

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响

罗芳^{1,2,3}, 鲁伦慧^{2,3*}, 李哲^{2,3}, 韦方强^{2,3}

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714; 3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 水库水环境重点实验室, 重庆 400714)

摘要: 三峡水库低水位运行时, 消落带由于落干期与作物生长期重叠, 常被近岸农民开垦利用, 然而传统的农业种植可能会影响库区水环境。为对比农耕和弃耕的水环境效应, 选择一级支流澎溪河库湾消落带为研究区域, 以玉米、土豆和花生地为研究对象, 选择农耕期(2018年3~9月)和退耕期(2019年3~9月)对农耕地和弃耕地土壤各氮、磷形态含量进行研究, 同时构建了农耕地与弃耕地氮、磷平衡模型, 比较分析农耕和弃耕状态下土壤氮、磷收支特征及其流失风险。结果表明, 玉米地土壤氮、全磷和无机磷含量在不同种植期差异显著; 农耕地的氨氮和硝态氮的含量显著高于弃耕地, 全磷、无机磷和钙结合态磷的含量显著低于弃耕地; 土壤氮、磷盈余量大小顺序为玉米 > 土豆 > 花生, 分别是 76.89、51.92 和 43.74 kg·hm⁻² 以及 79.69、75.76 和 17.78 kg·hm⁻², 整体上, 3 种作物用地氮、磷盈余量大于流失风险值, 研究区农耕地氮、磷污染潜势呈现。综上可知, 消落带农业耕作将迫使氮、磷流失风险加剧, 不利于水环境保护。

关键词: 三峡水库(TGR); 消落带; 农业耕作; 水环境; 氮、磷平衡模型

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3763-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012092

Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir

LUO Fang^{1,2,3}, LU Lun-hui^{2,3*}, LI Zhe^{2,3}, WEI Fang-qiang^{2,3}

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: As the Three Gorges Reservoir (TGR) periodically operates at low water levels, its drawdown area has been utilized for cultivation by local farmers due to the overlap of the non-inundated period and the crop-growth period. However, traditional agricultural planting may affect the aquatic environment of the TGR area. To explain the effects of agricultural farming and abandoned farming on the water environment, a study was conducted in the drawdown area in an embayment of the Pengxi River (a tributary of the TGR). Corn, potato, and peanut fields were investigated for nitrogen and phosphorus content in surface soil, during the farming period (March to September 2018) and the conversion period (March to September 2019). Nitrogen and phosphorus balance models were constructed for farmland and abandoned farmland, to compare and analyze the budgets and loss risk of nitrogen and phosphorus from soil in the drawdown area. The results showed that the ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), total phosphorus (TP), and inorganic phosphorus (IP) content of soil in the corn field varied significantly across different planting periods. The concentrations of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) were significantly higher in farmland soil than in abandoned farmland soil, and the concentrations of total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP), and calcium-bound phosphorus (Ca-P) were significantly lower in farmland soil than in abandoned farmland soil. The different soils were ranked according to the intensity of nitrogen and phosphorus surplus as follows: corn field > potato field > peanut field. The apparent surplus values in the different farmland soils were 76.89 kg·hm⁻² (corn field), 51.92 kg·hm⁻² (potato field), and 43.74 kg·hm⁻² (peanut field) for nitrogen, and 79.69 kg·hm⁻² (corn field), 75.76 kg·hm⁻² (potato field), and 17.78 kg·hm⁻² (peanut field) for phosphorous. Overall, the surplus intensities of nitrogen and phosphorus in all three croplands were higher than the respective risk thresholds, indicating potential nitrogen and phosphorus pollution in the three farmland types. Agricultural farming in the drawdown area may therefore increase the risk of nitrogen and phosphorus loss and is not conducive to the protection of the aquatic environment.

Key words: Three Gorges Reservoir (TGR); drawdown area; farming practices; water environment; nitrogen and phosphorus balance models

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404705); 国家自然科学基金项目(51861125204)

作者简介: 罗芳(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水库水环境与水生态, E-mail: lf_chongqing@163.com

* 通信作者, E-mail: lulunhui@cigit.ac.cn

按照三峡水库“蓄清排浑”的调度运行方案,在正常蓄水水位(175 m)与汛期防洪限制水位(145 m)之间形成了周期性、季节性干湿交替的消落带.三峡库区消落带总面积约为 350 km²^[1],由于是水-陆生态交错区,受特殊的自然环境和人类活动干扰交叠,面临各种生态环境问题^[2],比如水土流失和水陆交叉污染等^[3].三峡水库消落带高程 165 m 以上区域,全年露出时间在 180 d 以上.该区域落干出露期间正值雨热同季,可满足至少一季的农作物生长,故成为近年来三峡库区村镇农民进行农业耕作的集中区域.据不完全统计,已有约 3.26 万农业人口在三峡水库消落带土地上进行无序开垦耕种,已耕种面积多达 66.67 km²(约 10 万亩,占消落带可耕种面积的 77%)^[4].

然而,消落带农业耕作将不可避免地改变景观格局与土壤理化性质,并对三峡水库水环境产生影响.农业垦种过程中物理干扰(土地的翻耕、平整等)和化学干扰(化肥和农药的施用等)会改变土壤结构和养分状况.在作物种植过程中,农民凭经验施加化肥和农药,这势必会增加土壤氮、磷等污染物的含量.不仅如此,消落带既是陆源污染物的汇,也是水域污染物的源.在淹水条件下,农药、化肥及作物残体携带的污染物浸出后释放进入水体,将进一步增加水质恶化风险^[1].尽管如此,目前关于消落带农业耕作对其土壤理化性质及水环境影响的研究仍

鲜有报道.近年来,地方政府对三峡水库消落带农业耕作的监管力度持续加强.2019 年三峡库区重庆段部分区县开始禁止在消落带开展农业耕作活动.通过加强消落带监管,保障库区水环境安全.

