

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铤鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素分布特征及来源解析 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征分析 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S₂O₈²⁻ 体系降解苯甲酸 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氨比农村污水脱氮 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N₂O 排放的影响 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N₂O 相关功能微生物的影响 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N₂O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,阎伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209,2263,2309)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响

王舒¹, 王子芳¹, 龙翼², 严冬春², 慈恩¹, 徐国鑫¹, 李娇¹, 高明^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 明确生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响, 为提升紫色土旱坡地耕地质量及减少紫色土旱坡地农业面源污染发生风险提供科学依据. 以油菜/玉米轮作农田生态系统为研究对象, 通过田间试验, 研究了不施肥(对照)、常规施肥、优化施肥及生物炭(化肥减量配施生物炭)这4个处理对紫色土旱坡地地表径流和壤中流氮素流失形态及通量的影响. 结果表明: ①在各施肥处理中, 常规处理总径流量最大, 为 $16\,133\text{ L}\cdot\text{a}^{-1}$, 生物炭处理总径流量最小, 为 $11\,893\text{ L}\cdot\text{a}^{-1}$. 各施肥处理以壤中流为主要径流方式, 壤中流流失量占总流失量的 $61.80\%\sim 68.60\%$; 与对照(不施肥处理)相比, 其余各施肥处理泥沙流失量均有所降低, 其中常规处理降低的效果最明显. ②铵态氮主要通过地表径流流失, 占总流失通量的 $86.51\%\sim 96.58\%$; 铵态氮流失通量最大的为施生物炭处理 $[0.69\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}]$. ③各施肥处理产流中的颗粒态氮浓度均高于对照处理, 且常规施肥处理的颗粒态氮流失通量最大, 为 $2.87\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. ④各施肥处理的壤中流和地表径流中的全氮浓度和硝态氮浓度均存在极显著正相关关系($P<0.01$). 硝态氮是全氮流失的主要形态, 且二者均以壤中流为主要流失途径; 全氮通过壤中流流失占比为 $72.86\%\sim 89.13\%$, 且常规施肥处理的全氮总流失通量最大, 为 $35.58\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 而施生物炭处理全氮总流失通量最小, 为 $21.49\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 化肥减量配施生物炭能明显降低径流量和氮的流失通量, 可有效阻控农业面源污染发生的风险.

关键词: 生物炭; 紫色土; 旱坡地; 氮形态; 氮流失通量

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2406-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.201911056

Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland

WANG Shu¹, WANG Zi-fang¹, LONG Yi², YAN Dong-chun², CI En¹, XU Guo-xin¹, LI Jiao¹, GAO Ming^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: This study seeks to clarify the effect of biochar application on nitrogen loss patterns and flux in purple arid sloping land, so as to provide a scientific basis for improving the quality of farmland and reducing the risk of agricultural non-point source pollution in purple arid sloping land. The effects of four treatments on surface runoff and soil nitrogen loss patterns and fluxes in purple arid sloping land were studied by field experiments, including no fertilization (control), conventional fertilization, optimized fertilization, and biochar (fertilizer reduction and biochar application). The results showed that: ① Of the fertilization treatments, the total runoff of conventional treatment was the highest at $16\,133\text{ L}\cdot\text{a}^{-1}$, and the total runoff of biochar treatment was the lowest at $11\,893\text{ L}\cdot\text{a}^{-1}$. In each fertilization treatment, soil midstream was the main mode of runoff, accounting for $61.80\%\sim 68.60\%$ of the total loss. Compared with the control (no fertilization treatment), the sediment loss in other fertilization treatments was decreased, with conventional treatment showing the most significant effect. ② Ammonium nitrogen is mainly lost by surface runoff, accounting for $86.51\%\sim 96.58\%$ of the total loss flux. Biochar treatment had the highest loss flux at $0.69\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, and the control treatment had the lowest at $0.17\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. ③ The concentration of granular nitrogen in the production flow of each fertilization treatment was higher than that of the control treatment, and the loss flux of granular nitrogen in the conventional fertilization treatment was the highest at $2.87\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. ④ There was a significant positive correlation between total nitrogen concentration and nitrate nitrogen concentration in the soil midstream and surface runoff of each fertilization treatment ($P<0.01$). Nitrate nitrogen is the main form of total nitrogen loss, and both take soil midstream as the main way of loss. The total nitrogen loss through soil flow accounted for $72.86\%\sim 89.13\%$, and that of conventional fertilization was the highest at $35.58\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, whereas that of biochar treatment was the lowest at $21.49\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. Reducing the amount of fertilizer and applying biochar can significantly reduce the runoff and nitrogen flux, and effectively prevent and control the risk of agricultural non-point source pollution.

Key words: biochar; purple soil; dry sloping farmland; nitrogen forms; loss of flux

紫色土具有土层薄, 易风化, 质地疏松、孔隙度大等特点, 极易被侵蚀, 其作为三峡库区主要的耕作土壤类型之一, 已被认为是三峡库区泥沙和面源污染的主要来源^[1]. 旱坡地是土壤侵蚀的主要发生

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2019-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 重庆市技术创新与应用专项(cstc2018jszx-zdyfxmX0014)

作者简介: 王舒(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤面源污染防治, E-mail: 951633123@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

地. 系统探究紫色土旱坡地氮流失对生物炭的响应特征, 可为紫色土区减少氮素流失的最佳还田方式提供理论依据.

生物炭也叫生物质炭, 是在高温厌氧环境下将农作物秸秆等有机物进行裂解所得到的产物, 具有较高的吸附性和稳定性, 其对提高土壤质量、保持土壤肥力、增加氮肥利用率等具有显著影响^[2-6]. Novak 等^[7]通过对农田施用生物炭发现其能显著影响土壤质量和肥力, 在降低土壤中钙、硼和锌的淋失的同时, 提高了钾、钠的淋失作用. 吴蔚君等^[8]的研究表明, 在稻田中施用生物炭能有效降低农田径流中氮、磷的流失量, 达到减肥增效的效果. 张文娟等^[9]通过研究生物炭对土壤反硝化损失的影响发现, 在施用量为 0、25 和 50 t·hm⁻² 的各处理中, 生物炭的添加能显著改善土壤理化性质, 提高土壤全氮含量及 pH 值, 且各处理之间产生显著性差异. 周志红等^[10]通过室内模拟试验, 将土壤和生物炭制成土柱并进行持续性淋洗, 结果表明较高的生物炭施用量能够降低紫色土总氮的淋失量, 而生物炭施用量不足时会提高总氮的淋失. 因此, 将秸秆等有机物制成生物炭并合理施用于土壤能大幅降低土壤氮素的淋失作用、提高氮肥利用率. 丁文峰等^[11]的研究表明, 紫色土具有土层薄, 孔隙度大及土壤饱和渗透率大等特点, 为壤中流的存在创

