

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究

周静雯¹, 苏保林^{1*}, 黄宁波², 管毓堂¹, 赵堃¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 陕西黄河生态工程有限公司, 西安 710000)

摘要: 为探讨不同灌溉模式下水稻田的产流规律和污染状况, 为水稻灌区的农田水管理提供科学依据, 本研究在常州市金坛和溧阳两地的野外水稻田开展非点源污染源试验, 分别采用深水淹灌和干湿交替节水灌溉模式。在水稻生长季内, 通过安装水位计和雨量计采集田面水水位和降雨信息, 针对两种灌溉模式采取不同的方法计算径流量和氮磷流失负荷。结果表明, 深水淹灌模式下, 27 场次降雨下有 5 场产生出流, 还有 1 次人工排水造成了非点源污染, 该灌溉模式下水稻田 TN 输出系数为 $49.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TP 输出系数为 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 干湿交替节水灌溉模式下, 最大降雨量达到 95.1 mm 时仍未发生产流。水稻田产流受到水稻需水量和灌排措施的影响, 与田面水水位、降雨量和最低田埂高度直接相关; 相较于传统的淹灌模式, 干湿交替节水灌溉模式能明显减低由于降雨或者人工排水造成的非点源污染。

关键词: 水稻田; 降雨; 灌溉模式; 径流量; 非点源污染

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0963-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.022

Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns

ZHOU Jing-wen¹, SU Bao-lin^{1*}, HUANG Ning-bo², GUAN Yu-tang¹, ZHAO Kun¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. The Yellow River Ecological Engineering of Shaanxi Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: To study runoff and non-point source pollution of paddy fields and to provide a scientific basis for agricultural water management of paddy fields, paddy plots in the Jintan City and the Liyang City were chosen for experiments on non-point source pollution, and flood irrigation and intermittent irrigation patterns were adopted in this research. The surface water level and rainfall were observed during the growing season of paddies, and the runoff amount from paddy plots and loads of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were calculated by different methods. The results showed that only five rain events of totally 27 rainfalls and one artificially drainage formed non-point source pollution from flood irrigated paddy plot, which resulted in a TN export coefficient of $49.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and a TP export coefficient of $1.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. No any runoff event occurred from the paddy plot with intermittent irrigation even in the case of maximum rainfall of 95.1 mm. Runoff from paddy fields was affected by water demands of paddies and irrigation or drainage management, which was directly correlated to surface water level, rainfall amount and the lowest ridge height of outlets. Compared with the flood irrigation, intermittent irrigation could significantly reduce non-point source pollution caused by rainfall or artificial drainage.

Key words: paddy field; rainfall; irrigation pattern; runoff; non-point pollution

中国是水稻种植大国, 水稻总产量居世界排名首位, 占全球总产量的 34%^[1], 种植面积约占全球的 32%^[2]。为提高水稻产量, 部分灌区过量施用化肥和农药, 除少部分被水稻吸收外, 大部分通过气态损失、淋溶或者地表径流等方式流失到环境中, 对大气和水体环境造成污染^[3-8], 特别是在施肥初期或者雨季, 氮磷流失量最大^[9]。近几年, 有关水稻田地表径流的观测试验有很多, 大多采用径流池法或同步观测法。径流池法需要建造有一定容积的径流池并保证出水口唯一, 更多应用于试验站或试验小区观测, 同步观测法需要水量水质监测仪器, 同时也要保证出水口固定且唯一^[10-13], 对于出水口不固定的野外水稻田的观测试验较少。另外, 有很多学者对节水灌溉模式进行了研究,

从宏观上探讨了节水灌溉模式对水稻产量以及环境的影响, 但有关场次降雨下水稻田的径流流失过程研究还较少^[14-17]。

本文试采用同步监测水位和雨量的方法, 对两种不同灌溉模式的水稻田进行 1 a 的试验研究, 通过水位变化过程线来计算水稻田蒸散发和渗漏损失量, 结合降雨信息以及水稻田的田埂高度来判断产流情况, 以期对水稻田的水肥管理提供科学依据。

收稿日期: 2015-08-26; 修订日期: 2015-11-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07501005); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 周静雯 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为非点源污染, E-mail: zhoujingwen0720@126.com

* 通讯联系人, E-mail: subl@bnu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验点位于江苏省常州市,常州地处长江下游南岸,太湖流域水网平原,是长江三角洲中心地带.常州市辖5个市辖区(天宁区、钟楼区、戚墅堰区、新北区、武进区),代管2个县级市(溧阳市、金坛市).常州属于北亚热带季风性湿润气候,气候温和湿润,四季分明,雨量充沛,年平均气温 15.4°C ,降雨量 $1\,071.5\text{ mm}$,雨日 127.5 d ,日照时间 $2\,047.5\text{ h}$,无霜期 227.6 d ^[18,19].

