loss has been effectively controlled by the comprehensive treatment of soil and water conservation in the hilly regions of south China, but the problem of non-point source pollution still exists. It is very important to study the spatial distribution of non-point source pollution in watersheds for the treatment of this kind of pollution. Taking the Songxi River Watershed as the representative of the hilly regions in south China, based on the field investigation, three representative land use types in watershed were selected as the sampling points, including the ponds within the catchment area, the downstream of Songxi River and the watershed outlet. The effects of different land use types on the spatial distribution of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) and total phosphorus (TP) were analyzed using water samples collected from June to November in 2016. The results showed that the total nitrogen was the main pollutant, and its concentration at the sampling point of the watershed outlet was the highest, ranging from 0.9 to 3.15 mg/L. Residential area and farmland contributed the highest to the pollution of small watersheds. Because the social and economic activities are frequent due to the fast economic development in these areas, but the infrastructure construction is relatively lagging behind. The spatial distribution characteristics of nitrate nitrogen concentration and total ni-

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609141); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y918004、Y920009)

作者简介: 纪仁婧(1989-), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士, 工程师, 研究方向为农田高效灌溉排水理论与环境效应。

通讯作者: 和玉璞(1987-), 男, 河南新乡人, 博士, 高级工程师, 研究方向为农田高效灌溉排水理论与环境效应。

trogen concentration were consistent, and the time variation trend of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and total nitrogen was the same. It is found that nitrogen pollution in watershed is significantly affected by rainfall, and phosphorus pollution is affected by fertilization habits.

Key words: land use type; non-point source pollution; soil and water conservation; hilly regions of south China

1 研究背景

党的十九大报告明确指出“加强农业面源污染防治,开展农村人居环境整治行动”,近年来中央一号文件多次提出加强农村污染治理和生态环境保护,加大农业面源污染治理力度,治理农村生态环境突出问题。农业面源污染治理是关系中国农业可持续发展的重要问题,是加快推进乡村振兴、建设美丽中国的重要保障。

小流域是面源污染产生的源头,降雨径流是引起面源污染的重要原因,但不同的土地利用方式是造成面源污染流失的本质因素^[1-2]。面源污染是由养分在时空过程上的“盈-亏”非均衡所导致,由“源”和“汇”的增减平衡及其空间关系所控制^[3]。多数学者的研究表明,林地、草地能够改善水质,相当于“汇”,建设用地、耕地会加剧水质恶化,相当于“源”^[4-5]。由于人类活动的影响使得不同小流域同一土地利用类型上所承载的社会经济活动类型及水平存在异质性,这种异质性使得土地利用类型对水质的影响在不同小流域之间具有很大差异^[6-7]。因此,研究小流域尺度面源污染的空间分布规律,识别筛选小流域面源污染主要来源及其重点区域,是治理面源污染的首要任务。

南方低山丘陵地区水土保持综合整治工程建设力度逐年加大,水土流失得到了有效遏制,但由于区域农业生产活动频繁、人类活动较为剧烈,在水土流失有效控制后农业面源污染问题依然突出。本研究以松溪河小流域为南方低山丘陵区典型代表,在该小流域已先后开展了一系列水土保持综合治理工程,通过对小流域面源污染情况进行实地调查与采样分析,明确该类型地区不同用地方式下面源污染的分布特征,以期推动南方低山丘陵区小流域综合治理成效的提升。

2 研究区域概况与数据收集

2.1 研究区概况

研究区松溪河小流域位于江苏省南京市高淳区,流域位于东经 119°4'24"~119°5'54"和北纬 31°24'17"~31°25'28"之间,总面积为 3.48 km²。流域