造了极好的条件, 紫色土区普遍存在壤中流, 且在总径流中占有相当大的份额. 目前已有大量学者对旱坡地氮素流失规律展开研究, 但主要集中在减肥配施秸秆降低土壤养分流失, 且以地表径流研究为主, 而对化肥减量配施生物炭对氮流失形态及流失通量的研究较少. 因此, 本研究通过建立的标准径流场, 连续监测油菜-玉米轮作制度下紫色土旱坡地地表径流和壤中流不同形态氮流失的浓度变化及流失通量规律, 探讨紫色土旱坡地土壤氮流失对生物炭的响应特征, 以期为紫色土旱坡地减少氮素流失的防控技术制定提供理论依据, 并为三峡库区水环境提供安全保障.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究位于重庆市忠县石宝镇新政村的中国科学院成都山地所三峡库区水土保持与环境研究试验站 (E108°10', N30°22'), 该站地处忠县、万州和石柱三县 (区) 的交界处 (图 1). 试验区内年均温度 19.2℃, ≥10℃ 年积温为 5 787℃, 雨季集中于 5~10 月, 年均降雨量保持在 1 150 mm 左右, 无霜期约为 320 d. 小区坡度为 15°, 土壤为紫色土, 是三峡库区较具代表性的坡耕地类型, 土壤基本理化性质及所用生物炭的氮、磷含量参见文献 [12].

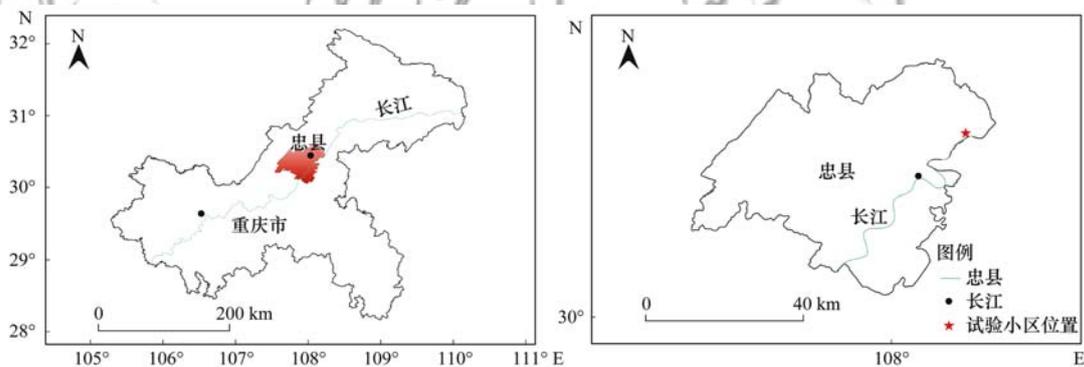


图 1 试验小区所处地理位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the geographical location of the test plot

1.2 试验设计与处理

本试验的径流小区为长方形, 各小区投影面积为 100 m² (20 m × 5 m), 底面以及四周均为混凝土修筑, 各小区外均安装地表径流和壤中流的集流桶, 为防止产流量过大, 在集流桶旁安装分流桶, 具体装置见图 2.

本试验共有 4 个处理: ①不施肥处理 (对照处理)、②常规施肥处理、③优化施肥处理和④化肥减量配施生物炭处理. 试验小区中同一处理的施肥量相同, 具体施肥量见表 1, 各小区农作管理均相同.

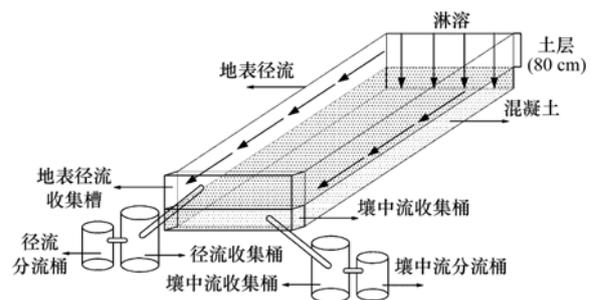


图 2 径流小区设计

Fig. 2 Runoff plot design

本试验采用“油菜-玉米两熟”制种植模式,油菜种植开始于2017年10月23日,结束于2018年10月22日,各作物的氮、磷、钾等养分用量依照当地种植施用量进行减量施用,各季作物栽培方式和田间管理措施均按照当地习惯进行.其中油菜于2017年10月23日栽种,2018年4月29日收获.玉米于

2018年4月13号移栽于油菜的行间,2018年7月20日收获.油菜季氮肥分两次施用,第一次为2017年11月7日,将磷肥、钾肥和硼肥做基肥一次性施入,第二次为2017年12月5日施入基肥.玉米季肥料分两次施入,第一次为玉米移栽时,各处理均施入2.5 kg 尿素,其余肥料于4月27日一次性施入.

表 1 不同处理肥料施入量

Table 1 Fertilizer input in different treatments

项目	处理	纯 N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²	硼砂 /kg·hm ⁻²
油菜季	不施肥	0	0	0	0
	常规施肥	150	90	90	15
	优化施肥	120	75	75	15
	减肥配施生物炭	102	63.75	63.75	15
玉米季	不施肥	0	0	0	0
	常规施肥	300	150	135	0
	优化施肥	270	120	105	0
	减肥配施生物炭	229.5	102	89.25	0

1.3 采样与分析方法

1.3.1 水样和泥沙样采集

本试验开始于2017年10月23日,结束于2018年10月22日.在观测期内,逢降雨产流就进行采样.采样前先对各试验小区的地表径流和壤中流水位进行测定,以此计算各试验小区的径流量.供试水样采自各小区地表径流和壤中流的集流桶及分流桶.采集水样前应先进行充分搅拌,待搅拌后立刻采集两瓶地表径流沙、水混合样,一瓶用于测定不同形态的氮素含量,一瓶用于测定泥沙含量及泥沙携带的氮素含量.在充分搅拌壤中流水样后,先澄清水体,再收集上清液于聚乙烯塑料瓶中.样品采集完成后应立刻进行各项指标的分析.降雨量数据由中国科学院成都山地所三峡库区水土保持与环境研究试验站人工气象降雨观测平台提供,观测仪器为虹吸式雨量计.

1.3.2 土样采集

本试验共采集3次土样,第一次是试验前采集基础土样,第二次采样为油菜收获后,第三次采样为玉米收获后.每次土样采集均采用多点随机采样,四分法随机取样的方法取表层土.

1.3.3 测定指标与方法

水样指标包括全氮、可溶性全氮、铵态氮、硝态氮和颗粒态氮浓度;土样指标包括全氮、铵态氮、硝态氮和碱解氮含量.泥沙样全氮测定方法与土样相同.测定方法详见文献[13,14].