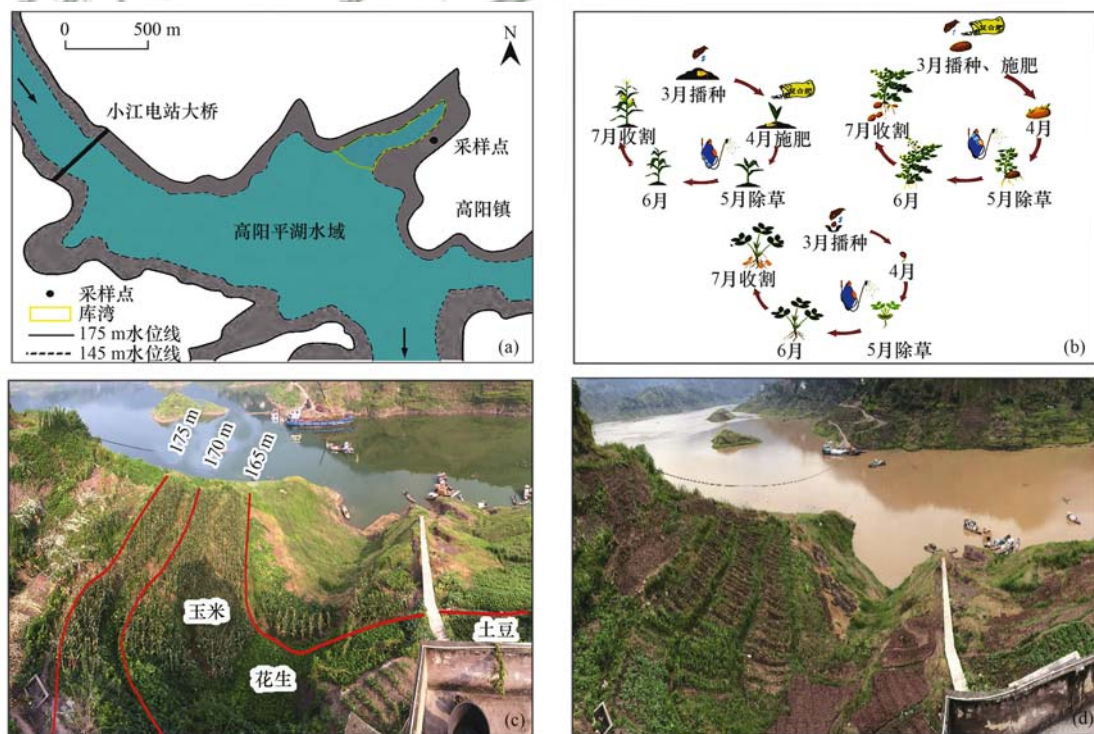
为更准确地掌握消落带农业耕作与弃耕对其土壤理化性质的影响,本文以三峡水库支流典型消落带为研究区域,选择不同种植样地(玉米、土豆和花生),在 2018 年开展农业耕作时期和禁止耕作的 2019 年,开展野外调查,比较分析农业耕作对消落带土壤氮、磷养分的影响,并结合小区域内氮、磷收支估算,探讨消落带农业农耕、弃耕对三峡水库水环境的潜在影响.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究所选消落带位于三峡水库支流澎溪河高阳平湖的李家坝库湾(31°06′10″N, 108°40′27″E,图 1),该处消落带的土壤类型为紫色土,土壤的 pH 值和有机质含量分别为 6.96 ± 0.57 和 (43.85 ± 9.15) mg·g⁻¹.自成库以来该区域消落带被近岸居民持续进行农业耕作,耕作面积约为 1 600 m²,主要种植的农作物包括玉米、土豆、花生和各种蔬菜.

根据当地居民耕作习惯,通常每年在 3 月三峡坝前水位降至 160 m 左右时开始翻整土地并进行播种.玉米、花生和土豆的播种时间通常都在 3 月左



(a) 研究区; (b) 耕作流程; (c) 农耕地; (d) 弃耕地

图 1 研究区位置、耕作流程示意及样地实景

Fig. 1 Location of the study area, sketch map of farming process, and reality images of sample plots

右. 在玉米地中, 通常待玉米生长一段时间后(4 月) 施加 $50 \sim 60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的复合肥. 土豆地中, 播种后立即施加 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的复合肥. 土豆和玉米只施加一次肥料, 不进行二次施肥. 花生在种植全过程中不施加肥料. 种子发芽长出小苗后不喷洒杀虫剂, 按需手动添加除草剂. 3 种作物的收获时间通常为 7 月. 农作物收获后, 地下部分被保留于消落带, 待 10 月蓄水后被淹没. 2019 年地方政府开始禁止该区域进行农业耕作, 故在退水露出后该区域消落带成为弃耕地, 逐渐被自然恢复的草本植物所覆盖, 主要为狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 和香根草 (*Vetiveria zizanioides*).

1.2 采样设计与土壤样品采集

为阐释农业耕作与退耕对消落带土壤氮、磷养分的影响, 本文以不同作物用地(玉米、土豆和花生地)为研究对象, 通过实地勘察, 选定 165 ~ 170 m 海拔区间的消落带农耕地进行研究. 为使两个时期土壤样品采样点具有可比性, 在同一样地、相近高程处进行采样. 采样时间为农耕地(2018 年 3 ~ 9 月)和退耕地(2019 年 3 ~ 9 月), 每两个月一次, 其中落干初期和落干末期分别对应 3 月和 9 月, 农作物种植的前、中和后期分别对应 3、5 和 7 月. 在 3 种作物用地, 各设置 3 个面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样地, 每个样地内按对角线选取 3 个采样点, 使用洛阳铲采集落干的表层(0 ~ 20 cm)土壤, 去除砾石和动植物残体等杂质, 将同一样地内土壤混合均匀, 用四分法缩分至 1 kg 左右, 放于自封袋中. 样品运回实验室后, 经风干、研磨和过筛, 于 4°C 冰箱保存待测.

1.3 消落带农耕地与弃耕地土壤表观氮、磷收支方法构建

1.3.1 收支核算的时空边界与土壤表观氮、磷平衡模型的基本假设

本研究集中于揭示落干期农耕地与弃耕地氮、磷收支关系, 故研究的时间边界为 3 月(落干初期)至 9 月(落干末期或再次淹没以前). 空间边界为库湾内 165 ~ 170 m 海拔区间的消落带. 模型具有以下基本假设.

(1) 土壤氮磷平衡的核算中, 输出项应包括损失途径(径流和淋溶), 但由于研究区无固定汇水口, 难以对流失过程进行野外监测, 因此, 输出项中暂不考虑氮、磷损失.

(2) 根据落干初期 3 种作物用地土壤氮、磷形态含量的测定结果, 因为有机磷和铁铝结合态磷含量在不同作物用地呈显著差异(One-way ANOVA with LSD, $P < 0.05$), 其余氮、磷形态含量在 3 种作物用地间均无显著性差异, 故假设经过淹没之后(即落干初期), 所选择样地的土壤各氮、磷形态含

量被“重置”或“均一化”了.

(3) 研究区域内人畜粪尿多用于沼气池, 基本无施用于农耕地的情况, 且生活污水已通过城镇污水管网收集并由污水处理厂处理, 故研究区域内, 人畜粪尿和生活污水对消落带农耕地基本无影响, 本研究中有有机肥仅考虑秸秆还田.

1.3.2 消落带农耕地与弃耕地土壤表观氮、磷平衡计算

为探讨消落带农业耕作和弃耕两种状态下氮磷流失风险, 本研究基于经济发展与合作组织 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 土壤养分表观平衡模型, 建立了消落带农耕地与弃耕地氮、磷平衡模型. 该模型根据氮、磷物料平衡的原理, 通过核算农耕地和弃耕地的输入与输出之差判断土壤盈余或亏损状况.

该模型的基本方程是:

$$M = \sum_{i=1}^n K_{li} - \sum_{j=1}^m S_{oj} \quad (1)$$

$$I = M/AL \quad (2)$$

式中, M 表示土壤表观氮或磷平衡量 (kg), 若 M 为正值, 表示消落带农耕地土壤氮或磷盈余, 有流失风险, 可能会对水环境产生影响, 若 M 为负值, 表示土壤表观氮或磷亏损, 需额外投入才能保证农业生产; K_{li} 表示氮或磷输入量 (kg), S_{oj} 表示氮或磷输出量 (kg), 其中, i 和 j 分别代表了第 i 种氮或磷的输入和第 j 种氮或磷的输出; n 和 m 分别代表氮或磷输入及氮或磷输出的类别数; I 为土壤表观氮或磷单位面积平衡量或平衡强度; AL 表示耕地面积.