内以低山丘陵为主,海拔高度 30~108 m。小流域内塘坝众多,境内土地利用类型丰富,各主要土地利用类型面积由大到小依次为:林地(1.414 km²)、农田(1.233 km²)、水面(0.443 km²)、居民点(0.302 km²)、道路(0.082 km²)、草地(0.006 km²),占该小流域总面积比例分别为 40.6%、35.4%、12.7%、8.7%、2.4%、0.2%。气候类型属北亚热带和中亚热带过渡地区,平均气温 16.0℃,最高气温 39.8℃,最低气温 -14.0℃。多年平均降水量 1 190.8 mm,降水量年内分配不均,年际变化较大,最大年降水量 1 878.6 mm(1991 年),最小年降水量 569.5 mm(1978 年),雨季为每年 5~9 月。土壤以水稻土类为主,区域内农用地中水田面积较大,现状主要种植中稻、早稻、晚稻和籼稻,少部分区域水稻与油菜轮种;旱地作物主要有玉米、小麦、豆类、薯类、糖类、棉花、芝麻等。2016 年,农村居民人均可支配收入达到 17 693 元,人均生活消费支出 12 981 元,农村恩格尔系数为 29.94%,自来水普及率达到 95%。其基本概况具有较好的代表性,属于典型的南方低山丘陵小流域。研究区松溪河小流域地理位置及采样点布置见图 1。

2.2 数据收集

使用 ENVI 5.3 软件,采用人机交互解译方法获取小流域内土地利用类型。沿松溪河从源头开始,根据土地利用类型的差别设置水质监测点位,通过对比优选,最终选取 11 处水质监测点位分别代表林地、农田、居民点、河流对面源污染分布的影响(图 1),其中林地、农田、居民点选取各自汇水范围内的水塘作为采样点,选取松溪河下游及小流域出口处作为河流采样点。

于 2016 年 6~11 月共计采集水样 3 次,选取总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)指标来反映松溪河小流域的水质状况。其中 TN 浓度测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,NH₄⁺-N 浓度测定采用纳氏试剂比色法,NO₃⁻-N 浓度测定采用酚二磺酸光度法,TP 采用钼酸铵分光光度法^[8]。各土地利用类型监测点位取平均值得到各指标值。

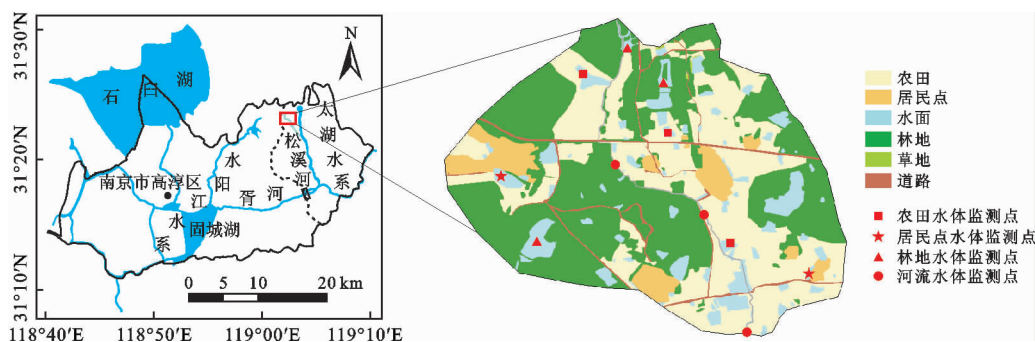


图1 松溪河小流域地理位置、土地利用类型及采样点布置图

3 结果与分析

3.1 不同用地类型周边水体氮素浓度分布特征

3.1.1 总氮浓度分布特征 监测期内不同用地类型周边水体总氮浓度监测结果如图2所示。综合图2中3次监测结果,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),以总氮浓度为水质评判指标,松溪河小流域水质属于地表水IV~V类。各次采样中,河流总氮浓度普遍高于其他土地利用类型周边水体,居民点、农田周边水体总氮浓度次之且较为接近,林地周边水体氮素浓度最低。居民点周边水体3次监测总氮浓度分别为1.63、1.34、1.41mg/L,农田周边水体3次监测总氮浓度分别为1.02、0.72、1.68mg/L,居民点和农田对松溪河污染浓度贡献最高。林地周边水体3次监测平均值为0.59 mg/L,林地对松溪河水质具有正面影响。

