ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 11 期
2018 年 11 月 15 日

目 次

2010～2015 年我国水泥工业 NO_x 排放清单及排放特征 …… 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煨炕污染物排放清单及其对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献 …… 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 …… 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 …… 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 $PM_{2.5}$ 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征 …… 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 …… 温杰,杨佳美,李蒲,郁佳,吴建会,田瑛泽,张进生,史国良,冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单 …… 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险 …… 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 …… 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 …… 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 …… 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 …… 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 …… 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 …… 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岿然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 $\delta^{15}N$ 空间差异及成因分析 …… 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 …… 耿宏志, 邬环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 …… 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 …… 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 …… 李玉凤,刘红玉,刘军志,娄彩荣,王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 …… 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 …… 葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 …… 王丹赫, 张宏华,林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 …… 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H_2O_2 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 …… 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月超, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N_2O 产生途径 …… 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 …… 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行 …… 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试 …… 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 … 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 …… 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N_2O 释放的冲击影响 …… 付昆明, 姜姗, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 … 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 …… 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有机氯农药的特征分布 …… 刘佳, 丁洋, 祁士华, 瞿程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 …… 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH …… 姚静波,周杰,王明新,荀志祥,薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 …… 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 …… 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 …… 俞映倞, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响 …… 郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响 …… 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊姆,郑国砥,卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性 …… 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 …… 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO_2 通量日变化观测及其影响因素分析 …… 罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH_4 排放特征及其影响因素 …… 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO_2 和 N_2O 排放的影响 …… 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 …… 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 …… 冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 …… 杜新强,方敏,冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 …… 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响

李玉凤[1],刘红玉[1],刘军志[2],娄彩荣[2],王娟[2]
(1. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023; 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023)

摘要: 多水塘系统在滞留和降解农业面源污染中发挥着巨大作用. 不同景观结构特征的多水塘系统对农业面源污染的截留率也存在差异. 本文针对多水塘系统的功能及特点, 选择 4 个不同景观结构的小流域作为研究区域, 分析降雨前后多水塘系统水环境的变化特征及其对氮元素的截留情况, 并揭示其截留率与水塘系统景观结构之间的关系. 结果表明: ①雨前水塘水体中总氮(TN)浓度的变化范围在 1.32 ~ 6.32 mg·L^{-1}之间, 雨后 TN 质量浓度增加到 2.8 ~ 16.99 mg·L^{-1}之间, 其中, 硝氮(NO_3^--N)占 TN 的质量分数为 20% ~ 74%; ②多水塘系统对 TN、NO_3^--N和氨氮(NH_4^+-N)的平均截留率分别为 50.09%、48.71%和 52.75%; ③小流域 1 中的水塘系统对氮的截留率最低, 平均次降水过程中小流域 2 中的水塘系统对氮的截留量最低, 仅为 56.10kg, 远低于小流域 4 中水塘系统对氮的截留量 324.43kg; ④多水塘系统对氮的截留率受到水塘个数、面积及水塘与水塘之间沟渠密度的影响, 其中沟渠密度对氮截留率的影响最大. 本研究结果可为农村多水塘系统的管理及规划提供科学依据.

关键词: 多水塘系统; 非点源污染; 氮截留; 农村流域; 景观结构
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)11-4999-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201803187

Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds

LI Yu-feng[1], LIU Hong-yu[1], LIU Jun-zhi[2], LOU Cai-rong[2], WANG Juan[2]
(1. College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Nitrogen (N) loss from agricultural fields can cause eutrophication in downstream freshwater systems, but the use of multi-pond networks can mitigate N losses from agricultural runoff. This study presents an analysis of the relationships between N retention and land use before and after rainfall events with the goal of identifying differences in agricultural runoff in four sub-watersheds with 3, 3, 7, and 7 ponds, respectively. The total N concentrations before rainfall ranged from 1.32 mg·L^{-1} to 6.32 mg·L^{-1}, and total N (TN) levels in the ponds after rainfall varied from 2.8 mg·L^{-1} to 16.99 mg·L^{-1} and typically contained 20% - 74% nitrate (NO_3^--N). The mean concentration retention efficiencies in the four sub-watersheds for TN, NO_3^--N, and ammonium (NH_4^+-N) were 50.09%, 48.71%, and 52.75%, respectively. The N retention efficiency in sub-watershed 1 (3 ponds) was the lowest among the four sub-watersheds. The N retention mass in sub-watershed 2 (3 ponds) was only 56.10 kg, and this value was far lower than that of sub-watershed 4 (324.43 kg, 7 ponds). The number of ponds in the sub-watersheds was not the only factor that contributed to the effective retention of non-point source N in-situ, but pond area and ditch density also significantly affected N retention. Thus, pond area and ditch density should be increased for similar multi-pond areas. However, managing multi-ponds to maximize N retention requires dynamic monitoring and management over the long term.