本研究根据实地调查确定研究区消落带农耕地与弃耕地氮、磷输入与输出项、各项计入指标、相关系数及其取值(表 1). 输入项包括: 化肥 (K_{li})、有机肥 (K_{li})、大气沉降 (K_{li})、种子养分带入 (K_{li}) 和生物固氮 (K_{li}); 输出项包括: 植物(农作物)吸收 (S_{oi})、反硝化脱氮 (S_{oi}) 和氨挥发脱氮 (S_{oi}), 其中生物固氮、反硝化脱氮、氨挥发脱氮只存在于氮循环中. 弃耕地输入项仅包括大气沉降 (K_{li}) 和生物固氮 (K_{li}); 输出项仅包括: 植物(自然恢复草本植物)吸收 (S_{oi}) 和氨挥发脱氮 (S_{oi}), 其中植物(自然恢复草本植物)吸收计算中, 选取狗牙根为研究对象.

1.4 消落带农耕地与弃耕地土壤表观氮、磷的输入和输出项系数获取

消落带农耕地与弃耕地土壤表观氮、磷的输入和输出项中的施肥量和作物产量由询问农户获取, 耕地面积为实测, 见表 1. 消落带弃耕地土壤表观氮、磷的输入和输出项的计入指标包括草本植物的

表 1 消落带农耕地与弃耕地土壤表观氮平衡各分项描述

Table 1 Description of the soil surface balance of nitrogen in farmland and abandoned farmland of the drawdown area

类型	项目	计算指标				计算指标所涉及系数			
		单位面积量	玉米	土豆	花生	系数类别	玉米	土豆	花生
氮输入	化肥 K_{11}	施肥量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.06	0.03	0	氮折纯系数/%	32.5 ^[6]	32.5 ^[6]	32.5 ^[6]
						草谷比	1.10 ^[7]	0.96 ^[7]	1.50 ^[7]
	有机肥 K_{12}	作物产量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.68	3.03	0.32	秸秆氮含量/%	0.64 ^[8]	0.25 ^[9]	3.61 ^[10]
						秸秆还田率/%	20 ^[9]	50 ^[9]	90 ^[9]
	大气沉降 K_{13}	耕地、弃耕地面积/ hm^2	0.07	0.03	0.01	沉降负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	19.58 ^[11]	19.58 ^[11]	19.58 ^[11]
	种子养分带入 K_{14}	耕地面积/ hm^2	0.07	0.03	0.01	种子氮含量/%	1.52 ^[12]	0.17 ^[9]	4.51 ^[12]
	生物固氮 K_{15}	耕地、弃耕地面积/ hm^2	0.07	0.03	0.01	共生固氮率/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	—	—	112 ^[13]
						自身固氮率/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	15 ^[13]	15 ^[13]	15 ^[13]
氮输出	植物吸收 S_{01}	作物产量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.68	3.03	0.32	作物氮含量/%	1.40 ^[8]	0.17 ^[9]	1.69 ^[9]
	反硝化脱氮 S_{02}	施氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	197	97.50	0	化肥反硝化率/%	15 ^[14]	15 ^[14]	15 ^[14]
						化肥氨挥发率/%	9 ^[11]	9 ^[11]	9 ^[11]
	氨挥发脱氮 S_{03}	施氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	197	97.50	0	土壤背景值/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	1.5 ^[15]	1.5 ^[15]	1.5 ^[15]

生物量和弃耕地面积,其中草本植物(狗牙根)的生物量通过查阅文献获取,取 $1.61\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2[5]}$,弃耕地的面积与相应作物的耕地面积一致(表 1)。

氮、磷的输入和输出项中相关系数包括草谷比、植物的氮磷含量、大气沉降负荷、生物固氮率、反硝化率和氨挥发率,这些相关系数均由已有研究获得,获取的结果如下。

1.4.1 草谷比

草谷比是指作物秸秆产量与作物经济产量的比值。通过野外调查发现,研究区域内秸秆的主要利用方式包括还田、燃烧、饲料和废弃。作物的草谷比和

秸秆还田率见表 1。

1.4.2 植物氮、磷含量

现场问询发现,农户通常将作物收获量的 2%~4%作为种子回用于农耕地,本研究种子量取玉米、土豆和花生收获量的 3%计算。农耕地种子、秸秆及作物氮、磷含量分别见表 1 和表 2。弃耕地生长的狗牙根氮、磷含量分别为 1.40% 和 0.22%^[5]。

1.4.3 大气沉降负荷

研究区域内大气氮、磷沉降负荷的取值分别见表 1 和表 2。

表 2 消落带农耕地与弃耕地土壤表观磷平衡各分项描述

Table 2 Description of the soil surface balance of phosphorus in farmland and abandoned farmland of the drawdown area

类型	项目	计算指标				计算指标所涉及系数			
		单位面积量	玉米	土豆	花生	系数类别	玉米	土豆	花生
氮输入	化肥 K_{11}	施肥量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.06	0.03	0	磷折纯系数/%	15.30 ^[16]	15.30 ^[16]	15.30 ^[16]
						草谷比	1.10 ^[7]	0.96 ^[7]	1.50 ^[7]
	有机肥 K_{12}	作物产量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.68	3.03	0.32	秸秆磷含量/%	0.15 ^[9]	0.27 ^[9]	0.51 ^[17]
						秸秆还田率/%	20 ^[9]	50 ^[9]	90 ^[9]
	大气沉降 K_{13}	耕地/弃耕地面积/ hm^2	0.07	0.03	0.01	沉降负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	5.25 ^[18]	5.25 ^[18]	5.25 ^[18]
	种子养分带入 K_{14}	耕地面积/ hm^2	0.07	0.03	0.01	种子磷含量/%	0.25 ^[19]	0.04 ^[20]	0.03 ^[19]
氮输出	植物吸收 S_{01}	作物产量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.68	3.03	0.32	作物磷含量/%	0.24 ^[20]	0.04 ^[20]	0.25 ^[20]

1.4.4 生物固氮率

生物固氮包括共生固氮和自身固氮。共生固氮作物为花生;自身固氮包括旱地和水田自身固氮,本研究农耕地属于旱地。共生固氮率和自身固氮率的取值见表 1。

1.4.5 反硝化率

反硝化脱氮包括化肥反硝化和有机肥反硝化。野外研究中,发现案例区域农耕地无有机肥施用现象,故研究区域内暂不考虑有机肥反硝化,仅考虑化肥反硝化脱氮,其取值见表 1。

1.4.6 氨挥发率

氨挥发脱氮包括化肥氨挥发、有机肥氨挥发和

土壤背景值排放。研究区域内,只考虑氮的化肥氨挥发和土壤背景值排放,其取值见表 1。

1.5 测定项目与方法

消落带土壤氮形态的测定包括全氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N),其中土壤 TN 采用元素分析仪(Vario EL cube, Germany)直接测定,土壤“三氮”依据《土壤氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取-分光光度法》(HJ 634-2012)^[21]测定。土壤磷形态的测定采用 Ruban 等^[22]在欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法,将消落带土壤中的磷分为全磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、钙结合态磷(Ca-P)和铁铝结合态磷(Fe/

Al-P). 土壤有机质(SOM)的测定采用 550℃ 烧失量法^[23]. 土壤 pH 值依据《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962-2018)^[24].