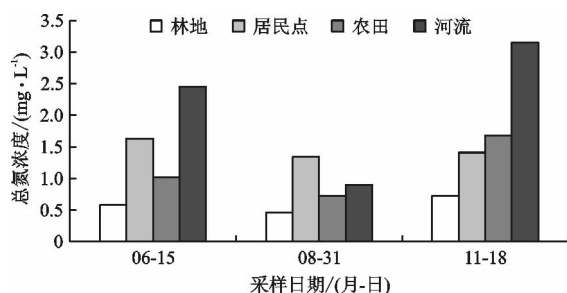


图2 监测期内不同用地类型周边水体总氮浓度

松溪河是该小流域地势最低区域,是小流域汇水的最终通道,营养物质富集,使得河流水体总氮含量最高。张展羽等^[9]的研究结果表明,土壤氮素随地表径流和侵蚀泥沙迁移,小流域地势最低区域土壤氮素质量分数最高,与本研究结果一致。面源污染分布特征不仅与综合反映人类活动的土地利用类型相关,而且与社会经济特征相关^[10-11]。浙北山区农村近年来经济发展较快,人口密度大,但生活污水处理设施仍不健全,生活污水少部分经简单的化粪池

池处理后排入河道,大部分则未采取任何措施直接入河,导致其生活污水的总氮负荷大于水稻种植业^[12]。部分研究区域由于农村居民居住分散,且生活水平较低,农村生活污水排污量较低,导致农村生活对总氮负荷的贡献率小于农田污染源^[13]。本研究区域内农田面积较大、人口较多,传统种植模式下,农田水肥投入量大、水肥利用效率低,农村居民居住集中,生活水平较高但农村生活污水集中处理率较低,居民仍习惯用洗涤废水冲洗房前屋后,导致种植业及农村生活污水污染较高。因此,农村经济发展水平、产业结构特点、基础设施情况、种植模式及生活习惯等社会经济指标均会影响小流域面源污染分布特征。多数学者研究表明,林地具有涵养水源、减少地表径流和地表降雨-径流侵蚀的功能^[2, 14];林地与氮素输出浓度呈负相关,甚至达到极显著水平^[15]。南方低山丘陵区林地多分布在地势相对较高的区域,上游无污染物输入,加之自身的减蚀净化作用,使林地无论在汛期与非汛期,对污染的贡献均最小。

由图2可见,汛期采样时(8月31日),居民点监测点位总氮浓度最高,依次大于河流、农田、林地,且不同用地类型周边水体总氮浓度均较第1次(6月15日)采样出现了一定程度的减小,其中河流监测点位总氮浓度减小63.1%,降幅最大,居民点监测点位周边水体总氮减小幅度最小,为17.8%。在农业面源污染时空变化特征的研究中,胡建等^[16]、彭月等^[17]均得出农田对汛期水质负贡献最大、聚落用地分别对非汛期水质负贡献最大的结论,与本研究结果存在差别。这是由于虽然处于汛期,但研究区域在8月中下旬持续较长时段未发生降雨,现场采样时塘坝水位已大幅下降,影响了稻田的正常灌溉。而胡建等^[16]、彭月等^[17]的研究区域汛期降雨量丰富,降雨显著增加了稻田总氮负荷的输出量^[18],本研究中降水量的减少使得种植业面源污染

相对缓解,而小流域内农村居民生活用水保障率为95%,区域旱情未影响居民的正常生活用水,生活污水排放量基本保持稳定,居民点监测点位总氮浓度降幅最低,因而生活污染所占比重加大。降雨量的减少使得小流域产流量下降,松溪河作为小流域汇水的最终通道,总氮浓度下降幅度最为明显。

3.1.2 铵态氮、硝态氮浓度分布特征 面源氮污染主要以铵态氮和硝态氮两种形态在土水界面中扩散及迁移转化。监测期内不同用地类型周边水体铵态氮浓度、硝态氮浓度监测结果分别如图3、4所示。由图3、4可见,综合3次监测结果,河流监测点位铵态氮浓度最高,其余各监测点位铵态氮浓度在监测周期内均维持在较低水平。硝态氮与总氮浓度的空间分布特征相似,河流普遍高于其他土地利用类型周边水体,居民点、农田周边水体硝态氮浓度较高,林地周边水体硝态氮浓度最低。各用地类型周边水体硝态氮呈现前期大、中间小、后期再增加的变化特征,这与总氮在时间上的变化趋势相同。