试验分别选取了金坛和溧阳两地的野外水稻田进行观测试验.溧阳水稻田位于 $31.473\,61^{\circ}\text{N}$, $119.450\,20^{\circ}\text{E}$,田块面积约 900 m^2 ,灌溉模式为深水淹灌,除晒田期以外,田间均保持较高蓄水层,在 30 mm 以上;金坛水稻田位于 $31.730\,05^{\circ}\text{N}$, $119.500\,92^{\circ}\text{E}$,田块面积约 866.67 m^2 ,灌溉模式为干湿交替节水灌溉,稻田灌一次水后经过水层变浅、无水层、田面湿润后干田的过程再进行下一次灌水,两次淹水之间,田间维持一段无水层土壤湿润状态.除灌溉模式不同外,试验田其他管理措施基本一致:在6月下旬插秧,9月中旬后停止机械灌溉,11月中旬收割;底肥施用复合肥和尿素,后期进行2~3次追肥.其中,复合肥配方为48%(氮、磷、钾:16%、16%、16%).

1.2 试验方法

水稻生长期需要采集田面水水位信息和降雨信息.在稻田内靠近田埂处安装L99-WL水位自动记录仪,仪器探头距离底部淤泥约 20 mm 处,定期检测以防止探头被阻塞而影响记录,设定仪器记录间隔为 30 min ;在每个试验田附近安装雨量计1台,采集降雨过程数据,设定仪器记录间隔为 10 min .

水稻插秧后,自2014年6月24日至2014年10月10日,共 110 d ,两块试验田每隔 3 d 均采集1次水样,每块田共采集28次水样.每次采集水样后,在 24 h 内送回实验室进行氮、磷形态(包括总氮、氨氮、硝态氮、总磷、无机磷)的测定.具体方法为:总氮含量的测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,氨氮含量的测定采用纳氏试剂比色法,硝态氮含量的测定采用酚二磺酸比色法;总磷含量的测定采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法;无机磷测定采用抗坏血酸还原-磷钼蓝比色法^[20].

1.3 数据分析

1.3.1 蒸散发和渗漏损失计算

水稻生长期记录的水位变化曲线能很好地反映水稻田的水量变化,进行人工灌溉或者人工调节水位排水时,水位曲线出现拐点,随后水位上升或者显著下降(图1);降雨时,若降雨持续一段时间,降雨补充田面水,田面水增加量超过蒸散发和渗漏损失量,水位呈现上升趋势(图2),降雨停止后,水位呈现下降趋势.参考图1和图2中的水位变化趋势,来判断是否有灌溉、降雨或者人工排水,这几种情况下的蒸散发和渗漏损失量无法通过水位变化过程线直接计算,需要根据前后几日的值进行估算.水位曲线中不存在拐点的稳定下降段,其下降趋势是由蒸散发和渗漏损失造成,因此选择这样的水位变化段来计算每日蒸散发和渗漏损失量,灌溉和排水日的蒸散发和渗漏损失量取前后几日的中间值,降雨日取所在生长期内的最低值,若连续几日降雨,以降雨量最高日为最低值,其他几日进行插值计算.

采取干湿交替节水灌溉模式的水稻田,田间水位记录大部分为零,无法通过水位变化曲线计算蒸散发和渗漏损失量,因此该灌溉模式下参考溧阳试验点,根据不同生长期和天气条件进行拟定.本研究将水稻的生长期划分为4个生长阶段:移苗返青