1.4 数据处理

所有数据均采用 Microsoft Excel 2016 软件进行初步的计算处理,进一步的数据处理和图表绘制采

用 SPSS 23.0 和 Origin 2018 软件进行.多重比较采用 LSD 法($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 紫色土旱坡地产流产沙对生物炭施用的响应

如图3所示,试验期内观测到的降雨共计18次,对照处理共产生了14次壤中流和12次地表径流,而生物炭处理只产生了11次壤中流和8次地表径流.在降雨集中的4~5月,各处理的径流量峰值较壤中流峰值存在略有推迟的现象.在4月26日的降雨中,常规处理的壤中流径流量最高,为3230 L;5月16日降雨量小,仅部分小区产生少量壤中流而未见地表径流.在7、8月连续干旱时期,降雨后各处理均未产生壤中流或产流量极少,只产生了地表径流.

由表2可知,各处理中,对照处理泥沙流失总量最大,常规处理的泥沙流失总量最低,较优化和生物炭处理分别降低了39.78%和25.68%,可见在旱坡地中施常规肥可以有效缓解泥沙流失量.

2.2 紫色土旱坡地铵态氮对生物炭施用的响应

2.2.1 不同施肥处理下壤中流铵态氮浓度流失特征

如图4(a)所示,各施肥处理的壤中流铵态氮浓度排放高峰主要集中在5月.试验期内,壤中流铵态氮浓度最高值为0.17 mg·L⁻¹,即8月23日的常规处理,是同处理最低浓度(0.003 mg·L⁻¹)的56.21倍.5月26日,不同处理铵态氮浓度较5月20日的浓度均有所降低,其中常规处理降低了90.88%,其次为生物炭处理、优化处理和对照处理,分别降低了89.41%、83.43%和34.22%.在图4(b)中,常规处

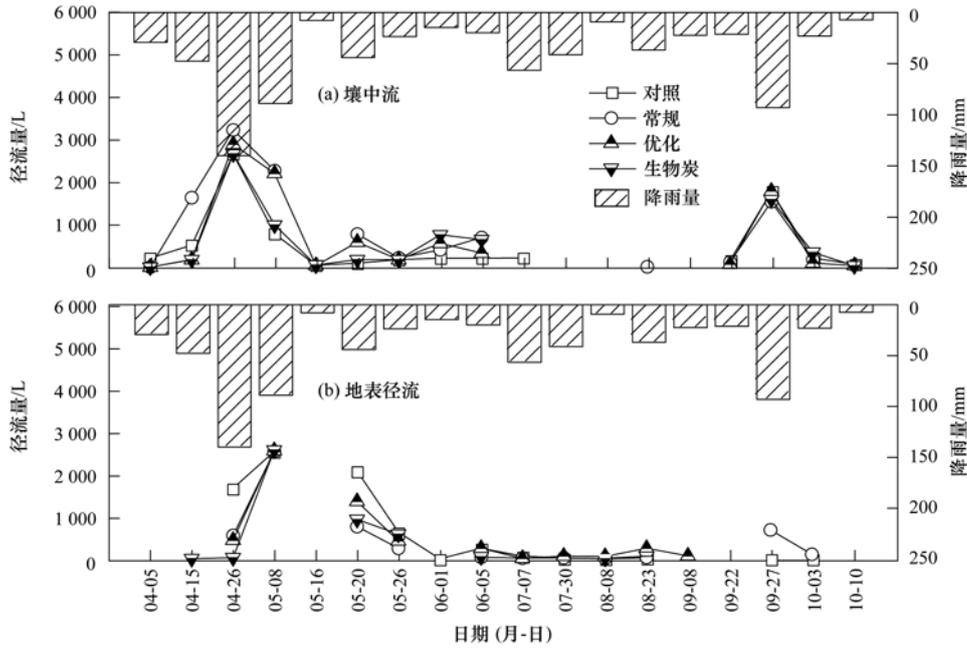


图 3 不同施肥处理下的产流量

Fig. 3 Yield flow under different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理的产沙量/kg·hm⁻²

Table 2 Sediment yield from different fertilization treatments/kg·hm⁻²

处理	日期(月-日)									总量
	04-26	05-08	05-20	05-26	06-05	07-30	08-08	08-23	09-27	
对照	8.66	34.34	84.03	8.77	3.01	0.02	0.06	0.02	0.09	139
常规	1.23	8.31	5.87	0.49	0.18	0.05	0.04	0.13	0.2	16.5
优化	1.66	7.4	2.97	10.48	1.21	0.24	1.4	2.04	0	27.4
生物炭	0.28	8.28	9.45	3.51	0.35	0	0.25	0.08	0	22.2

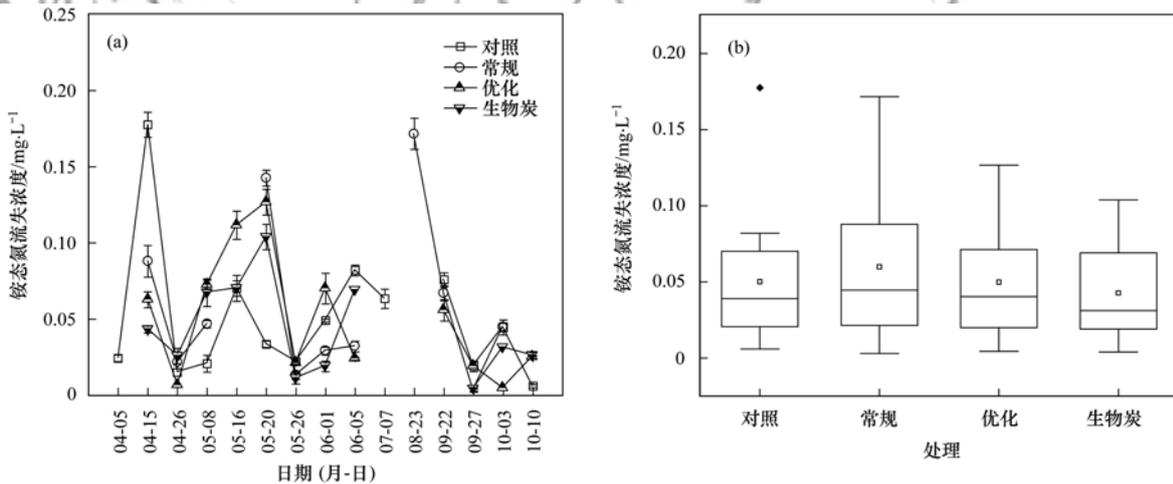


图 4 不同施肥处理下壤中流铵态氮浓度变化情况

Fig. 4 Changes in ammonium nitrogen concentration in soil under different fertilization treatments

理、优化处理和生物炭处理的壤中流铵态氮平均浓度分别为 0.06、0.05 和 0.04 mg·L⁻¹，各处理间均无显著性差异($P < 0.05$)。

2.2.2 不同施肥处理下地表径流铵态氮浓度流失特征

各处理地表径流铵态氮浓度变化趋势为先增加后减少再平稳增加，且均在 5 月 8 日出现了一次峰

值[图 5(a)]。本试验期内，地表径流铵态氮浓度最大值为 5 月 8 日的生物炭处理(2.40 mg·L⁻¹)，较同期(5 月 8 日)常规处理和优化处理的地表径流铵态氮浓度分别增加了 21.21% 和 25.13%。除 5 月 8 日以外，各处理地表径流中铵态氮浓度均小于 1 mg·L⁻¹。在图 5(b)中，生物炭处理的铵态氮浓度为 0.68 mg·L⁻¹，是小区地表径流铵态氮浓度均值最高值，其

次为常规处理和优化处理,分别较生物炭处理下降了 24.54% 和 27.00%;从图 5(b)可以看出,常规、优化和生物炭处理的均值分别为 0.51、0.49 和 0.68

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均较对照处理($0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)显著升高($P < 0.05$).从极值范围看,生物炭处理的变化范围最大,为 $0.07\sim 0.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;各处理均存在离群值.