1.6 数据统计与分析

数据的统计、分析及图形绘制分别使用 Excel (Ver 2013, Microsoft Corporation, USA)、SPSS 22.0 (Ver 22.0, IBM Corporation, USA) 和 Origin (Ver 2018, Origin Lab Corporation, USA) 软件.

以上所有试验均重复 3 次, 图片数据采用平均值 $\pm$ 标准偏差表示. 首先对数据进行方差齐次性检验, 如果满足方差齐性, 进行单因素方差分析 (one-way analysis of variance, One-way ANOVA), 再应用最小显著差异法 (least significant difference, LSD) 对平均值进行多重比较; 如果不满足方差齐次性, 则应用非参数检验方法曼-惠特尼秩和检验 (Mann-Whitney U test), 对不同土地利用类型 (农耕地和弃耕地)、不同时间 (落干初期和落干末期) 的土壤氮、磷形态含量的中位数进行比较. 显著性检验中, $P < 0.05$ 表示差异显著.

2 结果与分析

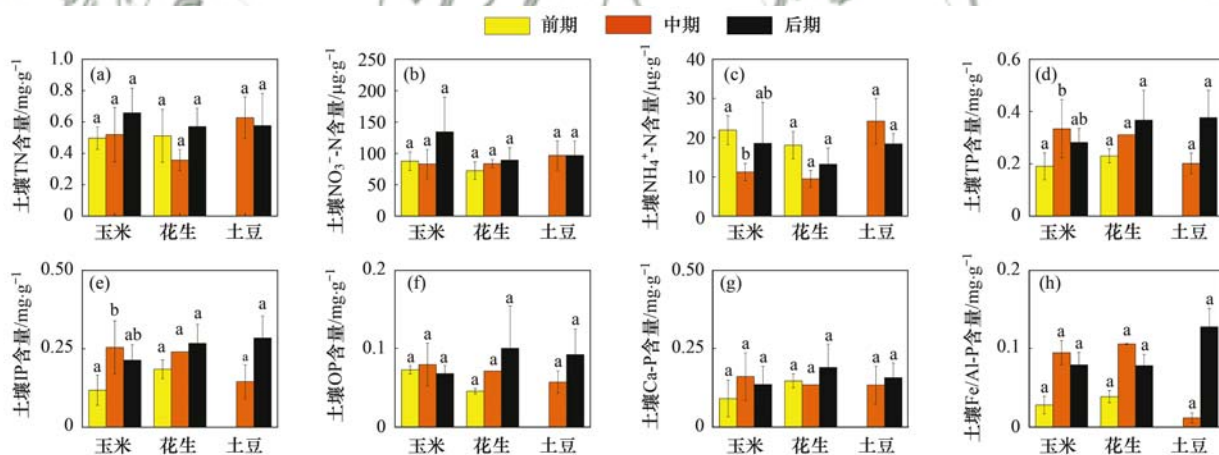
2.1 种植期不同作物用地消落带土壤氮、磷含量变化

消落带农耕地 3 种主要作物种植的前期 (3

月)、中期 (5 月) 和后期 (7 月) 的土壤氮、磷形态含量见图 2. 消落带落干期玉米的种植使土壤氮含量有显著降低趋势 [One-way ANOVA with LSD, 下同, $P < 0.05$, 图 2(c)], 全磷和无机磷含量显著升高 [$P < 0.05$, 图 2(d) ~ 2(e)].

不同作物用地土壤之间, 消落带土壤各氮、磷形态含量无显著性差异 ($P > 0.05$), 但在种植期间呈不同的变化过程 (图 2). 土壤全氮含量在玉米地表现为逐渐增加, 花生地和土豆地均表现不同程度的下降 [图 2(a)]. 土壤硝态氮在玉米地、花生地表现为从种植前期到后期逐渐增加 [图 2(b)]. 氨氮含量在玉米地和花生地均表现为先减少后增加的趋势, 而土豆地在中期时氨氮含量高于玉米和土豆地, 且在后期有减少的趋势 [图 2(c)].

消落带研究区土壤磷形态含量的时间变化见图 2(d) ~ 2(h). 虽然花生地土壤钙结合态磷和铁铝结合态磷变化规律与其余磷形态不同, 即钙结合态磷在种植中期有所下降 [图 2(g)], 铁铝结合态磷在种植中期达到最大值 [图 2(h)]. 然而土壤全磷、无机磷和有机磷含量在 3 个作物耕作土壤中具有相同的变化特征 [见图 2(d) ~ 2(f)], 即花生地和土豆地表现为逐渐增加趋势, 而玉米地表现为先增加后减少的趋势.



未采集到土豆生长初期时种植区土壤样品; 不同的小写字母表示不同种植时期之间的差异显著性 ($P < 0.05$)

图 2 种植期间消落带不同作物用地土壤氮、磷含量

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus content in soil of different farmlands in the drawdown area during planting period

2.2 不同土地利用类型消落带土壤氮、磷含量

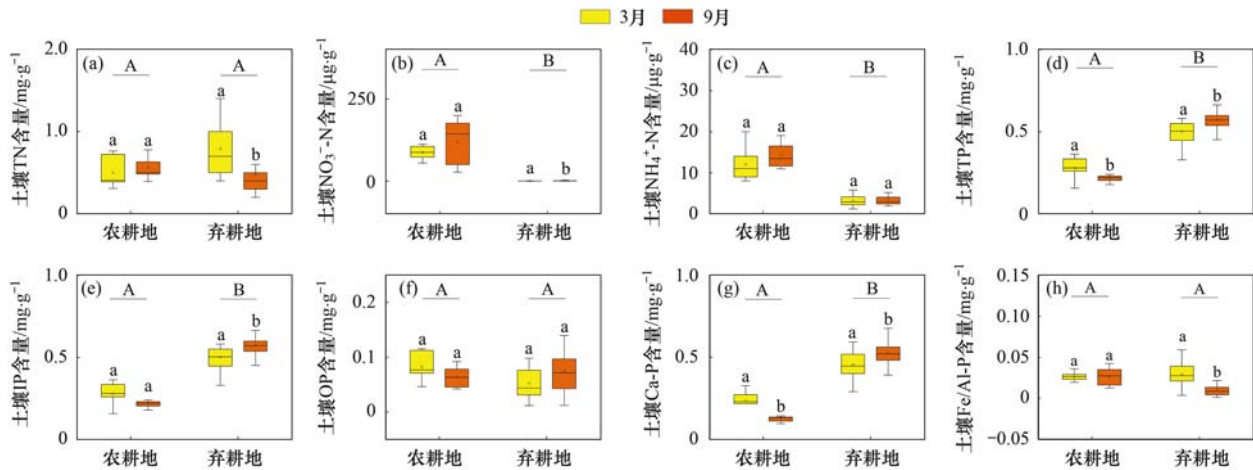
消落带落干初期 (3 月) 和落干末期 (9 月) 不同土地利用类型土壤氮、磷含量见图 3. 全氮含量在农耕地和弃耕地无显著性差异 [Mann-Whitney U test, 下同, $P > 0.05$, 图 3(a)], 而农耕地硝态氮和氨氮含量均显著高于弃耕地 [$P < 0.05$, 图 3(b) ~ 3(c)]. 弃耕地土壤全氮含量在落干初期显著高于落干末期 [图 3(a)], 硝态氮含量在落

干初期 (3 月) 显著低于落干末期 (9 月) [$P < 0.05$, 图 3(b)].