Key words: multi-pond system; non-point source pollution; nitrogen retention; agricultural watershed; landscape structure

在点源污染得到有效控制的地区, 农业非点源污染已经成为其水环境污染的主要方式[1]. 农田排水及在降水过程中所产生的地表径流中富含营养物质, 这些营养物质最终汇入目标水体, 使得目标水体富营养化程度加重[2,3]. 针对日益严重的农业面源污染这一现象, 20 世纪 60 年代, "最佳管理措施(BMPs)"这一理念的出现成为改变这一现象的有效方法[4~6]. 人工湿地、生态沟渠、滞留池等 BMPs 都能够有效地截留区内流失的氨氮、硝态氮和总氮[7~9]. 多水塘系统是在中国存在千年的 BMPs, 但

收稿日期: 2018-03-27; **修订日期**: 2018-04-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(41871188, 31570459, 41601413); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20140921); 江苏省高校自然科学研究重点项目(15KJA170002); 江苏省重点研发计划项目(BE2018681)
作者简介: 李玉凤(1985 ~),女, 博士, 副教授, 主要研究方向为湿地生态评价与 GIS 应用, E-mail: pandalee_0826@163.com

是自 20 世纪 80 年代起，由于缺乏对沟-塘系统生态功能的关注，很多年久失修的水塘严重淤积，甚至被填平，其截留农业面源污染的生态功能逐渐下降[10].

多水塘系统是指多而小的水塘通过水沟相连，形成一个从结构到功能上完整的系统[11]，该系统作为农村景观组分，能够显著地降低径流速度、贮存降水及暴雨径流，其所蓄积的水资源在灌溉期回归农田，得以循环利用[12]. 因此，沟-塘系统能够有效地拦截、去除农业景观输出的营养物质，改善流域水环境，在农业发展过程中具有不可替代的作用和价值[13]. 已有研究表明，多水塘系统对水资源的截留率达到 85.5%，对总氮的截留率最高达到了 98.1%，年平均氮截留量达到 280 kg·hm^{-2}[14]. 因此，多水塘系统以其低投入和高物质截留率，被认为是控制农业面源污染和实现农业可持续发展的 BMPs[15].

已有研究表明水塘在去除面源污染中的氮元素方面具有很高的潜力，但是不同面积、位置和水塘的组合模式在截留氮元素方面的研究相对还较少. 单水塘对氮元素的截留力通常是通过水塘出入口水环境中的氮元素含量的变化来确定的[16]. 从景观尺度而言，在多水塘系统中，水塘与水塘之间的组合关系对氮元素截留率的影响是需要进一步研究的问题[17]. 因此，本文选择 4 个不同组合模式的多水塘系统，研究其对氮元素截留率的影响，同时分析多水塘系统流域内景观结构与氮截留率之间的关系，以期为农村非点源污染的控制提供景观优化方案.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于江苏省邵伯湖流域内，邵伯湖面积为 165 km^2，水质属于Ⅲ类，该湖良好的水质与其流域内多水塘系统功能的发挥有着直接的关联. 为了减少流域嵌套对研究结果的影响，本研究选择位于邵伯湖流域的上游——江苏省仪征市的风岭流域为研究区，该区处于湿润的亚热带气候和季风气候的过渡带，年平均气温为 15.5°，降水量为 1 000 mm. 风岭流域面积为2 523 hm^2，高程变化范围为 23 ~ 48 m[18]. 流域内共有 360 个水塘，占流域总面积的 10.3%. 为了研究区内多水塘系统的结构对氮截留特征的影响，本研究在风岭水库流域的上游选择了 4 个小流域进行分析(图 1).

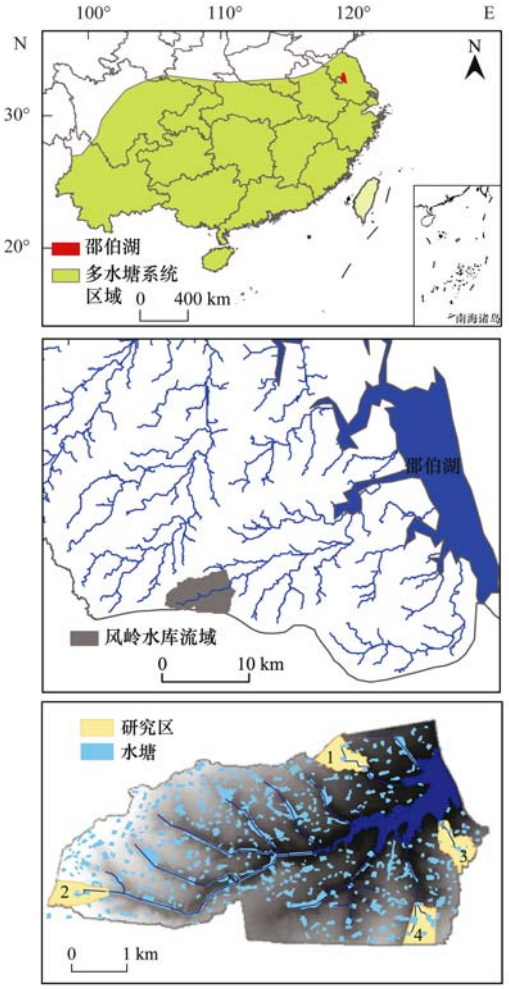


图 1 研究区示意

Fig. 1 Locations of the study areas

1.2 野外采样及实验室分析

风岭水库流域农田种植模式以稻麦轮种为主，小麦的生长期为 11 月到次年的 5 月底，水稻的生长期为 5 ~ 10 月. 由于该区在水稻种植过程中，水稻田内水量蒸发大，农业排水量小(可以忽略不计). 因此，选择小麦种植期作为多水塘氮截留的研究期. 在小麦种植期内，有两次较为集中的施肥时间，即 11 月的播种期和次年 3 月中旬的拔节孕穗期. 集中施肥期若遇到强降水，通常会引起过剩营养物质的流失，加重农业面源污染.