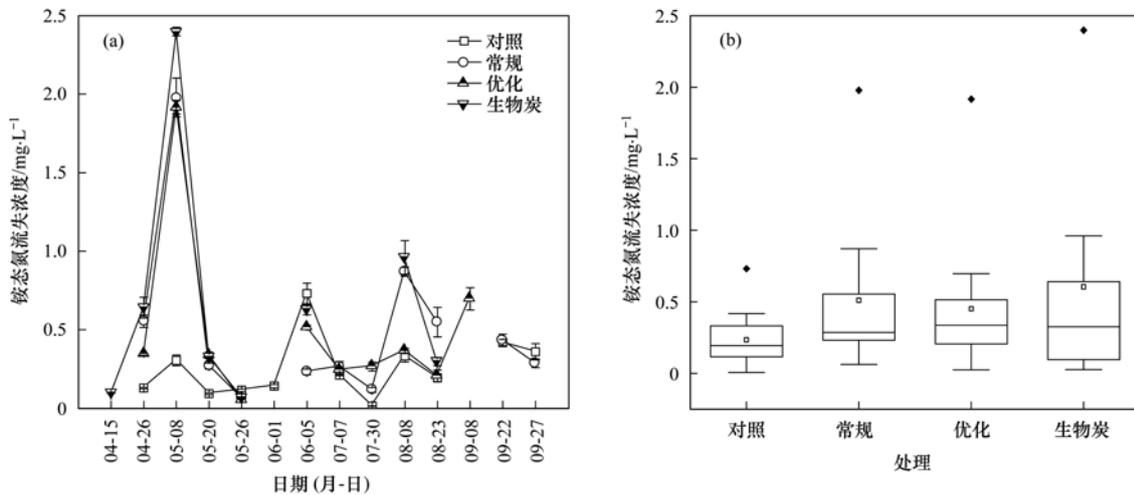
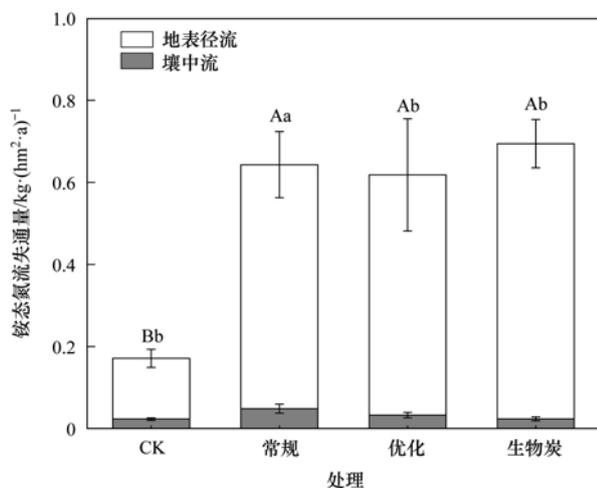


图 5 不同施肥处理地表径流铵态氮浓度变化情况

Fig. 5 Changes in ammonium nitrogen concentration in surface runoff under different fertilizer treatments

2.2.3 不同施肥处理下铵态氮流失通量

通过对试验期内各处理铵态氮流失通量的计算发现(图 6),铵态氮主要随地表径流流失,各处理的地表径流铵态氮流失通量显著高于壤中流;同一处理下的各处理地表径流流失通量占比为 86.51%~96.58%.在试验小区中,生物炭处理的铵态氮流失通量最大 [$0.69\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$],是常规处理和优化处理的 1.08 倍和 1.12 倍,三者之间并没有显著差异,但与对照处理相比,常规、优化和生物炭处理的铵态氮流失通量均显著升高($P < 0.05$).



不同大写字母表示不同处理地表径流差异显著,不同小写字母表示不同处理壤中流差异显著($P < 0.05$),下同

图 6 不同施肥处理铵态氮流失通量变化情况

Fig. 6 Change in ammonium nitrogen loss flux under different fertilization treatments

2.3 紫色土旱坡地硝态氮对生物炭施用的响应

2.3.1 不同施肥处理下壤中流硝态氮浓度流失特征

如图 7(a)所示,各处理壤中流硝态氮浓度均出现了 3 次峰值.第一次峰值出现在 5 月 8 日,其中常规处理硝态氮流失浓度最大,为 $24.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相比对照,各施肥处理硝态氮浓度均提高了 19%~192%.第二次峰值出现在 5 月 26 日的常规处理,为 $63.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较优化和生物炭处理的最大浓度提升了 1.12~1.79 倍,除对照外,其余各施肥处理硝态氮浓度均有所提升.第三次峰值于 9 月 22 日出现,各处理壤中流硝态氮均有所提高,其中常规处理为 8 月 23 日的 2.91 倍.从壤中流硝态氮浓度均值来看[图 7(b)],对照处理的平均浓度最低,为 $10.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而常规处理($39.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)最高,是生物炭处理壤中流硝态氮平均浓度的 1.69 倍.总体上,施生物炭可以较常规施肥处理有效降低壤中流硝态氮浓度.