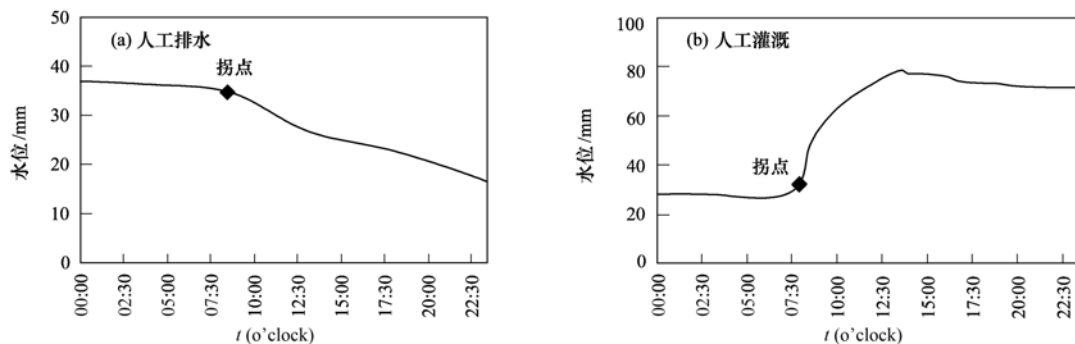


图1 人工灌溉和排水时田面水水位变化

Fig. 1 Hydrograph of paddy plot during artificial irrigation and drainage

期、分蘖期、拔节孕穗期和成熟期,两个试验田的水稻生长状况类似,在同一个生长期因水稻生长所消耗的水量基本相同. 蒸散发和渗漏损失量包括田面水蒸发、植物蒸腾和田面水渗漏,除了受水稻生长状况影响外,还受到天气条件的影响. 韩井先^[21]计算蒸散发时将天气条件分为晴天、阴天和雨天这 3 种类型,以每种天气条件下的蒸散发值来代表当月的平均水平. 因此在本研究中认定,在同种天气条件下,两个试验田的田面水蒸散发值相近.

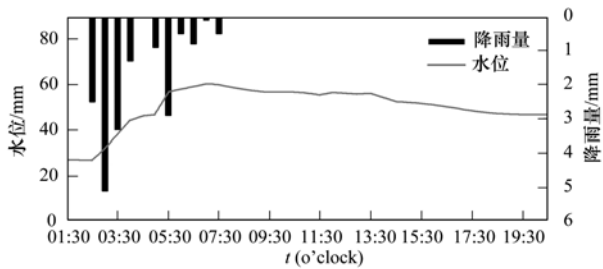


图 2 降雨时农田水位变化

Fig. 2 Hydrograph of paddy plot during precipitation

1.3.2 水稻田产流判断

采取深水淹灌模式的水稻田,根据以下水量平衡关系式,通过降雨量、田面水水位、蒸散发和渗漏损失量计算前后两日零时水位的变化量,由此判断径流流失量.

$$\begin{cases} \Delta R_i = H_i + P_i - (ET_i + F_i) - H_{i+1} \\ R_{out} = \Delta R_i \times S \times 10^{-3} \quad (\Delta R_i \geq 0) \\ R_{in} = -\Delta R_i \times S \times 10^{-3} \quad (\Delta R_i \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΔR_i 为水稻田第 i 日和第 $(i+1)$ 日的农田出水与进水水量之差, mm; H_i 和 H_{i+1} 分别为水稻第 i 日和第 $i+1$ 零时水位, mm; P_i 为第 i 日降雨量, mm; $(ET_i + F_i)$ 为第 i 日的蒸散发和渗漏损失量, mm; S 为试验田面积, m^2 ; R_{out} 为农田出水量, m^3 ; R_{in} 为农田进水量, m^3 .

采取干湿交替节水灌溉模式的水稻田,除去灌

溉前后几日存在田间蓄水层,其他时期内田面处于湿润状态,水位记录为零,田面水实际深度在 20 mm 以下. 在降雨当日,根据下式通过降雨量、田面水水位、最低田埂高度、蒸散发和渗漏损失量来判断产流并计算径流流失量.

$$\begin{cases} \Delta R_j = W_{in} + H_j + P_j - (ET_j + F_j) - H_l \\ R_{out} = \Delta R_j \times S \times 10^{-3} \quad (\Delta R_j > 0) \\ R_{out} = 0 \quad (\Delta R_j \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, ΔR_j 为第 j 场次降雨前后农田水量改变量; W_{in} 为农田进水量, mm; H_j 为第 j 场次降雨前水深, mm; P_j 为第 j 场次降雨总量, mm; $(ET_j + F_j)$ 为第 j 场次降雨期间的蒸散发和渗漏损失量, mm; H_l 为最低田埂高度, mm; S 为试验田面积, m^2 ; R_{out} 为农田出水量, m^3 .