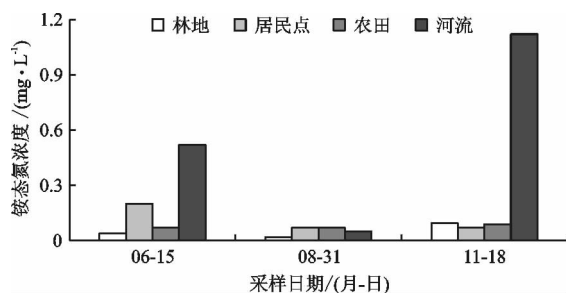


图3 监测期内不同用地类型周边水体铵态氮浓度

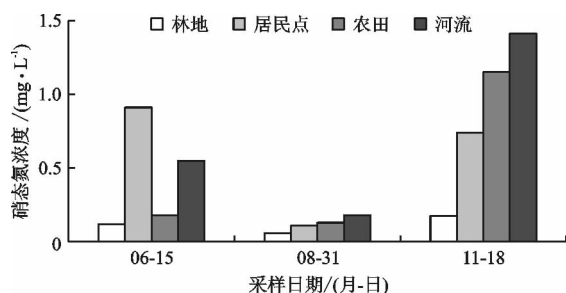


图4 监测期内不同用地类型周边水体硝态氮浓度

已有研究结果表明,铵态氮在氧化环境下易被硝化细菌转化为稳定的硝态氮,硝态氮不易被土壤颗粒吸附,迁移能力强^[19-20]。氮素的流失与施肥和降雨径流量有非常密切的关系^[21]。第1次采样时(6月15日),小流域内水稻正在插秧或者进入返青期,稻田施用了大量基肥,加之灌溉、降雨后稻田田表排水量较大,大量营养物质随地表径流进入周边水体,导致氮素浓度较高;汛期采样时(8月31日),

在旱情与极端天气的影响下,小流域产流量下降,减少了营养物质的输出;而在非汛期采样时(11月16日),区域降雨量较大,小流域各土地利用区域输出的营养物质最终进入河道,使得河流监测点位的硝态氮浓度再次上升。小流域面源氮污染的输出量随降雨量变化呈现正相关关系。

3.2 不同用地类型周边水体总磷浓度分布特征

监测期内不同用地类型周边水体总磷浓度监测结果如图5所示。综合图5中3次监测结果,各类土地利用类型周边水体总磷浓度均较低,其中林地采样点的总磷浓度最低,平均值为0.03 mg/L,农田和居民点周边水体总磷浓度平均值均为0.08 mg/L,河流采样点平均值为0.15 mg/L。小流域总磷污染物主要来源于农田排水与农村污水排放。通过调查,研究区域内稻田磷肥施用与氮肥不同,集中在基肥阶段,加之时段内降雨量与稻田灌溉水量较大,导致第1次采样时监测点位总磷浓度相较于第2次和第3次采样时高,随时间进程,施入稻田的磷肥多被水稻植株吸收利用,使得农田磷素输出量减少,农田周边水体总磷浓度不断减小,非汛期采样时(11月16日),各监测点位总磷浓度变化范围为0.03~0.09 mg/L,浓度均值为0.07 mg/L。小流域内农村居民多使用低磷洗涤剂,总磷污染产生量较低。颗粒态磷是小流域磷的主要流失形态,在总磷的迁移过程中,颗粒态磷易被土壤吸附而沉降^[22],研究区域经过一系列水土保持综合治理工程,水土流失得到显著改善,因此小流域内各类土地利用类型周边水体总磷污染程度均较低。