2.3.2 不同施肥处理下地表径流硝态氮浓度流失特征

在图 8(a)中,各施肥处理间的地表径流硝态氮浓度出现了两次排放峰值.第一次峰值出现在 5 月 26 日的常规处理($4.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),分别较优化处理和生物炭处理提高了 15.07% 和 51.90%.各施肥处理的地表径流硝态氮浓度峰值出现于 8 月 8 日,其中常规处理浓度最大,为 $4.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别是优化处理和生物炭处理的 1.94 和 4.88 倍.从地表径流硝态氮浓度均值来看[图 8(b)],常规处理平均浓度最大($1.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),分别较优化处理和生物炭

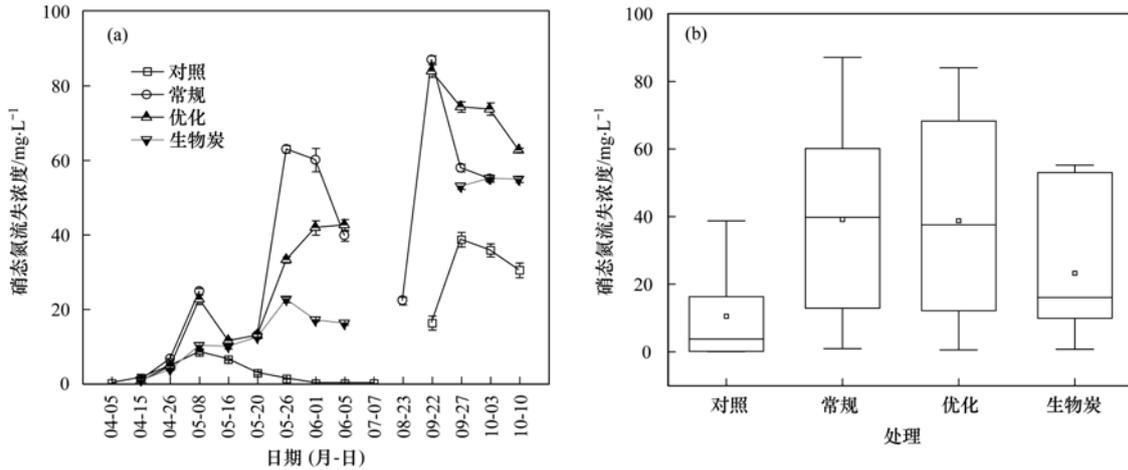


图 7 不同施肥处理壤中流硝态氮浓度变化情况

Fig. 7 Changes in nitrate nitrogen concentrations in soils under different fertilization treatments

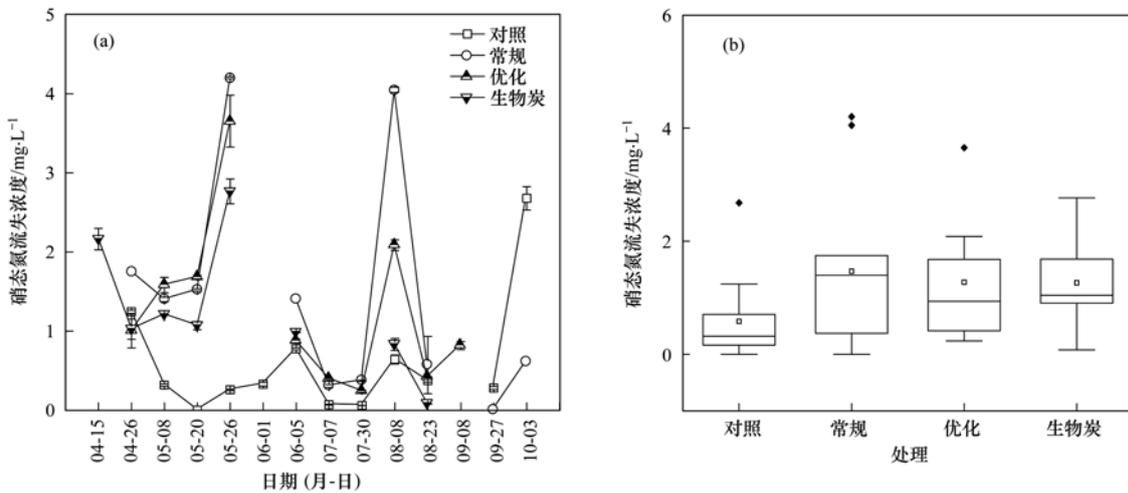


图 8 不同施肥处理地表径流硝态氮浓度变化情况

Fig. 8 Changes in nitrate nitrogen concentration in surface runoff under different fertilization treatments

处理和对照处理提高了 15.75% 和 51.90%, 但各处理间无显著性差异。

2.3.3 不同施肥处理下硝态氮流失通量特征

本试验中, 各处理的壤中流硝态氮流失通量显著高于地表径流硝态氮流失通量, 在同一处理下, 壤中流硝态氮流失通量占总硝态氮流失通量的 92.61% ~ 96.36%。各施肥处理相较于对照处理显著增加了硝态氮流失通量, 其中常规处理的硝态氮流失通量最大, 为 19.16 kg·(hm²·a)⁻¹ (图 9); 优化处理的流失通量为 15.12 kg·(hm²·a)⁻¹, 较常规处理显著下降了 21.04%; 而生物炭处理 [8.62 kg·(hm²·a)⁻¹] 与二者相比均有所降低, 其流失通量较常规处理显著下降了 54.99% (P < 0.05)。

2.4 紫色土旱坡地颗粒态氮浓度对生物炭施用的响应

2.4.1 小区颗粒态氮浓度

本试验中, 除对照外, 各施肥处理的颗粒态氮浓度均在 5 月 8 日达到峰值 (图 10), 其中常规处理的

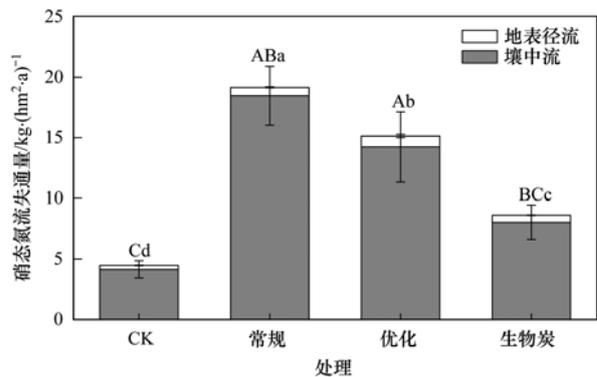


图 9 不同施肥处理硝态氮流失通量变化情况

Fig. 9 Changes in nitrate nitrogen flux under different fertilization treatments

浓度最大, 为 10.38 mg·L⁻¹, 较前一次产流提高了 38.56 倍, 生物炭处理的颗粒态氮浓度最小, 为 6.43 mg·L⁻¹, 分别比常规处理降低了 25.04% 和 41.76%。6 ~ 8 月的产流中, 各处理的颗粒态氮浓度均无显著差异性。

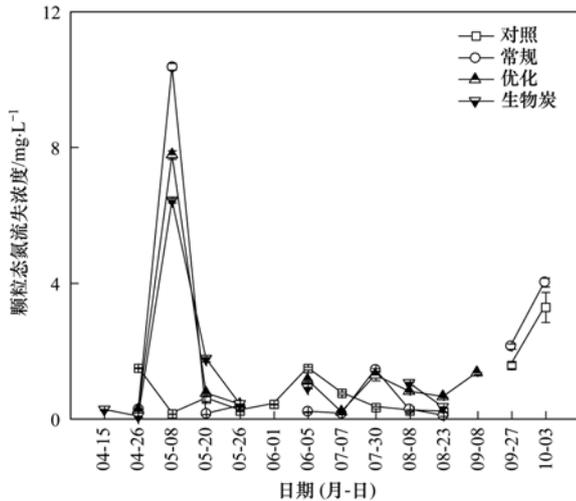


图 10 不同施肥处理颗粒态氮浓度变化情况

Fig. 10 Changes in particulate nitrogen concentration under different fertilization treatments