该区 2015 年冬小麦的拔节孕穗施肥期主要集中在 3 月 13 ~ 16 日. 随后 3 月 17 ~ 18 日产生一次降水过程，降水时间比较集中，降水量为 74 mm，且已经产生地表径流. 根据以上情况，本次水样采集时间分别为施肥前的 3 月 12 日和降水后的 3 月 20 日. 共采集流域内 19 个水塘的水样，每个水塘设置 4 个样点，均匀分布于水塘周边，采样点距离岸边 2 m 的位置. 每个样点采集 3 瓶水样，分别装

在 100 mL 的一次性采样瓶中，共采集 228 个水样. 样品采集后，于 4℃车载冰箱内保存并在 1d 内送至实验室进行分析. 实验测定的指标主要包括总氮(TN)、硝态氮(NO_3^--N)和氨氮(NH_4^+-N). 具体分析方法如下：TN 通过碱性过硫酸钾-紫外分光光度法进行测定，NO_3^--N、NH_4^+-N是将水样用 0.45 μm 有机微孔滤膜抽滤后进行测定. NO_3^--N是通过紫外分光光度法测定，NH_4^+-N是通过水杨酸-次氯酸盐分光光度法测定.

所测数据均以平均值及标准误差表示. 利用单因素方差分析法(ANOVA)进行差异显著性分析($P<0.05$). 统计分析采用 SPSS 19 软件，采用 Origin 9.0 软件进行绘图.

1.3　多水塘系统网络特征计算

本研究拟选择沟渠长度、密度、网络连接度、环度以及水塘数量等指标定量描述多水塘系统网络结构特征. 其中，沟渠网络连接度 γ 指数是度量网络与沟渠节点连接程度的指标. 其计算公式如下：

$$\gamma = \frac{L}{3(V-2)}$$

式中，L 为连线数，V 为节点数. γ 数值变化范围为[0，1]，$\gamma=0$，表示网络内无连线，只有孤立点存在，$\gamma=1$，则表示网络内每一个接点都存在与其它所有接点相连的连线[19].

沟渠网络环度 α 指数用来描述网络中回路出现的程度，即网络中实际回路数与网络中存在的最大可能回路数之比，可使用 α 指数来测度：

$$\alpha = (L-V+1)/(2V-5)$$

α 指数的变化范围介于[－1，1]区间，$\alpha=0$ 意味着网络中不存在回路；$\alpha=1$，说明网络中已达到最大限度的回路数目[19].

1.4　氮元素截留率的计算

TN、NO_3^--N 和 NH_4^+-N 截留率的计算公式如下[20]：

$$R_e = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100 \quad (1)$$

式中，R_e 为截留率(%)，c_1 和 c_2 分别是降雨后和降雨前的 TN、NO_3^--N和NH_4^+-N浓度(mg·L^{-1}). 截留量的计算公式如下：

$$R_m = (c_1 - c_2) \times S_p \times 10^6 \quad (2)$$

式中，R_m 为截留量(kg)，S_p 为水塘蓄水量(L). 水塘的蓄水量通过 1∶1 万的 DEM 和监测水位计算得到.

2　结果与讨论

2.1　小流域内多水塘系统景观特征分析

4 个小流域内土地利用类型主要有农田、村庄、水塘和林地，其在小流域内所占的面积见表 1. 4 个小流域面积较为接近，总面积在 37～40 hm^2 之间，其中农田面积最大的是小流域 2，农田面积最小的是小流域 4. 村庄面积最小的是小流域 2，水塘面积最大的是小流域 4，达到小流域面积的 17.40%，沟渠面积最大的是小流域 2(6.35%). 就多水塘系统而言，小流域 4 的水塘系统所占面积最大(占整个小流域的 18.79%)，小流域 1 的水塘系统所占面积最小，占其流域面积的 7.58%，面积仅有小流域 1 的 40%左右.