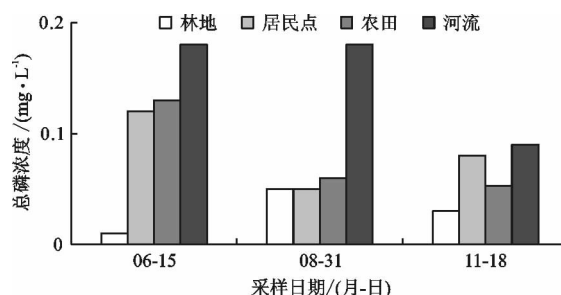


图5 监测期内不同用地类型周边水体总磷浓度

4 讨论

面源污染治理主要有3种途径:对污染源系统的治理、对污染物运移途径的治理、对污染汇系统的治理。水土保持措施对前两种治理途径均有重要影响,其通过提高地表植被总覆盖度、改善土壤质地和水分条件、增强土壤团粒结构、增加土壤微生物种类

和数量等,对面源污染物的植物吸收、生物化学降解等具有显著的正向促进作用,减少污染源系统的污染物通量;通过拦蓄径流、泥沙控制侵蚀和搬运过程来控制面源污染物的扩散,截断面源污染运移通道。刘涓等^[23]、杨林章等^[24]研究表明,在三峡库区的低海拔平坝丘陵区采用增加植被覆盖、保护植被措施控制面源污染,在中海拔低山区发展经济林木、退耕还林措施控制面源污染,因地制宜地实施合理的水土保持措施,是防治面源污染的重要手段。

本研究中小流域经水土保持治理后,面源污染问题依然突出。这是因为南方低山丘陵区近年来经济发展迅速、人口密度大、经济活动频繁,但基础设施相对落后,面源污染发生发展情况复杂。小流域表现为“源”作用的水田、旱地、居民点多分布在中下游,而起显著“汇”作用的林地多位于小流域地势较高区域,而对污染物运移途径治理的水土保持措施多实施于污染源的上游,对面源污染的拦截和削减作用大大减弱。今后应在开展小流域水土保持综合治理的基础上,加强对村庄和农田的环境整治力度,提升小流域治理成效,建设宜居、宜耕、宜游的生态清洁小流域。

5 结 论

(1)南方低山丘陵小流域经过水土保持综合治理后,仍存在面源污染风险。总氮是小流域水体的主要污染物,松溪河小流域出口处河流水体总氮浓度最高,为0.9~3.15 mg/L。南方低山丘陵小流域近年来经济发展较快,但传统的生产生活方式加之基础设施建设相对滞后,使得居民点和农田对小流域污染负荷贡献均较高,今后除做好水土保持工作外,还应加强村庄和农田环境整治方面的工作。

(2)河流监测点位铵态氮浓度最高,其余各监测点位铵态氮浓度在监测周期内均维持在较低水平;硝态氮浓度与总氮浓度的空间分布特征相似。铵态氮、硝态氮与总氮浓度在时间上的变化趋势相同,小流域面源氮污染受到降雨的显著影响。

(3)各类土地利用类型周边水体总磷浓度在监测期内均保持在较低水平,面源磷污染主要受到施肥习惯的影响。

参考文献:

[1] 韩黎阳,黄志霖,肖文发,等.三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J].环境科学,2014,35(3):1091-1097.

[2] 陈志良,程 炯,刘 平,等.暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2008,(5):30-33.

[3] 王金亮,谢德体,邵景安,等.基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地面源污染源-汇风险识别[J].农业工程学报,2016,32(16):206-215.

[4] 唐 廉,胡晓辉,权冠中,等.潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J].地球与环境,2018,46(4):364-372.

[5] 吴 东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例[J].环境科学,2016,37(8):2940-2946.

[6] 翟正丽,许立祥,周祖昊,等.基于GIS的鄂州市氮、磷农业面源污染时空分布研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):8-13.

[7] 闵继胜,孔祥智.我国农业面源污染问题的研究进展[J].华中农业大学学报(社会科学版),2016(2):59-66+136.

[8] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法(4版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.

[9] 张展羽,陈晶晶,张文祥,等.农业小流域“田-沟”系统氮素时空变化分析[J].排灌机械工程学报,2013,31(1):61-65.