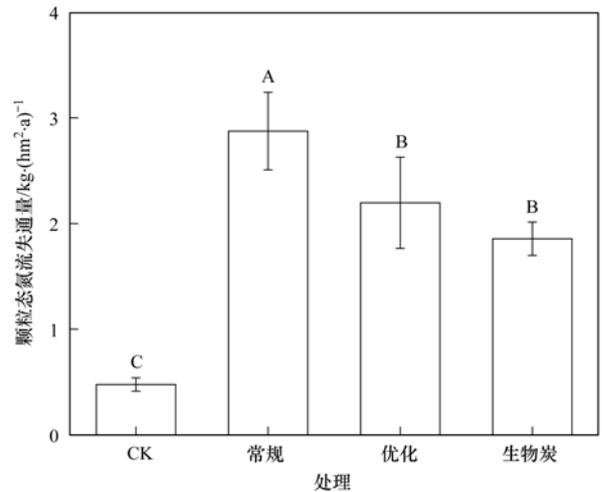


图 11 不同施肥处理颗粒态氮流失通量变化情况

Fig. 11 Changes in particulate nitrogen loss flux under different fertilization treatments

2.4.2 不同施肥处理下颗粒态氮流失通量特征

图 11 可以看出,在试验小区中,各施肥处理的颗粒态氮流失通量较对照处理均有所提高,其中常规处理的颗粒态氮流失通量[$2.87 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]最大,是对照处理的 5.04 倍,而生物炭处理[$1.86 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]最小,是对照处理的 2.90 倍.与常规处理相比,优化处理和生物炭处理显著降低了 23.59% 和 35.41% ($P < 0.05$).

2.5 紫色土旱坡地全氮浓度对生物炭施用的响应

2.5.1 不同施肥处理下壤中流全氮浓度流失特征

从图 12 (a) 可以看出,试验期内常规处理出现了两次峰值,第一次是在 5 月 26 日,其壤中流全氮浓度为 $112.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 第二次峰值出现在 9 月 22 日,为 $93.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而其余处理的壤中流全氮浓度峰值均出现在 9 月,其中峰值最大的是优化处理 ($92.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

从图 12 (b) 可以看出,常规处理的壤中流全氮

平均浓度最高,为 $47.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,优化处理 ($44.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和生物炭处理 ($26.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 次之,对照处理最低,为 $15.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 常规处理的极值变化范围最大,为 $1.14 \sim 112.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对照和生物炭处理的极值变化范围较小且比较相近.

2.5.2 不同施肥处理下地表径流全氮浓度流失特征

如图 13 (a) 所示,除对照处理外,其余施肥处理的地表径流全氮浓度均呈现出类似的变化趋势,皆在 5 月 8 日达到全年峰值,其中常规处理最大,为 $13.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对照处理最低,仅为 $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 6 月 1 日的降雨中,只有对照处理产生径流. 6 ~ 7 月,各处理的地表径流全氮浓度较低且比较稳定. 在 8 月 8 日的地表径流中,各处理的全氮浓度都有小幅度上升,其中常规处理较上一次径流浓度提升了 1.49 倍,提升得最为明显.

如图 13 (b) 所示,常规施肥处理的地表径流全年浓度均值最高,为 $4.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,生物炭处理

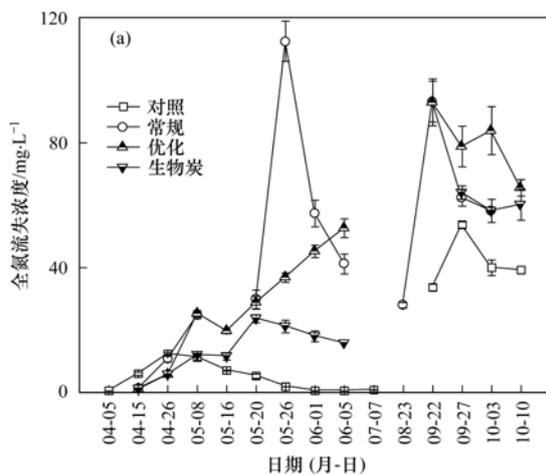
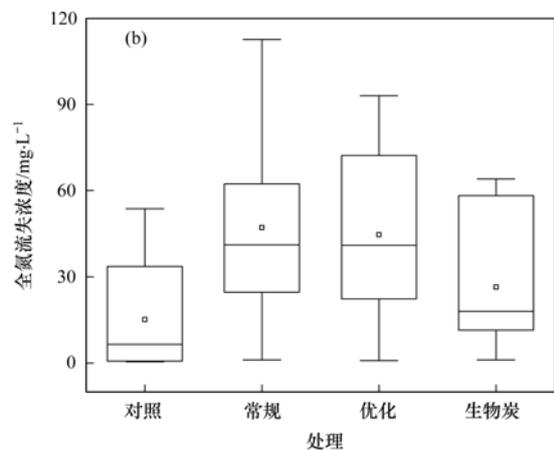


图 12 不同施肥处理壤中流全氮浓度变化情况

Fig. 12 Changes in total nitrogen concentration in the middle stream of different fertilization treatments



(3.03 mg·L⁻¹) 和优化处理(2.92 mg·L⁻¹) 次之, 对照处理最低, 仅为 1.81 mg·L⁻¹, 其中对照处理和常规处理呈现显著性差异($P < 0.05$). 从极值范围看, 优化处理和生物炭处理的极值范围相近, 为 5.2 mg·L⁻¹ 左右, 但常规处理存在离群值(13.07

mg·L⁻¹).

对各施肥处理下地表径流和壤中流中的全氮浓度和硝态氮浓度进行相关性分析(表 3), 结果表明, 各施肥处理的地表径流和壤中流中的全氮浓度和硝态氮浓度均存在极显著正相关关系($P < 0.01$).