不同土地利用类型中, 弃耕地全磷、无机磷和钙结合态磷含量远高于农耕地 [$P < 0.05$, 图 3(d)、图 3(e) 和图 3(g)], 而弃耕地土壤有机磷和铁铝结合态磷含量在农耕地与弃耕地均无显著性差异 [$P > 0.05$, 图 3(f) 和图 3(h)]. 农耕地土壤全磷、无机磷、有机磷、钙结合态磷具有相似的变化趋势 [图 3

(d)~3(g)],即落干初期(3月)高于落干末期(9月),其中土壤全磷、钙结合态磷含量在落干前后差异显著 $[P < 0.05]$,图3(d)和图3(g)].弃耕地除铁铝结合态磷含量在落干前后呈降低趋势外[图3(h)],其余磷形态含量均呈增长趋势[图3(d)~3

(g)],其中土壤全磷、无机磷和钙结合态磷含量在落干初期(3月)显著低于落干末期[9月, $P < 0.05$,图3(d)、图3(e)和图3(g)],土壤铁铝结合态磷含量在落干初期(3月)显著高于落干末期[9月, $P < 0.05$,图3(h)].



不同的大写字母表示农耕地和弃耕地的差异显著性($P < 0.05$),不同的小写字母表示耕地或弃耕地落干初期与末期的差异显著性($P < 0.05$);箱体上下边界分别代表75%分位数和25%分位数,箱体的延伸线代表1.5IQR范围,中位数在箱体用一条横线表示;3月:落干初期,9月:落干末期

图3 消落带不同土地利用类型土壤氮、磷含量

Fig. 3 Nitrogen and phosphorus content in soil of different land-use types in the drawdown area

2.3 消落带农耕地和弃耕地氮、磷收支平衡模型计算结果

2.3.1 消落带农耕地和弃耕地土壤氮、磷收支结果

不同作物用地土壤氮、磷的输入和输出途径见图4.玉米地氮输入量及单位面积氮输入量均高于其余两种作物用地[图5(a)],3种弃耕地单位面积氮输入量均较接近,且低于3种耕地[图5(b)].由图6可知,化肥为研究区玉米地和土豆地土壤表观氮输入的主要贡献源,分别占88.96%和77.11%.花生地未施加化肥,生物固氮为其氮输入

主要贡献源,占53.90%.

玉米地和土豆地单位面积磷输入量接近,而花生地较少[图5(c)].3种弃耕地单位面积磷输入量均较接近,且远远低于作物用地[图5(d)].由图6可知,化肥为玉米地和土豆地土壤表观磷输入的主要贡献源,分别占95.37%和52.76%.有机肥(秸秆还田)为花生地土壤表观磷输入的主要贡献源,占总量的90.84%.

由单位面积氮输出量可知,玉米地氮输出量最高、土豆地次之,花生地最低[图5(a)];3种弃耕

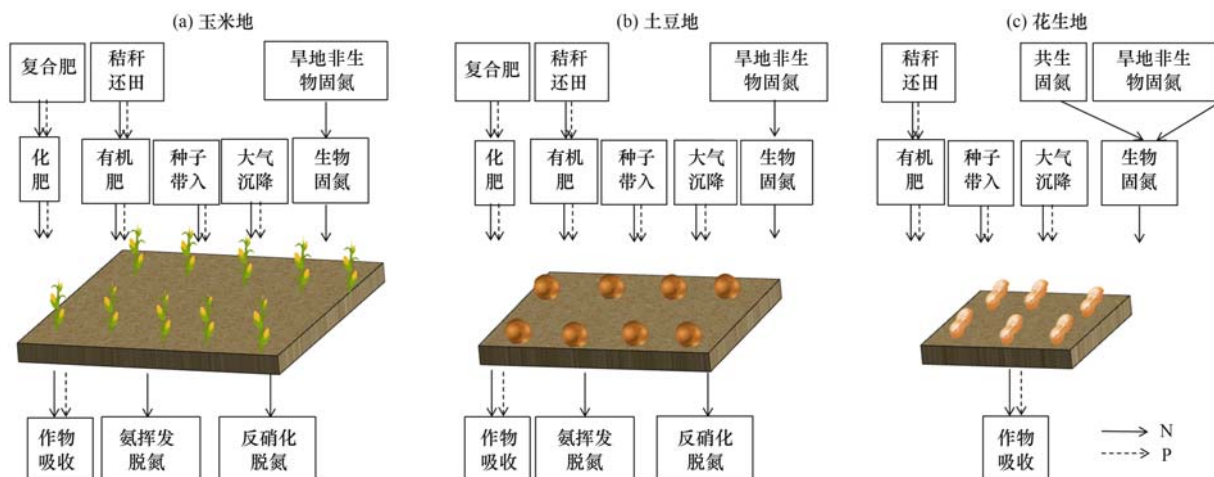


图4 不同作物用地土壤氮、磷的输入和输出途径示意

Fig. 4 Schematic diagram of soil nitrogen and phosphorus input and output pathways in different farmlands

地的单位面积氮输出量较接近,且均高于3种耕地[图5(b)].由图6可知,3种耕地主要氮输出贡献源均为作物吸收,分别占氮输出总量的66.58%和67.98%和100%.

磷输出总量低于氮输出总量,玉米地单位面积磷

输出量最大,花生地最低[图5(c)];3种弃耕地单位面积磷输出量较接近,且均高于3种耕地[图5(d)].由图6可知,由于3种耕地土壤表观磷输出不考虑氨挥发和反硝化脱氮,作物吸收为唯一磷输出途径,其分别占3种耕地土壤磷总输出的100%(图6).