1.3.3 径流污染负荷估算

根据定期测定的水质数据,可以得到氮、磷不同形态的浓度变化曲线. 通过公式判断产流情况后,根据出流日的 TN、TP 等指标的质量浓度来估算出流负荷. 若出流日当天进行了采样,则直接用当日测定值来计算,若出流日未进行采样,则质量浓度值根据前后两次采样的测定值插值计算.

2 结果与讨论

2.1 深水淹灌模式下水稻田径流量

2.1.1 蒸散发和渗漏损失的计算

根据水位变化过程线得到水稻生长期蒸散发和渗漏损失过程线(图 3). 从图 3 中可以看出,在返青期和分蘖期蒸散发和渗漏损失值相近,维持在 3~7 mm 之间;拔节孕穗期较高,最大值达到 15.4 mm;在 9 月 10 日以后,水稻田不进行统一的机械灌水,由农户自行浇灌,从原始水位记录看,共进行了 4 次灌水,分别在 9 月 13 日、9 月 19 日、9 月 23 日和 10 月 5 日,灌水深度在 20 mm 左右,其他日期

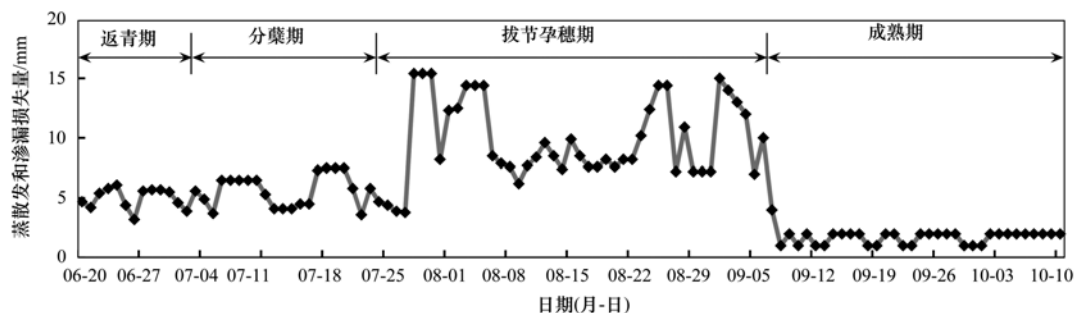


图 3 水稻田蒸散发和渗漏损失量过程线

Fig. 3 Evapotranspiration and infiltration losses hydrograph of paddy field

保持较低水层,该生长期水稻蒸散发和渗漏损失最小. 该变化趋势与叶秀梅^[22]对安徽淠史杭灌区水稻需水量的研究一致,基本符合中间大、两边小的规律.

2.1.2 溧阳水稻田径流流失量

通过公式(1),计算得到整个生长季水稻田径流流失情况(表1).

该灌溉模式下生长季共有27场次降雨,其中5场次造成了径流流失. 6月26日降雨前水位最低,仅46 mm,当日降雨量为64.3 mm,比7月12日和8月27日的降雨量大,但出流量最小,为15.1 mm,降雨发生时,首先用于补充田面水,当田面水达到最低

田埂高度时,才会发生产流,造成径流流失;7月12日的径流量最大,当日降雨量仅高于8月27日降雨,较其他场次要小,但降雨前水位最大,为97 mm. 从几组数据看出,水稻田最低田埂高度在90~110 mm之间. 另外,7月22日进行了排水晒田,排水量为22.1 m³,高于6月26日和8月27日两场降雨造成的径流量. 水稻田在降雨条件下是否产流,首先要达到水量的要求,即降雨量补充田面水并达到最低田埂高度,降雨持续发生,则产生出流;流失量的多少不仅受到降雨量的影响,还受到降雨强度的影响,若降雨强度较大,降雨或农田出流水不断冲刷田埂,可能导致田埂高度的降低,使得出流量增大.

表1 深水淹灌模式下水稻田进出水量

Table 1 Inflow and outflow from paddy field of flood irrigation

日期(月-日)	H_i/mm	P_i/mm	$(ET_i + F_i)/\text{mm}$	$\Delta R_i/\text{mm}$	$R_{\text{out}}/\text{m}^3$	备注
06-26	46.0	64.3	3.2	15.1	13.1	降雨产流
07-12	97.0	51.6	3.5	46.1	40.0	降雨产流
07-22	37.0	0.0	3.6	25.5	22.1	排水晒田
07-27	96.9	68.6	3.8	45.3	39.3	降雨产流
08-27	76.9	51.0	7.2	18.8	16.3	降雨产流
08-31~09-01	68.2	73.4	7.2	37.3	32.3	降雨产流

2.1.3 氮磷流失负荷估算

根据在溧阳试验点定期监测的水质数据得到田面水中不同形态氮磷质量浓度变化曲线(图4),并

结合该曲线值估算得到降雨产流中的氮磷负荷量(表2)和输出系数,输出系数与已有研究进行了比较(表3).

