

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	
《环境科学》征稿简则(4303)	
信息	(4506, 4678, 4741)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地壤中流磷流失风险

赖佳鑫^{1,2}, 邓华¹, 朱浩宇^{1,3}, 黄容^{1,4}, 龙翼⁵, 王子芳¹, 高明^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 东海县农业农村局, 连云港 222399; 4. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 5. 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: 紫色土坡耕地是中国西南地区的重要农耕用地,也是三峡库区农业非点源污染的主要来源地之一,采取合理的措施控制其土壤养分流失对该区域非点源污染治理具有重要意义。以紫色土坡耕地为研究对象,通过3 a(2018~2020年)大田试验,设置不施肥(CK)、常规施肥(CF)、优化施肥(OF)、生物炭+优化施肥减量15%(BF)和秸秆+优化施肥减量15%(SF)这5个处理,对自然降雨条件下坡耕地地表径流(0~20 cm)和壤中流(20~60 cm)磷流失规律进行监测与评估。结果表明,施肥减少了紫色土坡耕地产沙量和地表径流流失通量,但增加了壤中流流失通量。地表径流正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、全磷(TP)和颗粒态磷(PP)总流失通量以BF处理最高,SF处理最低。各施肥处理壤中流磷流失通量均高于CK处理,且 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和TP流失通量以BF处理最高(213.88 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和694.54 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$),其次为OF和SF处理。冗余分析(RDA)结果表明,地表径流流失通量和生物炭施用是地表径流磷流失的主要正向影响因子,壤中流流失通量是壤中流磷流失的主要正向影响因子。化肥减量配施生物炭和秸秆可不同程度减少紫色土坡耕地产沙量与地表径流流失通量,而对于控制磷流失方面,秸秆覆盖表现出比其它施肥处理更大的优势,同时,生物炭和秸秆覆盖对紫色土坡耕地壤中流流失风险的影响需要得到重视。

关键词: 磷流失; 坡耕地; 生物炭; 秸秆; 三峡库区; 地表径流; 壤中流

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4541-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208088

Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland

LAI Jia-xin^{1,2}, DENG Hua¹, ZHU Hao-yu^{1,3}, HUANG Rong^{1,4}, LONG Yi⁵, WANG Zi-fang¹, GAO Ming^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Donghai County, Lianyungang 222399, China; 4. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 5. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The purple soil slope farmland is an important agricultural land in southwest China but is also one of the main sources of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area. Taking reasonable measures to control the loss of soil nutrients is of great significance to the treatment of non-point source pollution in the region. Here, a three-year (2018-2020) field runoff experiment was conducted to monitor and evaluate the phosphorus (P) loss in sloping farmland via surface runoff (i.e., surface flow, 0-20 cm) and subsurface runoff (i.e., subsurface flow, 20-60 cm), with five treatments including no fertilization (CK), conventional fertilization (CF), optimal fertilization (OF), biochar combined with 85% of OF (BF), and straw combined with 85% of OF (SF). The results showed that fertilization application reduced the sediment yields and surface runoff flux but increased the subsurface runoff flux. The total loss flux of phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), total phosphorus (TP), and particulate phosphorus (PP) in surface flow were the highest in the BF treatment and the lowest in the SF treatment. All fertilization applications increased the P loss fluxes in subsurface flow relative to that in CK. The highest $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and TP loss flux in subsurface flow was found in the BF (213.88 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 694.54 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively) treatment, followed by that in the OF and SF treatments. Redundancy analysis (RDA) results showed that surface runoff flux and biochar application were the main factors contributing to increased P loss in surface flow, and subsurface runoff flux was the main factor contributing to increased P loss in subsurface flow. In summary, the SF treatment reduced the amount of sediment yield and surface runoff flux in sloping farmland of purple soil and was the most effective for controlling P loss, whereas the risk of subsurface runoff flux requires further attention.

Key words: phosphorus loss; sloping farmland; biochar; straw; Three Gorges Reservoir area; surface flow; subsurface flow

农业非点源污染是一个全球性的环境问题。20世纪80年代以来,为提升作物产量,我国化肥年施用量逐年增加,2019年磷(P_2O_5)施用量已达到76.14 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [1,2]。过量施用化肥严重破坏了土壤结构,加剧了坡耕地水土流失[3],同时,由于磷素极易被土壤固定而难以被植物利用,致使磷素累积在土壤中[4],盈余的磷素则通过地表径流、渗漏等方式损失进入水体[5],影响水环境质量。因此,磷的农业非点源污染治理是一个研究重点[6]。

紫色土坡耕地约占三峡库区耕地总面积的四分之一,是我国西南地区重要的农耕用地[7],但紫色土存在基岩浅、土层薄和结构差的特点[8],更容易发生水土流失[9],因此,也是三峡库区农业非点源

收稿日期: 2022-08-10; 修订日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177019); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101); 重庆市研究生科研创新项目(CYS20111)