[10] 王 娇,马克明,张育新,等.土地利用类型及其社会经济特征对河流水质的影响[J].环境科学学报,2012,32(1):57-65.

[11] MORENO J L, NAVARRO C, DE LAS HERAS J. Abiotic ecotypes in south-central Spanish rivers: Reference conditions and pollution [J]. Environmental Pollution, 2006, 143(3):388-396.

[12] 孙海军,吴家森,姜培坤,等.浙北山区典型小流域农村面源污染现状调查与治理对策[J].中国农学通报,2011,27(20):258-264.

[13] 刘 菊,傅 斌,王玉宽,等.四川山区农村面源污染负荷估算与评价[J].农业工程学报,2016,32(24):218-225+316.

[14] 杨金玲,张甘霖,张 华,等.丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J].环境科学,2003,24(1):16-23.

[15] 罗 璇,史志华,尹 炜,等.小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J].环境科学,2010,31(1):58-62.

[16] 胡 建,刘茂松,周 文,等.太湖流域水质状况与土地利用格局的相关性[J].生态学杂志,2011,30(6):1190-1197.

[17] 彭 月,崔云霞,樊 宁,等.农业面源污染河流源解析及时空变化特征研究[J].环境保护科学,2018,44(3):47-52.

[18] 梁新强,田光明,李 华,等.天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J].水土保持学报,2005,19(1):59-63.

(下转第192页)

- (1): 80-85.
- [3] 张志洋, 李红, 陈超, 等. 溶解混施水肥一体化装置施肥性能试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(11): 1115-1119.
- [4] 吴锡凯, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水动式比例施肥泵大田性能影响因素试验研究[J]. 节水灌溉, 2019(2): 18-21+28.
- [5] 卢珍, 周小波, 李光辉, 等. 水动比例施肥泵研究现状及存在的问题[J]. 现代农业科技, 2019(19): 171-172.
- [6] TANG Pan, LI Hong, ISSAKA Z, et al. Methodology to investigate the hydraulic characteristics of a water-powered piston-type proportional injector used for agricultural chemigation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(3): 545-553.
- [7] 杨大森. 水动比例注入泵运动分析及性能优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [8] 王睿, 王文娥, 胡笑涛, 等. 微灌用施肥泵施肥比例与肥水比对过滤器堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 117-122.
- [9] 杨大森, 李红, 骆志文. 活塞式比例施肥器性能对比试验[J]. 节水灌溉, 2015(11): 47-50.
- [10] 骆志文, 李红, 杨大森. 水动比例注入泵容积效率分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 91-94.
- [11] 汤攀, 李红, 骆志文, 等. 比例施肥泵驱动活塞受力分析及内部流动模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 93-100.
- [12] 孙彩珍, 李红, 汤攀. 三通调节阀分流比及内部流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 441-446.
- [13] 吴锡凯, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水力驱动式比例施肥器性能影响因素试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 6-9.
- [14] BRON D. Pump for variable dosing: US, 4118152[P]. 1978-10-03.
- [15] THIERRY G, HIGHAM D, VACHER D. Reciprocating hydraulic machine, especially a motor, and dosing apparatus comprising such a motor: US, US7207260B2[P]. 2007-04-24.
- [16] SILVA M J D, MAGALHES P S G. A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management[J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 150-158.
- [17] 孙彩珍. 阀门调节式比例施肥器理论及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业灌溉设备 水动化肥-农药注入泵: GB/T 19792-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [19] LI Jiusheng, MENG Yibin, LI Bei. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J]. Irrigation Science, 2007, 25(2): 117-125.

(上接第 185 页)

- [19] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1707-1716.
- [20] 宋林旭, 刘德富, 崔玉洁. 三峡库区香溪河流域非点源氮磷负荷分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 428-434.
- [21] 杨金玲, 张甘霖, 周瑞荣. 皖南丘陵地区小流域氮素径流输出的动态变化[J]. 农村生态环境, 2001(3): 1-4.
- [22] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 138-146.
- [23] 刘涓, 谢谦, 倪九派, 等. 基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2431-2441.
- [24] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.