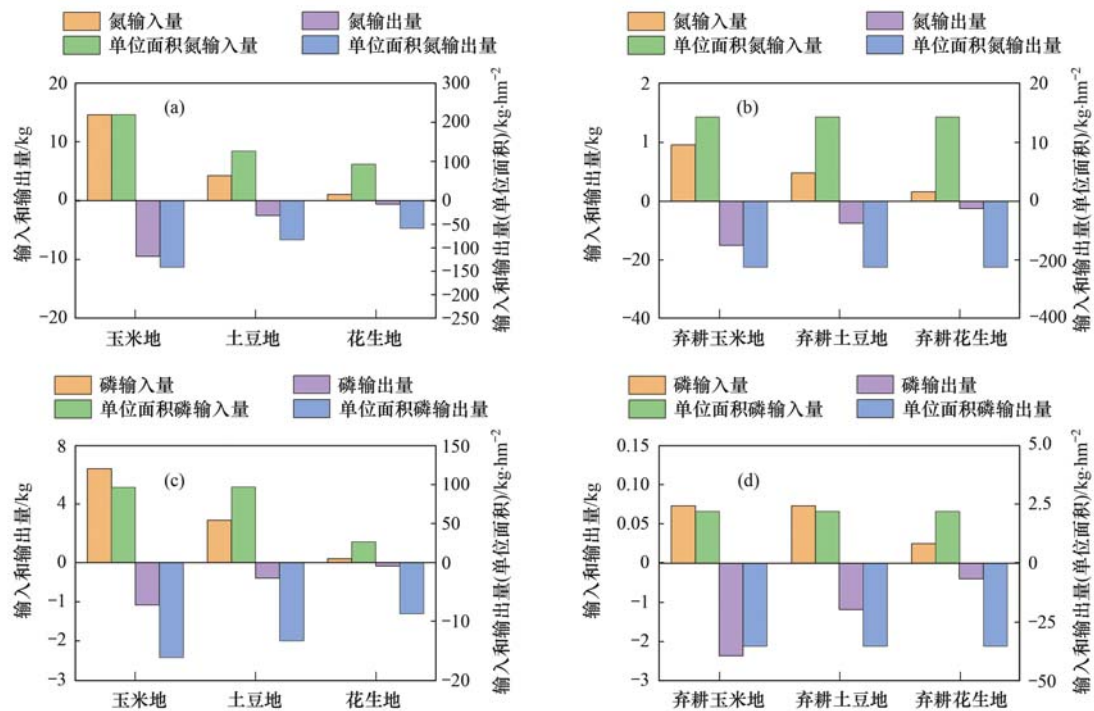


图5 消落带不同土地利用类型土壤氮、磷的输入和输出量

Fig. 5 Amounts of soil nitrogen and phosphorus inputs and outputs in different land-use types of drawdown area

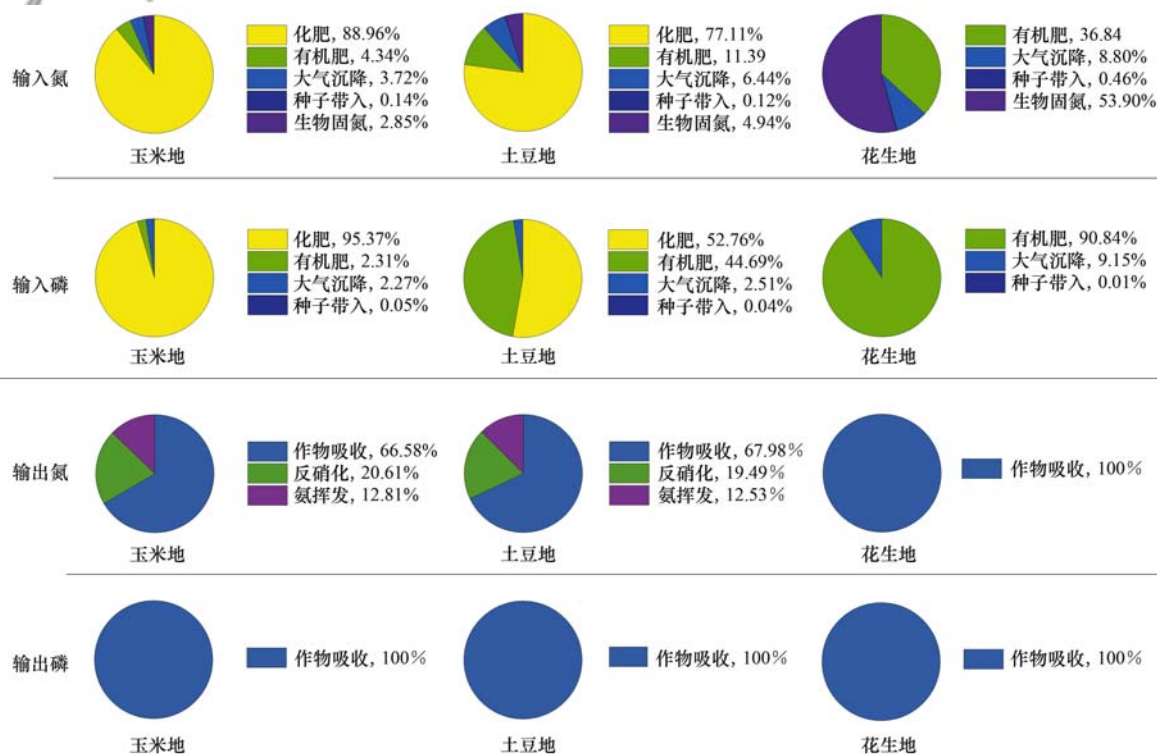


图6 消落带不同作物用地土壤氮、磷的输入和输出组成

Fig. 6 Composition of soil nitrogen and phosphorus inputs and outputs in different croplands of drawdown area

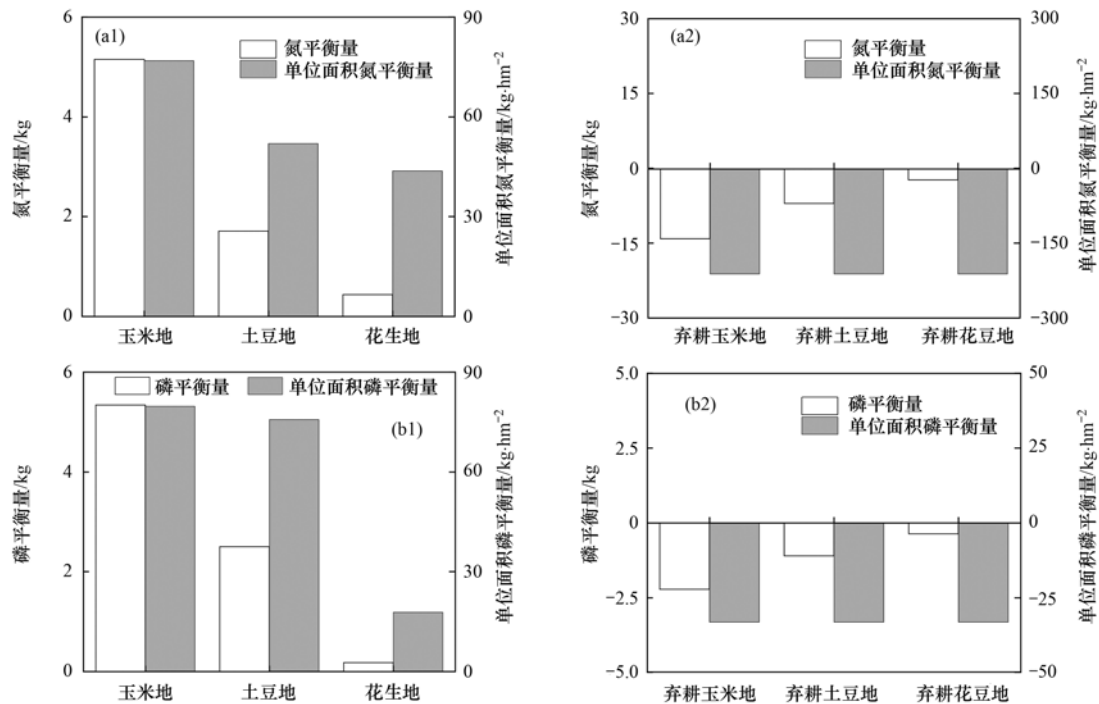


图7 消落带不同土地利用类型土壤氮、磷平衡量

Fig. 7 Nitrogen and phosphorus balance amounts in soil from different land-use types of the drawdown area