作者简介: 赖佳鑫(1997~),女,博士研究生,主要研究方向为土壤环境与质量,E-mail: JX_Lai@163.com

* 通信作者,E-mail: gaoming@swu.edu.cn

污染的主要来源地之一。径流是农田磷流失的主要载体。目前,关于径流养分损失的研究主要集中在以地表径流为主的植被覆盖^[10]、土地利用类型^[11]、种植模式^[12]和坡度坡长^[13,14]等方面,而对壤中流的研究较为缺乏^[15]。Gao 等^[16]研究表明,在短时间强降雨或低强度降雨的情况下,壤中流流失通量高于地表径流,从而成为径流流失的主要方式,而壤中流养分损失是影响地下水 and 水库水环境质量的重要因素^[17]。因此,紫色土坡耕地壤中流问题亟需关注。

生物炭是一种常用的土壤改良剂^[18],生物炭配施化肥具有增加土壤养分含量,提高土壤持水能力^[19],提升作物产量等优势,同时,生物炭还具有吸收和保留磷酸盐的作用^[20]。秸秆还田是世界上广泛使用的保护性耕作措施,对坡耕地具有良好的生态效应^[21],长期秸秆还田可改善土壤理化性状和提高作物产量^[22,23],针对非点源污染这一问题,秸秆还田在增强土壤保水保墒能力、减少产沙产流等方面具有优势^[21,24]。此外,为推进农业绿色可持续发展,我国提出了化肥减施增效行动方案,旨在不影响生产力的情况下,达到提高化肥利用率、提升农产品质量和改善农业环境等目的。纵观前人研究,多数学者仅对添加生物炭或秸秆对径流的影响进行了探讨,且研究内容主要集中在地表径流,而持续化肥减量配施生物炭和秸秆对壤中流的影响知之甚少。因此,本研究通过连续 3 a 定位监测自然降雨条件

下坡耕地磷流失规律,分析化肥减量配施生物炭和秸秆对坡耕地地表径流和壤中流的磷流失特征的影响,以期为推动中国农业向资源节约和环境友好的绿色生产方式发展提供理论基础,并为三峡库区坡耕地管理以及合理利用生物炭和秸秆还田控制非点源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县石宝镇(108°08′~108°12′E, 31°24′~31°30′N)的中国科学院成都山地灾害与环境研究所三峡库区水土保持与环境研究试验站,是三峡库区腹心地带(图 1),属亚热带东南季风区山地气候。区域内以山地丘陵地貌为主,根据中国土壤分类学研究区土壤被划分为紫色土,与美国农业部系统分类中的 Entisols 相当^[8,19]。

1.2 试验设计

本研究于 2017 年 10 月布设试验,对自然降雨下泥沙和径流的观测时间为 2018 年 1 月至 2020 年 12 月。本试验以标准径流小区的形式进行,各小区坡度为 15°,投影面积为 100 m² (20 m×5 m),土壤深度 60 cm,为保持各小区为独立单元,小区底面与四周均为混凝土修筑(图 1)。径流小区于 2015 年建成,此后在不施肥情况下进行了 2 a 的匀地试验,于 2017 年开始本试验处理,试验开始时耕层土壤(0~20 cm)基本理化性状如表 1 所示。

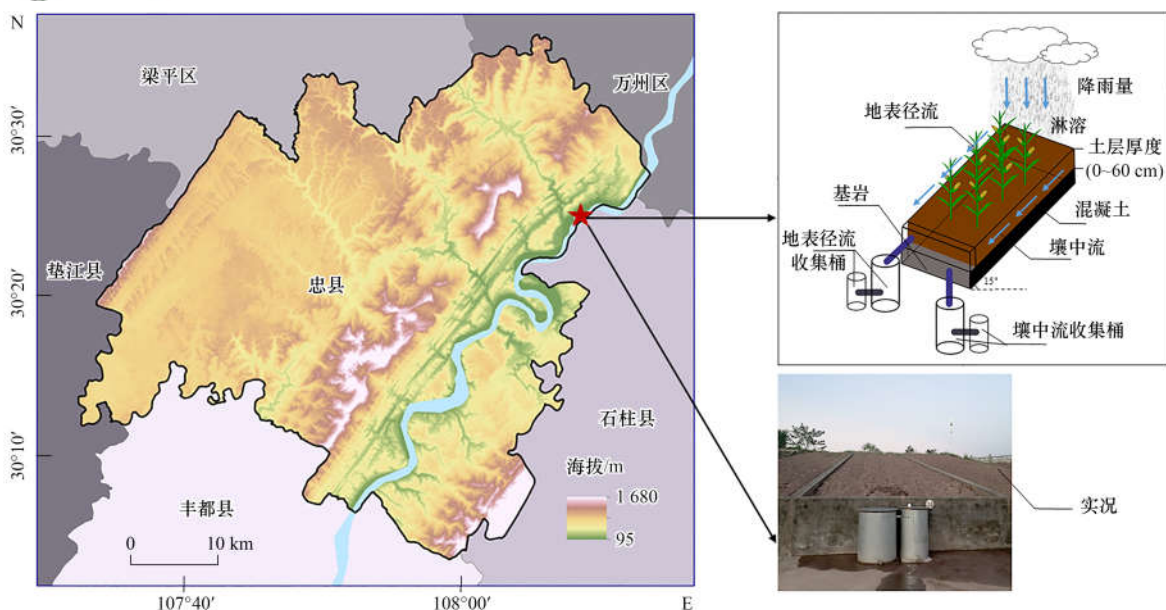


图 1 研究区与坡耕地径流小区试验场地示意

Fig. 1 Schematic illustration of study area location and the experimental site of runoff plot on sloping farmland