表 1　4 个小流域中不同土地利用类型的面积比

Table 1　Area ratio of the different land-use types and total sub-watershed area

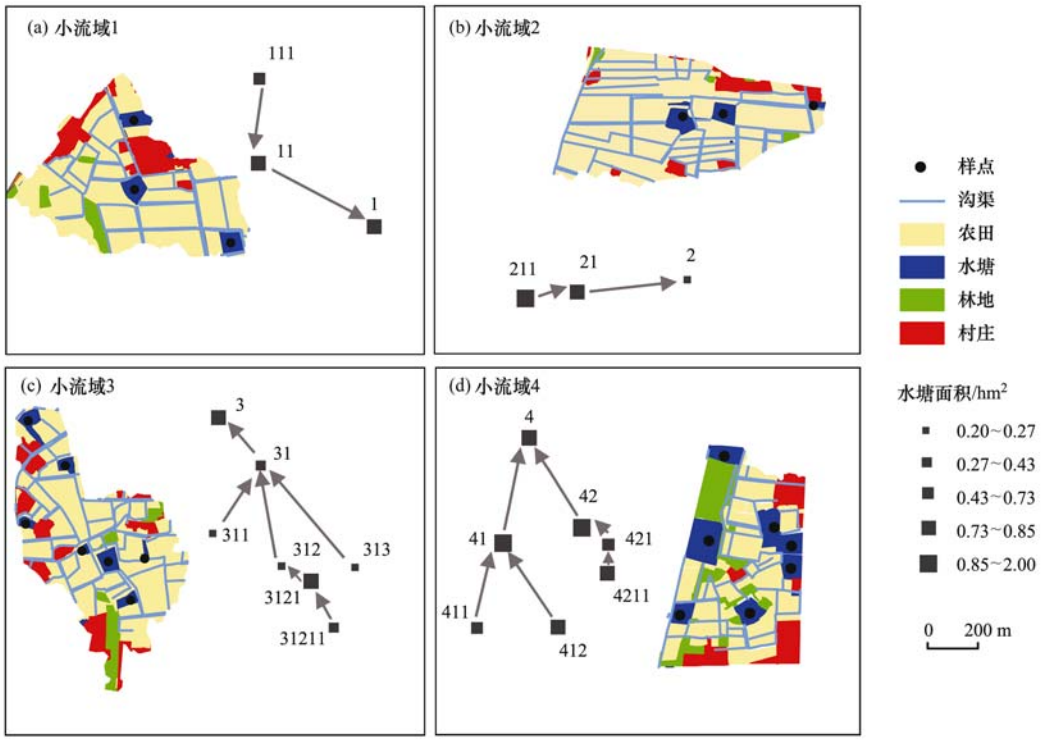
流域编号	林地/%	农田/%	村庄/%	水塘/%	沟渠/%	其他/%	总面积/hm^2
1	5.36	72.37	12.90	6.46	1.13	1.78	37.13
2	1.56	78.24	7.09	5.85	6.35	0.91	39.66
3	6.44	68.68	14.24	8.44	1.68	0.51	37.42
4	17.83	48.77	12.68	17.40	1.39	1.92	39.59

小流域 1 和小流域 2 中都有 3 个水塘，且按串联的方式排列. 小流域 3 和 4 中的水塘数量都是 7 个，按串并联的方式排列. 小流域 1 中的水塘面积差异较小，而小流域 2 中的水塘面积差异较大. 与小流域 3 相比，小流域 4 中的水塘面积较大，且分布相对集中(图 2).

由多水塘系统网络结构分析结果可见(表 2)，小流域 2 和 3 的沟渠长度、密度、沟渠条数及沟渠节点数均大于小流域 1 和 4. 总体而言，小流域 2 和 3 中的多水塘系统网络复杂程度大于小流域 1 和 4. 就沟渠网络环度和连接度而言，小流域 2 的网络环度和连接度最大，其他 3 个小流域的网络环度和连接度差别不大.

2.2　降雨前后水质变化情况

由表 3 可见，降雨前，小流域 1 中的硝氮浓度明显高于其他3个小流域，小流域2中的氨氮浓度



水塘样点编号是根据其溢流过程中上下游关系及分支特征确定，图中箭头表示水塘溢流方向

图 2 水塘样点分布及其小流域内景观结构特征

Fig. 2 Sample point locations and land use in the four sub-watersheds

表 2 小流域内多水塘系统网络特征

Table 2 Characteristics of the multi-ponds in the four sub-watersheds

流域编号	沟渠密度 /m·hm^{-2}	沟渠长度 /km	水塘数量	环度	沟渠条数	沟渠节点数	连接度
1	183.15	6.80	3	−0.01	70	72	0.33
2	249.74	9.90	3	0.11	109	91	0.41
3	236.07	8.83	7	0.00	114	114	0.34
4	155.34	6.15	7	0.01	61	61	0.34

明显低于其他 3 个小流域，总氮浓度在 4 个小流域中差别不大. 降雨后，硝氮的浓度在小流域 2 中最低，氨氮和总氮浓度在 4 个小流域中差别不大. 降雨之前，4 个小流域中 TN 浓度相差不大，降雨后 4 个小流域内水塘硝氮、氨氮和总氮都有显著增加($P<0.05$)，其中小流域 3 中 TN 浓度增加最大. 总体而言，小流域 3 中，氮浓度增加幅度最大. 小流域 3 内硝氮浓度增加幅度最大，从 1.39 mg·L^{-1}增加到 4.39 mg·L^{-1}；小流域 4 次之，硝氮浓度从 1.58 mg·L^{-1}增加到 3.87 mg·L^{-1}；小流域 2 中氨氮浓度增加最多，从 0.21 mg·L^{-1}增加到 1.19 mg·L^{-1}.