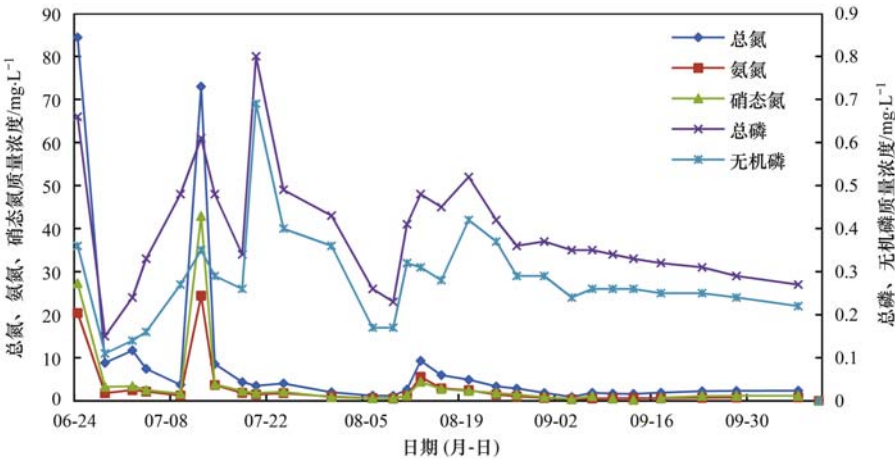


图4 水稻生长季田面水不同形态氮磷浓度

Fig. 4 Nitrogen and phosphorus concentrations of surface water from paddy field during the growing season

表2 水稻田不同形态氮磷流失量

Table 2 Loads of nitrogen and phosphorus from paddy field

日期(月-日)	$R_{\text{out}}/\text{m}^3$	总氮/g	氨氮/g	硝态氮/g	总磷/g	无机磷/g
06-26	13.1	1 104.5	267.0	357.3	8.6	4.7
07-12	40.0	2 915.8	974.9	1 714.0	24.4	14.0
07-22	22.1	77.4	32.5	40.2	17.7	15.2
07-27	39.3	78.1	38.1	32.6	16.9	14.1
08-27	16.3	46.8	16.9	23.8	5.9	4.7
08-31~09-01	32.3	60.1	21.7	28.4	12.0	9.4
合计	163.0	4 282.7	1 351.0	2 196.3	85.4	62.2

表 3 不同观测方法水稻田 TN、TP 输出系数¹⁾

Table 3 Export coefficients of TN and TP from paddy fields obtained by different methods

研究区	观测方法	输出系数/kg·hm ⁻²		文献
		TN	TP	
宁夏黄河灌区	JOHNES 输出系数法模型	19.04	0.07	[23]
江苏宜兴	径流池法	10.73	0.75	[24]
天津宁河县	径流池法	4.77	2.08	[25]
江苏吴江	同步观测法	38.8	0.95	[26]
四川彭州	径流池法	24.11	—	[27]
江苏溧阳	降雨-水位同步观测	49.4	1.00	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据

从表 2 中看出,总氮、氨氮和硝态氮的流失量在 6 月 26 日和 7 月 12 日两日最大,占总负荷量的 90% 以上,主要是由于这两次出流距离施用尿素和复合肥的天数较近. 从图 4 看,在 7 月 22 日之后,氮的各项质量浓度维持在较低水平,仅在 8 月 5 日后有一次峰值出现,质量浓度在 10 mg·L⁻¹ 以下,因此后 4 次出流的负荷流失量较少;磷的各项质量浓度在 7 月维持在较高水平,出现两次峰值,因此 7 月 12 日、7 月 22 日和 7 月 27 日这 3 次出流中磷素的负荷量较大,占总负荷量的 70% 左右. 从表 3 来看,本研究成果得出的输出系数与江苏省吴江市的试验结果相近,两地均是采用了传统的灌溉模式,但由于本试验中的水稻田后期进行了两次追肥,所以 TN、TP 输出系数略高于吴江市,其中 TP 输出系数最高的是天津宁河县,这主要是由于该研究区水稻田基肥中磷含量较高造成,所以,氮磷的流失受到施肥、降

雨、灌溉等的综合影响.