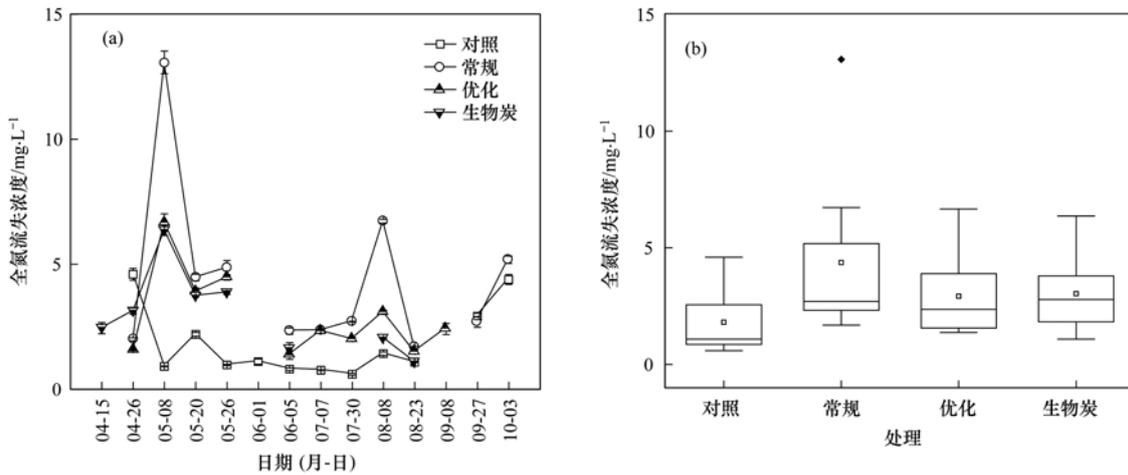


图 13 不同施肥处理地表径流全氮浓度变化情况

Fig. 13 Changes in total nitrogen concentration in surface runoff under different fertilization treatments

表 3 全氮浓度与硝态氮浓度的相关关系

Table 3 Correlation between total nitrogen concentration and nitrate nitrogen concentration

	对照(硝态氮)	常规(硝态氮)	优化(硝态氮)	生物炭(硝态氮)
对照(全氮)	0.973 **	—	—	—
常规(全氮)	—	0.938 **	—	—
优化(全氮)	—	—	0.991 **	—
生物炭(全氮)	—	—	—	0.987 **

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关

2.5.3 全氮流失通量变化特征

由表 4 可知, 常规处理无论在壤中流中还是地表径流中, 其全氮流失通量均最高, 分别为 30.84 kg·(hm²·a)⁻¹ 和 4.04 kg·(hm²·a)⁻¹, 且均显著高于生物炭处理的两种径流全氮流失通量; 在泥沙中, 对照处理的全氮流失通量达到最

高, 为 4.31 kg·(hm²·a)⁻¹, 其余 3 种处理之间无显著差异性; 通过总流失通量可以发现, 常规处理的全氮流失通量表现为最高 [35.58 kg·(hm²·a)⁻¹], 较生物炭处理提高了 65.57%. 总体上, 生物炭处理相较于其他处理能较好地减少试验小区的全氮流失通量.

表 4 不同施肥处理下全氮流失通量情况/kg·(hm²·a)⁻¹

Table 4 Total nitrogen loss flux under different fertilization treatments/kg·(hm²·a)⁻¹

处理	壤中流	地表径流	泥沙	总流失通量
对照	15.76 ± 2.05B	1.56 ± 0.25CD	4.31 ± 1.18A	21.63 ± 3.45B
常规	30.84 ± 5.78A	4.04 ± 0.79A	0.70 ± 0.16B	35.58 ± 6.70A
优化	29.59 ± 3.20A	2.62 ± 0.49B	0.99 ± 0.23B	33.20 ± 3.79A
生物炭	18.33 ± 1.82B	2.27 ± 0.29BC	0.89 ± 0.14B	21.49 ± 2.25B

1) 列中不同大写字母表示同一流失途径不同施肥处理之间差异显著($P < 0.05$)

3 讨论

紫色土坡耕地的壤中流和地表径流量受施肥方式的影响, 且有研究表明平衡施肥是有效减轻坡耕地的土壤氮素流失的重要途径^[15]. 生物炭作为有机物料, 因其多孔结构和特殊的表面特性具有很强的

吸附性, 可以有效地将氮素保留在土壤中达到减少氮素流失的目的^[16]. 在本研究中, 化肥减量配施生物炭处理能明显降低总径流量, 其对壤中流的截留效果高于地表径流量. 这是由于生物炭具有特殊的物理特性能够有效增加土壤持水量, 使水分可以更好地保存在土壤中, 减少水流下渗, 但当降雨量超过

了生物炭的保水性临界值时,就无法达到显著降低径流量的效果^[17].因此化肥减量配施生物炭处理的径流量较常规施肥处理的径流量显著升高.本试验中,硝态氮、铵态氮和全氮的流失浓度在各处理地表径流和壤中流中存在较大差异.其中,不同处理硝态氮的流失浓度远高于铵态氮,且硝态氮浓度和全氮浓度呈现出极其显著的正相关性($P < 0.01$),印证了前人的研究结果^[18, 19].在土壤中施入氮肥,会使其经历一系列生物化学反应而逐渐转变成硝态氮、亚硝态氮和铵态氮等形式,其中硝态氮最易被吸收或淋失^[20],而铵态氮易被土壤吸附^[21],导致硝态氮多被淋洗至土壤剖面的下层,铵态氮则滞留在上中层,因此各处理地表径流铵态氮浓度均显著高于壤中流;由于硝态氮主要富集在土壤剖面的下层,各处理地表径流硝态氮浓度均低于壤中流.林超文等^[1]通过模拟径流小区观测紫色土产流产沙量的试验来探究不同施肥方式和不同降雨强度对紫色土区氮素流失的影响,结果表明,不同施肥方式对壤中流中不同氮素形态的流失浓度影响较大,而地表径流受到的影响则较小.在本研究中地表径流的全氮和硝态氮浓度在施肥后显著增加,可能是因为降雨后滞留在土壤上层的大量硝态氮随地表径流流失.8~10月出现各处理地表径流的全氮浓度无明显变化,而壤中流则出现明显上升的现象,可能是由于该时段内气候干旱,降雨量显著减少,并未产生地表径流,降雨量较小时在下渗的过程将氮素累积在土壤中,由后期降雨形成地表径流和壤中流将土壤中的氮素集中淋溶出来^[22].施生物炭处理与常规施肥处理相比降低了壤中流氮素的平均浓度及浓度极值范围,可能是因为生物炭具有特殊的表面特性,能够吸附土壤中的氮素,促进土壤中的固氮作用,以此来降低氮素的淋溶损失^[23].有研究表明紫色土氮素主要是随泥沙流失^[24~27],硝态氮是其流失的主要形态,泥沙可携带的氮素远多于地表径流和壤中流,这与本研究结果不一致.主要是因为过去仅集中在对地表径流中不同形态氮素流失的研究,而并未将壤中流对土壤氮素流失的影响考虑在内,紫色土具有土层薄,质地疏松、孔隙度大和渗透强等特点,在降雨过程中更容易下渗并产生壤中流,随壤中流流失的氮素高于地表径流且在总氮素流失中占较大份额,因此要深入研究紫色土氮素流失特征,对壤中流中氮素流失的研究是必不可少的^[23].本试验中,各处理壤中流的氮流失通量均高于地表径流,说明紫色土旱坡地氮流失的主要途径为壤中流,这与刘祥章^[28]和贾海燕等^[29]的研究结果相符.张旭辉等^[30]通过温室油菜盆栽试验发现,生物炭对氮素具有吸附作

用,添加生物炭处理的紫色土全氮含量增加,氮肥利用率有所提高.