在 4 个小流域中，从上游到下游，水塘氮浓度总体呈现逐渐升高的趋势(图 3). 其中，趋势较为明显的是小流域 3，小流域 4 中的水塘从上游到下游，氮浓度呈波动变化特征. 总体而言，水塘总氮

表 3 4 个小流域雨前雨后水塘平均氮浓度的变化[1)]

Table 3 Average concentration of nitrogen in the four sub-watersheds

流域编号	雨前平均氮浓度/mg·L^{-1}			雨后平均氮浓度/mg·L^{-1}		
	NO_3^--N	NH_4^+-N	TN	NO_3^--N	NH_4^+-N	TN
1	2.01±0.39Aa	0.36±0.12Ba	3.66±0.82Aa	3.89±0.87Bb	0.76±0.13Bb	7.53±1.58Bb
2	1.06±0.23Ba	0.21±0.04Ca	3.17±0.89Aa	2.36±0.69Cb	1.19±0.35Ab	6.36±1.69Bb
3	1.39±0.39Ba	0.42±0.13Ba	3.43±0.76Aa	4.39±1.00Ab	1.23±0.33Ab	9.19±2.50Ab
4	1.58±0.35Ba	0.62±0.12Aa	3.36±0.74Aa	3.87±0.77Bb	1.06±0.22Ab	7.62±1.81Bb

1)同列不同大写字母表示不同流域氮浓度的差异显著($P<0.05$)；同行不同小写字母表示降雨前后氮浓度差异显著($P<0.05$)

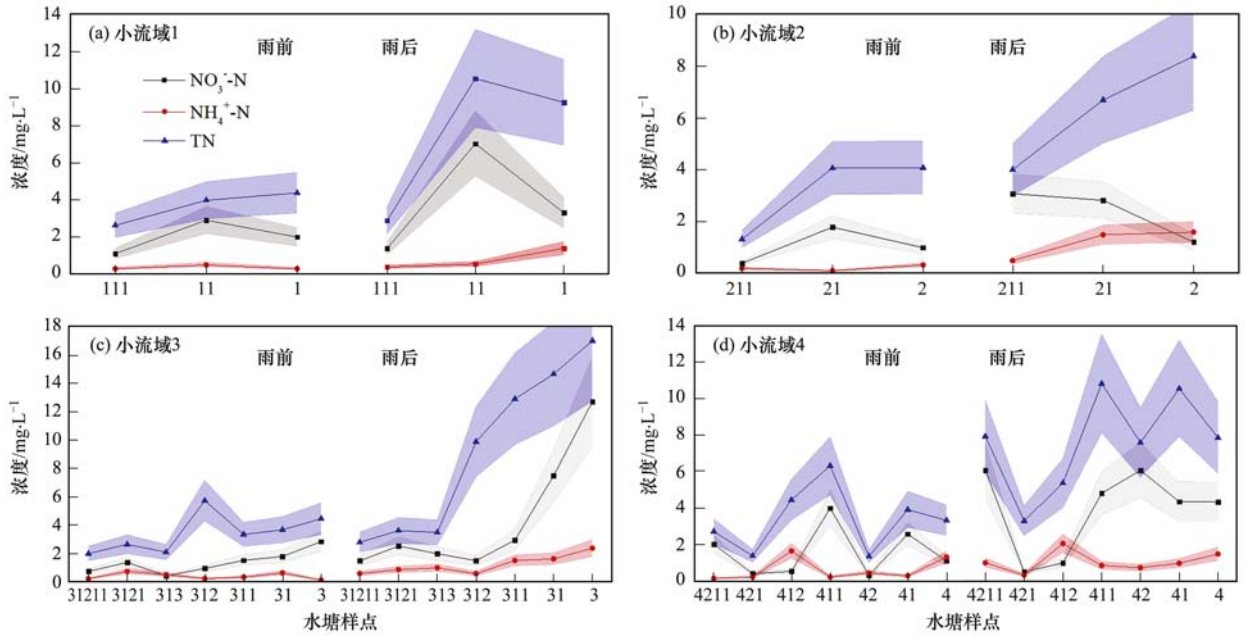


图 3　4 个小流域内水塘从上游到下游NH_4^+-N、NO_3^--N和 TN 在雨前、雨后的变化情况

Fig. 3　Change in ammonium (NH_4^+-N), nitrate (NO_3^--N) and total nitrogen (TN) concentrations (maximum, average, and minimum) after rainfall

和硝氮浓度变化趋势较为一致，氨氮变化与两者之间的一致性较差.

2.3　氮的截留量和截留率分析

由表 4 可知，在小流域 3 中氮的截留率最高，硝氮、氨氮和总氮的截留率分别为 58.57%、52.26% 和52.23%；小流域1的氮的截留率最低，硝氮、氨氮和总氮的截留率分别为 39.01%、36.41% 和 40.99%. 在 4 个小流域中，小流域 4 的截留量最大，根据水塘的库容量计算出硝氮、氨氮和总氮的截留量分别为 172.48、28.70 和 324.43 kg；小流域 2 中水塘氮的截留量最小，硝氮、氨氮和总氮的截留量分别为 39.45、12.92 和 56.10 kg.

表 4　4 个小流域对氮的截留率和截留量

Table 4　Average retention efficiency and mass of nitrogen in the four sub-watersheds

流域编号	平均截留率/%			截留量/kg		
	NO_3^--N	NH_4^+-N	TN	NO_3^--N	NH_4^+-N	TN
1	39.01	36.41	40.99	71.14	16.05	150.85
2	46.73	76.58	52.32	39.45	12.92	56.10
3	58.57	52.26	52.23	93.45	22.82	174.57
4	50.53	45.77	54.82	172.48	28.70	324.43

每个小流域内，从上游到下游的水塘氮的截留率和截留量见图 4. 结果表明，由于截留量跟水塘的面积和深度有关系，因此具有较高截留率的水塘不一定具有较高的截留量. 在小流域 1 内，氮的截留率在 7.22% ~79.35% 之间；小流域 2 中，氮的截留率在 16.75% ~92.63% 之间；在小流域 3 中，氮的截留率在 14.0% ~93.94% 之间；小流域 4 中，氮的截留率在 12.01% ~94.58% 之间. 在小流域 1、2 和 3 中，氨氮截留率的变化幅度大于硝氮和总氮的变化幅度. 小流域 4 中硝氮截留率的变化幅度最大. 从截留量的角度来讲，在小流域 1 中，上游水塘对总氮的截留率较低，只有 1.18 kg，但是在中游和下游，水塘的截留量达到了 82.86 kg 和 66.81 kg. 在小流域 2 中，上游水塘总氮的截留量(34.09 kg)大于下游水塘的截留量(9.66 kg). 在小流域 3 和 4 中，下游水塘的截留量大于上游水塘的截留量.