2.2 干湿交替节水灌溉模式下径流流失量

2.2.1 蒸散发和渗漏损失量的计算

本研究中根据降雨量的多少将降雨分成 4 个等级,金坛试验点(干湿交替节水灌溉模式)水稻田的蒸散发和渗漏损失量,其值的拟定参考溧阳试验点(深水淹灌模式). 在每一个生长期内,找到对应等级降雨下溧阳试验点的蒸散发和渗漏损失值,如果参考点没有同等级降雨,则根据已有值进行插值计算. 表 4 中金坛试验点在返青期和拔节孕穗期,4 个降雨等级下均能在溧阳试验点对应找到同类型降雨,蒸散发和渗漏损失直接取相同值;在分蘖期和成熟期,分别只能找到对应等级为 1 和 4 以及等级为 2 和 4 的降雨类型,因此其他两个降雨等级根据已有值进行插值计算.

表 4 干湿交替节水灌溉模式下水稻田蒸散发和渗漏损失量

Table 4 Evapotranspiration and infiltration from paddy field of intermittent irrigation

日期(月-日)	生长期	降雨等级	降雨量/mm	蒸散发和渗漏损失量/mm
06-22 ~ 07-05	返青期	1	< 10	4.7
		2	10 ~ 25	4.2
		3	25 ~ 50	3.9
		4	> 50	3.2
07-06 ~ 07-25	分蘖期	1	< 10	5.3
		2	10 ~ 25	4.9
		3	25 ~ 50	4.5
		4	> 50	4.1
07-26 ~ 09-08	拔节孕穗期	1	< 10	8.5
		2	10 ~ 25	7.9
		3	25 ~ 50	7.4
		4	> 50	6.2
09-09 ~ 10-10	成熟期	1	< 10	2.0
		2	10 ~ 25	1.7
		3	25 ~ 50	1.4
		4	> 50	1.1

2.2.2 金坛水稻田径流流失量

在该种灌溉模式下计算径流流失量,需要两个假设:①降雨时不进行人工灌溉;②人工灌溉不会造成出流. 因此,在公式(2)中, $W_{in}=0$. 水稻插秧前,通过多点测量取平均值,得到 $H_i=170\text{ mm}$. 由

于水位仪探头和水稻田基底有 20 mm 的距离,水位记录仪记录数据为 0 ,实际水深在 $0\sim20\text{ mm}$ 之间,其他水位数据分别加上 20 mm ,即为降雨前水深 H_j .

根据公式进行计算,得到水稻生长期径流流失量(表5).

表5 干湿交替节水灌溉模式下径流流失量

Table 5 Runoff from paddy field of intermittent irrigation

日期(月-日)	W_{in}/mm	H_j/mm	P_j/mm	$(ET_j+F_j)/\text{mm}$	H_i/mm	$\Delta R_j/\text{mm}$	R_{out}/m^3
06-26	0	0 ¹⁾	15.1	4.2	170	-139.1	0
07-04~07-05	0	20.5	95.1	6.4	170	-60.8	0
08-10~08-12	0	0 ¹⁾	5.4	16	170	-160.6	0
08-17~08-18	0	32.9	6.3	16	170	-146.8	0
08-27	0	29.8	5.8	8.5	170	-142.9	0
08-31	0	23.1	5.5	8.5	170	-149.9	0
09-23	0	0 ¹⁾	1.8	2.0	170	-150.2	0
09-29	0	62.6	2.2	2.0	170	-107.2	0

1) 实际水深在 $0\sim20\text{ mm}$ 之间

在该灌溉模式下,水稻生长季共有8场次降雨,均未产生降雨出流. 其中,6月26日、8月10~12日、9月23日,这3场次降雨前水位记录为零,水深在 20 mm 以下,在进行计算时,以最大值 20 mm 代入公式计算. 该试验点在整个生长季内降雨量较少,最大的一场降雨为 95.1 mm ,但降雨前水深为 20.5 mm ,没有产生出流. ΔR_j 均为负值,说明没有造成径流流失,若降雨前水位较高或者降雨量增大,也有可能造成出流,但是采取干湿交替节水灌溉模式可明显减少径流发生的强度和次数,这与茅国芳等^[28]的研究一致,在满足作物对水需求的条件下,通过合理灌溉来控制农田肥料的流失,施肥时采取浅层灌水,灌水结束后填高出水口高度,可大大减少肥料的直接流失.