4 结论

(1)壤中流是雨季径流输出的主要途径,各施肥处理中壤中流流失量占总径流量的61.80%~68.80%;平衡施肥能影响坡耕地的产沙量,其中化肥减量配施生物炭效果最显著.

(2)铵态氮主要通过地表径流流失,其中施生物炭处理流失通量最大.硝态氮主要通过壤中流流失且是全氮流失的主要形态,壤中流硝态氮流失量占硝态氮流失总量的92.61%~96.36%.

(3)总体上,化肥减量配施生物炭处理能明显降低径流量,施生物炭处理在降雨量较大时会增加地表径流中氮流失量.

参考文献:

- [1] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1847-1854.
Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, et al. Effect of different fertilization methods and rain intensities on soil nutrient loss from a purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(9): 1847-1854.
- [2] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
Quan W M, Yan L J. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 291-299.
- [3] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [4] Hayes M H B. Biochar and biofuels for a brighter future[J]. Nature, 2006, 443(7108): 144.
- [5] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2351-2359.
Qi L, Gao M, Guo X M, et al. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2351-2359.
- [6] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4327-4337.
Luo M, Tian D, Gao M, et al. Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4327-4337.
- [7] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.
- [8] 吴蔚君, 徐云连, 邢素林, 等. 生物炭对土壤氮磷转化和流失的影响[J]. 农学学报, 2018, 8(9): 20-26.
Wu W J, Xu Y L, Xing S L, et al. Effect of biochar on soil nitrogen and phosphorus transformation and loss[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(9): 20-26.
- [9] 张文娟, 余冬立, Agbna G H D, 等. 生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3979-3986.
Zhang W J, She D L, Agbna G H D, et al. Effects of biochar amendment and irrigation on denitrification losses in greenhouse

- tomato fields [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (10): 3979-3986.
- [10] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. *地球与环境*, 2011, **39**(2): 278-284.
Zhou Z H, Li X Q, Xing Y, *et al.* Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(2): 278-284.
- [11] 丁文峰, 张平仓. 紫色土坡面壤中流养分输出特征[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(4): 15-19, 53.
Ding W F, Zhang P C. Characteristics of nutrient transportation of subsurface flow of purple soil slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(4): 15-19, 53.
- [12] 徐国鑫. 不同施肥处理对紫色土旱坡地氮磷流失及作物效应的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
Xu G X. Effects of different fertilization treatments on nitrogen and phosphorus loss and crop benefit in purple soil of arid sloping farmland[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [15] 林超文, 庞良玉, 罗春燕, 等. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5552-5560.
Lin C W, Pang L Y, Luo C Y, *et al.* Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient losses from a purple soil in Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(10): 5552-5560.
- [16] 代银分, 李永梅, 李丽, 等. 秸秆生物炭对施猪粪有机肥土壤磷流失及白菜产量的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, **36**(11): 793-799.
Dai Y F, Li Y M, Li L, *et al.* The impact of straw biochar on soil phosphorus loss and cheiness cabbage production under applying pig manure organic fertilizer [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, **36**(11): 793-799.
- [17] 魏永霞, 王鹤, 吴昱, 等. 生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, **50**(3): 231-240.
Wei Y X, Wang H, Wu Y, *et al.* Effect of biochar on soil hydrodynamic parameters under different slopes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(3): 231-240.
- [18] 高林林. 典型紫色土坡耕地不同施肥处理径流的氮素流失特征研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2018.
Gao L L. Study on nitrogen loss characteristics of runoff in typical purple soil slope [D]. Nanchong: China West Normal University, 2018.
- [19] 陈成龙. 三峡库区小流域氮磷流失规律与模型模拟研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
Chen C L. Spatial and temporal variations and model simulation of nitrogen and phosphorus loss in a small catchment of the Three Gorges reservoir area [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [20] 张福珠, 熊先哲, 戴同顺, 等. 应用¹⁵N 研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J]. *环境科学*, 1984, **5**(1): 21-24.
- [21] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. *土壤学报*, 1996, **33**(1): 28-36.
Wang J Y, Wang S J, Chen Y, *et al.* Study on the nitrogen leaching in rice fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, **33**(1): 28-36.
- [22] 唐珧, 刘平, 白光洁, 等. 设施菜地氮素淋溶影响因素研究进展[J]. *山西农业科学*, 2017, **45**(3): 473-476, 481.
Tang Y, Liu P, Bai G J, *et al.* Research advance in factors affecting on nitrogen leaching in greenhouse vegetables [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, **45**(3): 473-476, 481.
- [23] 刘玉学, 吕豪豪, 石岩, 等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 304-310.
Liu Y X, Lyu H H, Shi Y, *et al.* Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 304-310.
- [24] 蒋光毅, 史东梅, 卢喜平, 等. 紫色土坡地不同种植模式下径流及养分流失研究[J]. *水土保持学报*, 2004, **18**(5): 54-58, 63.
Jiang G Y, Shi D M, Lu X P, *et al.* Research on runoff and nutrient loss from slopeland of purple soil under different planting model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, **18**(5): 54-58, 63.
- [25] 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展[J]. *水土保持学报*, 2000, **14**(1): 82-87.
Xu F, Cai Q G, Wu S A. Progress in research on nutrient processes of sloping agroforestry systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **14**(1): 82-87.
- [26] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, **5**(2): 23-29.
Xu F, Cai Q G, Wu S A. Effect of contour hedgerows on soil nutrient loss in slopeland[J]. *Journal of Soil Erosion and Water and Soil Conservation*, 1999, **5**(2): 23-29.
- [27] 黄丽, 丁树文, 董舟, 等. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, **4**(1): 8-13.
Huang L, Ding S W, Dong Z, *et al.* Study on nutrient losses of purple soil in three gorges reservoir region [J]. *Journal of Soil Erosion and Water and Soil Conservation*, 1998, **4**(1): 8-13.
- [28] 刘祥章. 紫色土坡耕地水分和硝态氮随壤中流运移过程的三维模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [29] 贾海燕, 雷阿林, 雷俊山, 等. 紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(10): 1658-1664.
Jia H Y, Lei A L, Lei J S, *et al.* Nitrate-N loss effected by the runoff process in purple soil-a simulation study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(10): 1658-1664.
- [30] 张旭辉, 李治玲, 李勇, 等. 施用生物炭对西南地区紫色土和黄壤的作用效果[J]. *草业学报*, 2017, **26**(4): 63-72.
Zhang X H, Li Z L, Li Y, *et al.* Effect of biochar amendment on purple and yellow soil[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, **26**(4): 63-72.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai; Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)