2.4　水塘自身特征与氮截留的关系

多水塘系统氮的去除效果不仅跟其系统结构和流域景观特征关系密切，还跟水塘自身的面积、水深、库容、形状和植被覆盖度有关. 水塘自身特征影响氮元素在水塘内的迁移和转化，尤其是水塘中的水生植物，其对水塘中氮的截留去除率达到

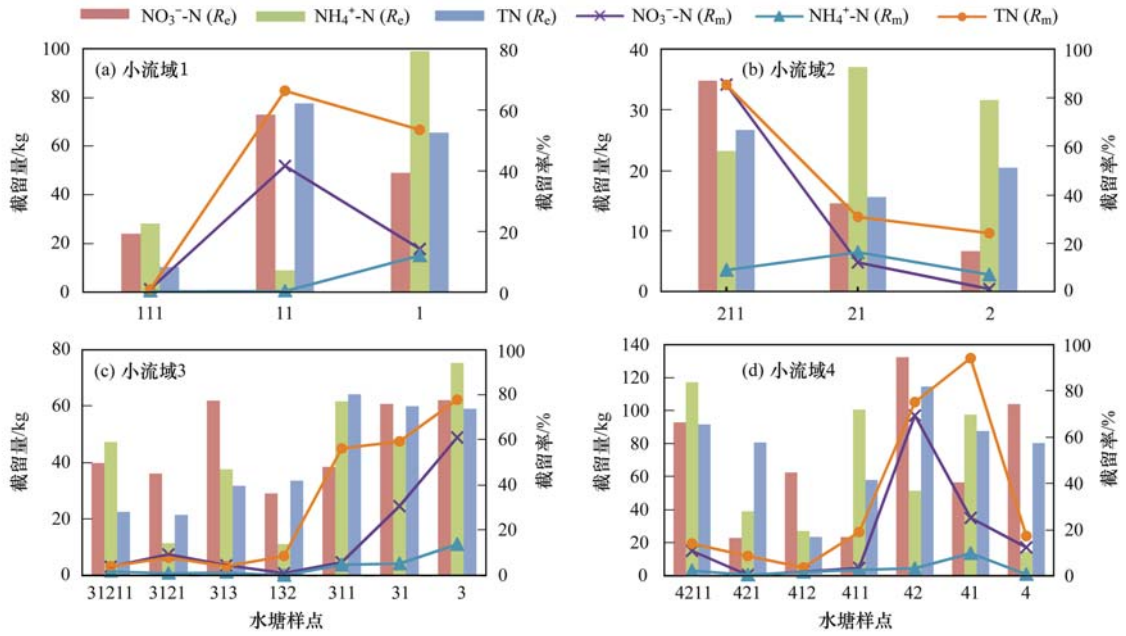


图 4 小流域内水塘氮截留量和截留率的空间差异

Fig. 4 Nitrogen concentration retention efficiency and mass retention in the four sub-watersheds

25%[21]. 根据本文研究结果，利用 Pearson 对水塘自身特征和氮截留关系进行相关分析可知(表 5)，水塘的面积和库容跟氮截留量密切相关，水塘深度跟 TN 截留量呈 0.05 水平上的显著相关. 另外，水塘内水生植被的覆盖度与硝氮截留率相关性显著($P<0.05$).

表 5 水塘自身特征跟氮截留之间的关系[1)]

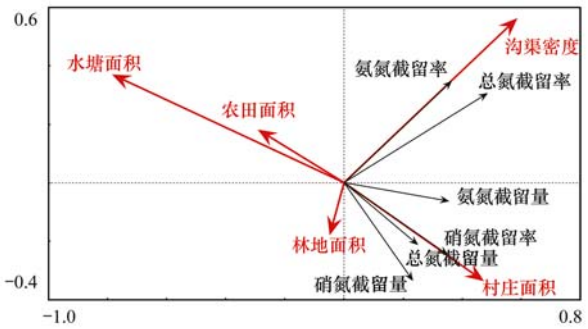
Table 5 Relationship between the characteristics of ponds and nitrogen retention

项目	水塘面积	水塘深度	水塘库容	水塘周长	水塘形状指数	植被覆盖度
NO_3^--N 截留率	0.233	0.074	0.234	0.315	0.090	0.486 *
NH_4^+-N 截留率	0.044	−0.056	−0.029	−0.145	−0.083	0.014
TN 截留率	0.240	0.273	0.336	0.197	0.083	0.236
NO_3^--N 截留量	0.591 **	0.306	0.691 **	0.259	−0.061	0.309
NH_4^+-N 截留量	0.512 *	0.262	0.537 *	−0.005	−0.215	−0.083
TN 截留量	0.717 **	0.459 *	0.841 **	0.138	−0.186	0.120