2.3.2 消落带农耕地和弃耕地土壤表观氮、磷平衡结果

消落带不同土地利用类型土壤表观氮、磷平衡总量及其单位面积氮、磷平衡量见图7。3种耕地土壤表观氮、磷平衡总量均表现为盈余,且玉米地单位面积氮、磷平衡量高于其余两种作物用地,土壤流失风险最高。3种弃耕地土壤氮、磷平衡总量均表现为亏损,表明需额外投入才能保证农业生产,且单位面积氮、磷平衡量均较接近。

3 讨论

3.1 农业耕作对消落带土壤氮、磷素形态含量的影响

不同土地利用类型(耕地或弃耕地)对全氮含量的影响不显著。此前,有研究表明农耕地在转换为草地时,由于遭受较强的土壤侵蚀,其全氮含量会低于草地^[25]。这与本研究结果略有不同,其原因可能是:弃耕地表层自然植被恢复以后,土壤侵蚀减少,通过氮的固定,提高了全氮的储量^[26],但因本研究区域消落带具有一定迫降,落干期受降雨影响,土壤全氮含量存在流失,导致落干期弃耕地土壤全氮含量呈显著下降的趋势,故本研究中全氮在农耕地或是弃耕地土壤中相差不大。尽管土壤全氮含量受土地利用类型影响不显著,但不同土地利用类型(耕地或弃耕地)对土壤氨氮和硝态氮含量的影响是显著的。农耕地土壤的无机氮形态(氨氮和硝态氮)含量显著高于弃耕地。研究区耕地施加氮肥强度较高

或农业活动频繁扰动,如土地翻耕等物理扰动改变了土壤通透性和孔隙度,促进了表层土壤有机氮分解和矿化为无机氮^[27]。

牛晓音^[25]的研究发现,与农耕地相比,弃耕地的侵蚀模数更高,磷流失程度高,土壤中磷养分含量相对较低。本研究中,消落带弃耕地的土壤全磷、无机磷和钙结合态磷含量在落干末期显著高于落干初期,这进一步表明在消落带使用狗牙根和香根草等草本植物进行植被恢复有利于土壤磷素的保持和积累。土壤侵蚀本质上是地表土壤物质发生移动,植被是控制和改善流域土壤侵蚀的重要因子^[25],一般情况下,植被覆盖与土壤侵蚀呈负相关^[15, 28]。通常,草本植被的覆盖度可达90%以上,农作物覆盖度低于草本植被,约占70%~80%^[29]。研究区域内,与弃耕地相比,农耕地作物的覆盖度相对较低,受到翻耕等物理干扰,会加速消落带土壤磷的流失,因此农业耕作对消落带磷素的保存具有负效应^[30],而研究区域内,弃耕地表面生长大量自然恢复的草本植物(主要是狗牙根和香根草),草本植被覆盖率高,这些植被可以有效防止土壤受到侵蚀,减少土壤磷流失。

3.2 不同作物各生育期土壤氮、磷素含量变化分析

施肥可以改变玉米地土壤肥力,使磷素含量上升。玉米地土壤从生长初期(3月)到收获期(7月),表层土壤全磷及磷形态含量呈先增加后减小的趋势。土壤磷素含量均在施加化肥后的一个月,即生长中期达到最大值。因此,玉米从生长初期到收获期,

土壤表层磷素含量呈减小趋势,这是由于玉米地土壤磷素主要随径流等方式流失,且植物生长也会吸收一定的有效磷^[31]。

不同作物各生育期对土壤氮、磷素的吸收有所差异。土豆地的磷素含量随着土豆生长呈增长趋势,这是因为土豆对磷素的吸收率较低,仅在出苗 50 d 最高,其后逐渐降低^[32]。本研究中,花生从生长初期到收获期均未施加化肥。虽然花生地氮、磷含量在其各生长期无显著差异,但花生对氨氮的吸收量在生长初期最低,生长中期最高;花生对无机磷、铁铝结合态磷的吸收量在生长初期最高,符合磷吸收强度在苗期最高的结论^[33]。

3.3 消落带农耕地与弃耕地氮、磷收支平衡及水环境风险

农耕地土壤氮盈余量的大小顺序为,玉米 > 土豆 > 花生,盈余量分别为 5.45、1.86 和 0.49 kg。玉米、土豆和花生地土壤氮盈余负荷分别为 194.89、135.18 和 116.62 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。玉米地氮盈余负荷大于流失风险值 180 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[34]。综合分析 3 种作物用地类型的氮、磷收支特征可以看出,玉米地土壤氮盈余量负荷最高,主要原因是化肥氮投入量大,但利用效率低。花生地氮盈余负荷最低,主要是由于花生地未施加化肥,共生固氮为主要氮输入源,但其含量低于其余作物用地化肥投入氮量。由此可见,研究区农耕地中玉米地对水环境的潜在威胁明显大于花生地。当土壤氮、磷盈余时,可能提高土壤肥力,但也常以径流、淋溶等方式进入水体,危害水环境^[35]。

农耕地土壤磷盈余量的大小顺序为,玉米 > 土豆 > 花生,盈余量分别为 5.34、2.50 和 0.18 kg。玉米、土豆、花生地土壤磷盈余负荷分别为 194.37、184.78 和 43.37 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。玉米地和土豆地的磷盈余负荷均高于流失风险值 35 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[36],因此,研究区农耕地磷的污染潜势已经形成。磷盈余的主要原因是磷肥的施加和作物磷利用率低。作物吸收也为 3 块耕地最主要的磷输出来源。作物吸收收获磷量与投入磷量(有机肥与化肥之和)的比值为 0.17(玉米地)、0.14(土豆地)和 0.36(花生地),收获磷量远远小于磷投入量,与大部分国内研究结果一致^[34],研究区消落带植被磷利用率低,剩余的磷对库湾水体水环境安全具有潜在的威胁。

与农耕地相比,弃耕地土壤表观氮、磷平衡表现为亏损。这主要是因为弃耕地基本无化肥、有机肥等输入,氮输入来源为大气沉降和生物固氮,磷输入来源为大气沉降;弃耕地生长大量自然恢复的草本植被,由于其生物量大,对氮利用率高,可以将土壤容

易迁移的无机氮转变为有机氮,有助于氮素的积累,减少氮素的流失^[37]。研究区由农耕地转变为弃耕地,实际上是从氮磷高盈余、低利用、高流失的模式转变为低盈余、高积累、低流失的模式。因此相对于农耕地,弃耕地更有利于水环境的保护,且合理利用自然草本植被进行的植被修复是降低消落带氮磷污染潜势的有效措施。

4 结论

(1) 不同农作物用地(玉米地、土豆地和花生地)对消落带土壤氮、磷形态含量无明显影响,但同一作物,尤其是玉米地,在不同种植期呈不同的变化趋势。玉米地随种植期延长,土壤氨氮含量有显著降低趋势,全磷和无机磷含量显著升高。