3 结论

(1)降雨条件下,降雨补充田面水,当水位达到水稻田最低田埂高度并持续降雨时,会发生产流,造成农田氮磷流失. 径流量的多少受到降雨量和降雨强度的影响,径流量随着降雨量的增大而增大,若降雨强度较大时,可能通过改变最低田埂高度而增大径流量.

(2)采取深水淹灌模式的水稻田,当降雨量达到 50 mm 以上时,极易产生径流,造成氮磷负荷的流失,干湿交替节水灌溉模式下,降雨量达到 90 mm 时,仍未产生径流流失. 相较于传统的深水淹灌模式,干湿交替节水灌溉模式可以明显减少由于降雨造成的农田地表径流,降低对水环境的污染.

(3)通过降雨-水位同步观测的方法来观测水稻田径流流失情况,该方法在野外水稻田的观测中是切实可行的,但在判断产流时需要根据不同的灌溉模式采取不同的计算方法.

参考文献:

[1] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 5-48.

[2] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.

[3] 岳玉波, 沙之敏, 赵峥, 等. 不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1424-1432.

[4] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. Agricultural Water Management, 2014, 141: 66-73.

[5] 张忠明, 周立军, 宋明顺, 等. 太湖苕溪流域农业面源污染评价及对策[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(3): 105-109.

[6] 汪玉, 赵旭, 王磊, 等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 829-835.

[7] 宋立芳, 王毅, 吴金水, 等. 水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 150-156.

[8] 赵佐平. 汉江上游主要农作物氮肥投入特点及土壤养分负荷分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2861-2868.

[9] 张志剑, 王珂, 朱荫渭, 等. 水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1): 55-57.

[10] 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.

- [11] 向速林, 王逢武, 陶术平, 等. 赣江下游水稻田地表径流氮磷流失分析[J]. 江苏农业科学, 2015, **43**(1): 315-317.
- [12] 张亚莉, 陈德州, 徐梅宣, 等. 施肥量和降雨对水稻田氮流失影响的试验研究[J]. 现代农业装备, 2015, (2): 32-36.
- [13] Nakano Y, Miyazaki A, Yoshida T, *et al.* A study on pesticide runoff from paddy fields to a river in rural region—1: field survey of pesticide runoff in the Kozakura River, Japan [J]. Water Research, 2004, **38**(13): 3017-3022.
- [14] 朱士江, 孙爱华, 张忠学, 等. 节水灌溉条件下水稻生长季降雨利用率的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, **32**(5): 11-13, 37.
- [15] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(5): 1381-1387.
- [16] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 62-66.
- [17] 董斌, 崔远来, 李远华. 水稻灌区节水灌溉的尺度效应[J]. 水科学进展, 2005, **16**(6): 834-839.
- [18] 阳文锐, 李锋, 王如松, 等. 城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例[J]. 生态学报, 2013, **33**(14): 4486-4494.
- [19] 岳强, 范亚民, 杨浩明, 等. 危险废物填埋场废水处理工艺设计[J]. 环境卫生工程, 2009, **17**(3): 53-55, 58.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 韩井先. 计算蒸发量蒸散发能力的改进方法[J]. 东北水利水电, 2004, **22**(237): 7-8.
- [22] 叶秀梅. 溧史杭灌区 2013 年中稻需水量试验研究[J]. 江淮水利科技, 2014, (4): 47-48.
- [23] 杨引禄, 冯永忠, 杨世琦, 等. 宁夏黄河灌区农业非点源污染损失估算[J]. 干旱地区农业研究, 2011, **29**(1): 242-246.
- [24] 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流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(4): 21-25.
- [25] 陈颖, 赵磊, 杨勇, 等. 海河流域水稻田氮磷地表径流流失特征初探[J]. 农业环境科学学报 2011, **30**(2): 328-333.
- [26] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(4): 495-500.
- [27] 邢立文, 魏新平, 王龙, 等. 彭州市丹景山镇典型农作物输出系数研究[J]. 中国农村水利水电, 2012, (8): 58-61.
- [28] 茅国芳, 陆敏, 黄明蔚, 等. 稻麦轮作农田氮素流失及控制对策研究[J]. 上海农业学报 2006, **22**(4): 86-92.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行