1) * * 表示在 0.01 水平上显著相关；* 表示在 0.05 水平上显著相关

2.5 土地利用与水塘对氮截留之间的关系

由于不同土地利用类型所产生的地表径流中氮含量差别明显，菜地中氮的流失量明显高于农田中氮的流失量[22, 23]. 因此，本研究分析不同的土地利用类型对水塘氮截留能力的影响. 选择流域内水塘、农田、村庄、林地面积及沟渠密度作为氮截留的关系因子，通过 RDA 分析以上因子与水塘氮截留能力之间的关系，其结果见图 5. 第一、二轴的解释率为 79.3%，其中第一轴的解释率为 45.3%. 从中可知，氮的截留率和沟渠的密度有关系，沟渠密度越大，水塘截留率就越大. 沟渠是污染物输送的通道，沟渠密度越大，污染物输送通道越顺畅，水塘对污染物的截留率就越大. 另外，村庄面积的大小跟氮截留量关系密切，村庄面积越大，其截留量也越大. 村庄面积越大，生活污水越多，所产生的污染负荷越大，而这些污染物大部分被水塘截



红色箭头表示氮截留率和截留量的关系因子

图 5 土地利用结构和氮截留能力的典范分析

Fig. 5 Redundancy analyses of land-use structure and nitrogen retention efficiency and mass

留[7]，因此，水塘的截留量就越大. 与表 5 中两两相关分析不同的是水塘面积因子在与其他关系因子的相互作用下，跟氮的截留能力呈负相关关系.

3　结论

(1)小流域 3 中的多水塘系统所占面积最大，约为其小流域面积的 18.79%，而小流域 1 中多水塘系统所占面积最小，约为小流域面积的 7.58%. 而从沟渠网络特征而言，小流域 2 的沟渠网络特征最为复杂，表现在沟渠密度、长度、环度、沟渠条数和连接度等方面.

(2)降雨前后，小流域 3 中水塘硝氮和总氮的浓度增加最快，分别增加了 3.33 $mg\cdot L^{-1}$ 和 8.13 $mg\cdot L^{-1}$；小流域 1 的水塘中氨氮浓度增加幅度最大，约为 0.4 $mg\cdot L^{-1}$. 就截留率而言，小流域 3 对硝氮的截留率最高，达到 58.57%，小流域 2 对氨氮的截留率最高，达到 76.58%，小流域 4 对总氮的截留率最高达到 54.82%. 但是，从截留量而言，小流域 4 对硝氮、氨氮和总氮的截留量均最大，分别为 172.48、28.7 和 324.43 kg. 小流域 2 的截留量最低.

(3)水塘对氮截留能力的差异跟土地利用类型和水塘自身的特征关系密切. 在相同面积的流域内，水塘数量多的流域对氮的截留量明显高于水塘数量少的流域. 水塘对氮的截留能力受到水塘面积和沟渠密度的影响强烈，另外还跟水塘自身水生植被覆盖度有关.

(4)总体而言，多水塘系统对氮的截留率在 50%左右，水塘自身结构特征在一定程度上决定其截留能力的大小. 因此，为了能够更大程度地截留区域面源污染，在农村多水塘系统管理和规划的过程中，应更多地关注水塘面积、排列方式、沟渠密度、水生植物盖度等因素，提高其截留能力.

参考文献：

[1] McIsaac G F, Libra R D. Revisiting nitrate concentrations in the Des Moines River[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(6): 2280-2289.

[2] 于峰, 史正涛, 彭海英. 农业非点源污染研究综述[J]. 环境科学与管理, 2008, **33**(8): 54-58, 65.
Yu F, Shi Z T, Peng H Y. The summary of the study on agricultural non-point source pollution [J]. Environmental Science and Management, 2008, **33**(8): 54-58, 65.

[3] 李强坤, 胡亚伟, 宋常吉, 等. 农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2973-2978.
Li Q K, Hu Y W, Song C J, *et al*. Distribution characteristics of solute nitrogen in the water-sediment of farmland drainage Ditch [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2973-2978.

[4] Prokopy L S, Floress K, Klotthor-Weinkauf D, *et al*. Determinants of agricultural best management practice adoption: evidence from the literature [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **63**(5): 300-311.

[5] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4516-4522.
Zhang S N, Xiao R L, Liu F, *et al*. Interception Effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4516-4522.

[6] Quin A, Jaramillo F, Destouni G. Dissecting the ecosystem service of large-scale pollutant retention: the role of wetlands and other landscape features[J]. AMBIO, 2015, **44**(S1): 127-137.

[7] Logan T J. Agricultural best management practices for water pollution control: current issues[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1993, **46**(1-4): 223-231.

[8] 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 等. 坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3262-3268.
Li H Z, Chen K L, Wei Z, *et al*. Agricultural non-point source pollutants removal by enhanced riverbank interception facilities under different operating conditions[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3262-3268.

[9] Vymazal J. The use of constructed wetlands for nitrogen removal from agricultural drainage: a review[J]. Scientia Agriculturae Bohemica, 2017, **48**(2): 82-91.