(2) 消落带耕作与弃耕对其土壤无机氮、磷形态有一定的影响。农耕地氨氮和硝态氮平均含量高于弃耕地,而全磷、无机磷和钙结合态磷平均含量却低于弃耕地。

(3) 化肥是玉米地和土豆地氮、磷的主要输入源,玉米地主要氮、磷输入源分别为生物固氮和有机肥,作物吸收为 3 种作物用地氮、磷主要输出源。

(4) 农耕地土壤氮、盈余量的大小顺序为,玉米 > 土豆 > 花生,玉米地土壤氮盈余负荷大于流失风险值,3 种作物用地土壤磷盈余负荷均高于流失风险值。

(5) 消落带农业耕作将迫使氮、磷流失风险加剧。化肥投入量大,利用率低,是形成污染的主要原因。弃耕地氮磷平衡表现为亏损,主要是因为弃耕地自然恢复的草本植物有助于氮、磷的储存和积累。减少消落带农业耕作强度是减缓消落带氮磷污染潜势的有效措施。

参考文献:

- [1] 郭劲松,李哲,方芳. 三峡水库运行对其生态环境的影响与机制——典型支流澎溪河水环境变化研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 沈振锋,张开金,夏雪,等. 基于文献计量法的三峡库区消落带研究现状及热点分析[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(1): 26-34.
- [3] 张永祥. 水库消落带生态修复与重建[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [4] 何靖. 科学处理农业种植和环境保护冲突中增加农民收入的新尝试——基于三峡库区消落带农民种植的调查[EB/OL]. <http://www.tiaozhanbei.net/d845/project/4138/>, 2021-01-01.
- [5] Chen X, Zhang S, Liu D, et al. Nutrient inputs from the leaf decay of *Cynodon dactylon* (L.) Pers in the water level fluctuation zone of a Three Gorges tributary[J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 718-723.
- [6] 张卫峰,李亮科,陈新平,等. 我国复合肥发展现状及存在的问题[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(2): 14-16.

Zhang W F, Li L K, Chen X P, et al. The present status and existing problems in China's compound fertilizer development

- [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, **24**(2): 14-16.
- [7] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [8] 朱健, 范菲菲, 韦时宏. 玉米及其秸秆中氮含量的测定[J]. 农业与技术, 2018, **38**(18): 1-2.
- [9] 赵晓琳. 胡家山小流域农田土壤氮磷收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [10] 刘宝勇, 张成, 史普想, 等. 不同施肥水平对风沙地花生氮含量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, **48**(7): 1087-1092. Liu B Y, Zhang C, Shi P X, *et al.* Effect of different fertilization levels on the nitrogen content of peanut in Aeolian Sandy Soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, **48**(7): 1087-1092.
- [11] 张六一. 三峡库区大气氮沉降特征、通量及其对水体氮素的贡献[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2019.
- [12] 焦念元, 汪江涛, 尹飞, 等. 施用乙烯利和磷肥对玉米/花生间作氮吸收分配及间作优势的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(6): 1477-1484. Jiao N Y, Wang J T, Yin F, *et al.* Effects of ethephon and phosphate fertilizer on N absorption and intercropped advantages of maize and peanut intercropping system [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, **22**(6): 1477-1484.
- [13] 周颖. 丹江口库区流域面源污染输出规律与养分收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [14] Bao X, Watanabe M, Wang Q X, *et al.* Nitrogen budgets of agricultural fields of the Changjiang River basin from 1980 to 1990[J]. Science of the Total Environment, 2006, **363**(1-3): 136-148.
- [15] Yan X Y, Akimoto H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia[J]. Global Change Biology, 2003, **9**(7): 1080-1096.
- [16] 李金城, 杜展鹏, 严长安, 等. 高原山地城市农田氮、磷表观平衡演变特征——以昆明市为例[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(12): 4823-4830. Li J C, Du Z P, Yan C A, *et al.* Evolution of cropland nitrogen and phosphorus apparent balance in plateau region: A case study of Kunming City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(12): 4823-4830.
- [17] 焦念元, 汪江涛, 张均, 等. 化学调控和施磷对玉米/花生间作磷吸收利用和间作优势的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(9): 1093-1101. Jiao N Y, Wang J T, Zhang J, *et al.* Effects of chemical regulation and P fertilization on P absorption and utilization in maize/peanut intercropping system [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(9): 1093-1101.
- [18] 刘京. 三峡紫色土坡耕地小流域氮磷收支及流失风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [19] Han Y G, Yu X X, Wang X X, *et al.* Net anthropogenic phosphorus inputs (NAPI) index application in Mainland China [J]. Chemosphere, 2013, **90**(2): 329-337.
- [20] 王光亚. 我国食物成分表的发展简史[J]. 营养学报, 2003, **25**(2): 126-129. Wang Y G. The brief introduction of the progress of food composition table in China [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2003, **25**(2): 126-129.
- [21] HJ 634-2012, 土壤 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取-分光光度法[S].
- [22] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [23] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, **39**(1): 34-38. Qian B, Liu L, Xiao X. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, **39**(1): 34-38.
- [24] HJ 962-2018, 土壤 pH 值的测定 电位法[S].
- [25] 牛晓音. 滇池小流域 LUCC 下土壤侵蚀与碳氮变化研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [26] Fu X L, Shao M G, Wei X R, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2010, **155**(1-2): 31-35.
- [27] 陈志超, 杨小林, 刘昌华. 万安流域不同土地利用类型土壤全磷时空分异特征[J]. 土壤通报, 2014, **45**(4): 857-862. Chen Z C, Yang X L, Liu C H. Spatial and temporal variations of soil total phosphorus under different land use types in Wan'an watershed [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(4): 857-862.
- [28] Dunjó G, Pardini G, Gispert M. The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment [J]. Journal of Arid Environments, 2004, **57**(2): 239-256.
- [29] 王晓峰, 刘婷婷, 龚小杰, 等. 三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(4): 1342-1356. Wang X F, Liu T T, Gong X J, *et al.* Phosphorus forms in rhizosphere soils of four typical plants in the littoral zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(4): 1342-1356.
- [30] Bono A, Alvarez R. Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, **59**(2): 259-272.
- [31] 宋娅丽. 滇中坡耕地农田生态系统氮磷平衡特征[D]. 昆明: 西南林业大学, 2010.
- [32] 高聚林, 刘克礼, 盛晋华, 等. 旱作马铃薯磷素的吸收、积累和分配规律[J]. 中国马铃薯, 2003, **17**(6): 326-330. Gao J L, Liu K L, Sheng J H, *et al.* Phosphorus absorption, accumulation and distribution of potato under dry farming [J]. Chinese Potato Journal, 2003, **17**(6): 326-330.
- [33] 蒋春姬. 高产花生品种对氮肥和种植密度互作的生物学响应机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- [34] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China [J]. Pedosphere, 2005, **15**(3): 347-355.
- [35] 卞建民, 李育松, 胡昱欣, 等. 吉林西部农田生态系统氮平衡及其水环境影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1862-1868. Bian J M, Li Y S, Hu Y X, *et al.* Nitrogen balance of farmland ecosystem in the Western Jilin Province and its effect on water environment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(7): 1862-1868.
- [36] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, *et al.* The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types [J]. Plant and Soil, 2013, **372**(1): 27-37.
- [37] 韩莹, 李恒鹏, 聂小飞, 等. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮、磷收支平衡特征[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 829-837. Han Y, Li H P, Nie X F, *et al.* Nitrogen and phosphorus budget of different land use types in hilly area of Lake Taihu upper-river basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(6): 829-837.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)