[10] 刘兴土. 我国湿地的主要生态问题及治理对策[J]. 湿地科学与管理, 2007, **3**(1): 18-22.
Liu X T. Main ecological problems of wetlands in China and their countermeasures[J]. Wetland Science & Management, 2007, **3**(1): 18-22.

[11] Yin C Q, Zhao M, Jin W G, *et al*. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China [J]. Hydrobiologia, 1993, **251**(1-3): 321-329.

[12] 姜翠玲, 崔广柏, 范晓秋, 等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 125-128.
Jiang C L, Cui G B, Fan X Q, *et al*. Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants [J]. Environmental Science, 2004, **25**(2): 125-128.

[13] Yin C Q, Shmn B Q. Multipond systems: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2001, **30**(6): 369-375.

[14] Yan W J, Yin C Q, Tang H X. Nutrient retention by multipond systems: mechanisms for the control of nonpoint source pollution [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(5): 1009-1017.

[15] 彭世彰, 熊玉江, 罗玉峰, 等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. 水利学报, 2013, **44**(6): 657-663.
Peng S Z, Xiong Y J, Luo Y F, *et al*. The effect of paddy eco-ditch and wetland system on nitrogen and phosphorus pollutants reduction in drainage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(6): 657-663.

[16] Ayaz S Ç, Aktaş Ö, Fındık N, *et al*. Effect of recirculation on

nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system[J]. Ecological Engineering, 2012, **40**: 1-5.

[17] 夏品华, 孔祥量, 喻理飞. 草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2983-2989.
Xia P H, Kong X L, Yu L F. Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2983-2989.

[18] 皋鹏飞, 李玉凤, 刘红玉, 等. 水塘系统的水源涵养贡献力评估——以风岭流域为例[J]. 地理与地理信息科学, 2016, **32**(6): 94-100.
Gao P F, Li Y F, Liu H Y, *et al*. Evaluation on the contribution capacity of water conservation of pond system: a case study of Fengling watershed [J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, **32**(6): 94-100.

[19] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Wu J G. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy (2nd ed.)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.

[20] Chen L, Liu F, Wang Y, *et al*. Nitrogen removal in an ecological ditch receiving agricultural drainage in subtropical central China[J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 487-492.

[21] 姜凯. 水塘湿地截留和净化农业面源污染物特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
Jiang K. Study on retention and purification effect of N and P in pond wetlands[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.

[22] 向速林. 赣江流域农田地表径流氮磷迁移与流失研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(7): 1204-1207.
Xiang S L. Nitrogen and phosphorus migration and loss of surface runoff in Ganjiang river watershed [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(7): 1204-1207.

[23] 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 等. 南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2920-2927.
Cai C X, Liu H Y, Li Y F, *et al*. Research on the influence of urban land use structure and pattern on nitrogen, phosphorus of wetland water environment in Xianlin new town of Nanjing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 2920-2927.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 11

Nov. 15, 2018

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO_x from Cement Industry ····· JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, *et al.* (4841)

Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to $PM_{2.5}$ Pollution in Lanzhou City ····· GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, *et al.* (4849)

Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing ····· DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, *et al.* (4858)

Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou ····· ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, *et al.* (4866)

Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in $PM_{2.5}$ from Heze City in Winter ····· MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, *et al.* (4876)

Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China ····· WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, *et al.* (4885)

VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing ····· HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, *et al.* (4892)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai ····· SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, *et al.* (4901)

Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process ····· YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, *et al.* (4909)

Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu ··· SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, *et al.* (4915)

Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers ····· HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, *et al.* (4925)

Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms ····· PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, *et al.* (4938)

Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level ····· CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, *et al.* (4946)

Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay ····· BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, *et al.* (4956)

Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}N$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin ····· TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, *et al.* (4964)

Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan ····· GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, *et al.* (4972)

Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin ····· ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, *et al.* (4981)

Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area ····· XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, *et al.* (4991)

Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds ····· LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, *et al.* (4999)

Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China ····· LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)

Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions ····· GE De, ZHANG Shou-hong (5015)

Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite ····· WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, *et al.* (5024)

Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions ····· BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, *et al.* (5036)

Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System ····· ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, *et al.* (5043)

N_2O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology ····· YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, *et al.* (5051)

Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification ····· AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, *et al.* (5058)

Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage ····· YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, *et al.* (5065)

Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant ····· LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, *et al.* (5074)

Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics ····· TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, *et al.* (5081)

Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant ····· ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, *et al.* (5090)

Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N_2O Release of Granular Sludge CANON Reactor ····· FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, *et al.* (5101)

Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis ····· FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, *et al.* (5108)

Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing ····· WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, *et al.* (5116)

Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China ····· LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, *et al.* (5127)

Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City ····· YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, *et al.* (5135)

Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO_2 ····· YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, *et al.* (5142)

Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou ····· SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, *et al.* (5151)

Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil ····· WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, *et al.* (5163)

Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency ····· YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, *et al.* (5170)

Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice ····· GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)

Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers ····· CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, *et al.* (5189)

Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties ····· LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, *et al.* (5198)

Intercropping *Arundo donax* with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil ····· ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, *et al.* (5207)

Daily Variation of CO_2 Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir ····· LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)

CH_4 Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake ····· SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, *et al.* (5227)

Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland ····· SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, *et al.* (5237)

Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field ··· LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, *et al.* (5246)

Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review ····· FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)

Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods ····· DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)

Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment ····· ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)