本试验种植制度为油菜-玉米轮作,共设置 5 个处理,3 次重复,分别为不施肥(CK)、常规施肥(CF)、优化施肥(OF)、生物炭+优化施肥减量

15%(BF)和秸秆+优化施肥减量 15%(SF)。其中常规施肥为当地农民习惯施肥量;优化施肥(OF)为当地农业部门根据测土配方试验结果提供的优化

施肥方案,生物炭由南京勤丰众成生物质新材料有限公司提供,其 $\omega(\text{C})$ 为 $614.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{TN})$ 为 $5.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{TP})$ 为 $3.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;玉米秸秆(玉米茎秆和叶片混合物)由当地农户提供,其 $\omega(\text{SOC})$ 为 $452.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{TN})$ 为 $8.23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{TP})$ 为 $3.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,还田时将玉米秸秆切成约 10 cm 的小段,均匀覆盖在地表后翻耕至土层 $10\sim 20\text{ cm}$ 深

度. 秸秆和生物炭均是在每年油菜种植前 2 d 均匀覆盖于地表,玉米季不再施用生物炭和秸秆;油菜季氮肥分基肥(70%)和追肥(30%)两次施用,磷、钾和硼肥作基肥一次性施用;玉米季第一次施肥为移栽时,各处理均施入 2.5 kg 尿素,其余肥料作追肥一次性施入. 具体各处理施肥与种收信息如表2所示.

表1 土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土壤指标	pH	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
		有机质	全氮(TN)	全磷(TP)	全钾(TK)	碱解氮(AN)	有效磷(AP)
数值	8.3	7560	350	300	32310	25.71	9.16

表2 不同处理施肥与种植收获情况¹⁾

Table 2 Fertilization and planting harvest information in different treatments

作物	处理	施肥量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$				生物炭用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	秸秆用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	施肥时间(年-月-日)		种收时间(年-月-日)	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	B			基肥	追肥	种植	收获
油菜	CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CF	150	90	90	15	—	—	2017-11-07	2017-12-05	2017-10-23	2018-04-29
	OF	120	75	75	15	—	—	2018-10-27	2018-11-20	2018-10-15	2019-04-30
	BF	102	63.8	63.8	15	1×10^4	—	2019-11-06	2019-12-03	2019-10-25	2020-05-02
	SF	102	63.8	63.8	15	—	4.5×10^3	—	—	—	—
玉米	CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CF	300	150	135	—	—	—	2018-04-20	2018-04-27	2018-04-13	2018-07-20
	OF	270	120	105	—	—	—	2019-04-16	2019-05-03	2019-04-10	2019-08-02
	BF	229.5	102	89.3	—	—	—	2020-04-24	2020-05-11	2020-04-17	2020-07-31
	SF	229.5	102	89.3	—	—	—	—	—	—	—

1) “—”为该处理未施用该肥料;施肥时间和种植时间分别为试验期间各年油菜季和玉米季的基肥、追肥施用时间以及种植、收获时间,如在2018年,玉米于4月13日种植、4月20日施用基肥、4月27日施用追肥、7月29日收获

1.3 采样与分析方法

1.3.1 水样和泥沙样采集与测定

试验区内布设虹吸式雨量计,实时记录降雨量,整个监测期内涉及3个雨季(2018年5~9月、2019年5~9月和2020年6~10月).在每次自然降雨产生径流后,立即测量各径流小区地表径流和壤中流产流量,随后分别采集地表径流和壤中流的水样,并对各水样进行充分搅拌.地表径流水样用于测定各形态磷含量和泥沙含量,壤中流水样仅用于测定各形态磷含量.

测定时,需先将样品pH值调至7.0左右,取部分水样原液,采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定全磷(TP)和可溶性总磷(DTP);再取200 mL水样过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,采用钼蓝比色法测定正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$).颗粒态磷浓度(PP)=TP浓度-DTP浓度.

1.3.2 土样采集与测定

采用多点随机采样法采集表层土($0\sim 20\text{ cm}$),将同一试验小区的土壤样品混合均匀,以四分法取1 kg土样带回实验室,用于测定土壤氮、磷基本理

化性质. 试验过程共采样4次,首次为2017年试验开始前进行基础土样采集,其余各次为2018~2020年玉米收获后进行土壤采集. TN用 H_2SO_4 消煮-凯氏定氮法测定,TP用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定,AN用碱解扩散法测定,铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)用KCl提取-靛酚蓝比色法测定,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)用KCl提取-紫外分光光度法测定,AP用钼蓝比色法测定^[25,26].

1.4 数据处理

每次降雨产生地表径流和壤中流的流量计算公式为^[27]:

$$R = \frac{v}{\rho A} \times 1\,000 \tag{1}$$

式中, R 为地表径流或壤中流流量(mm), v 为径流桶中水的体积(L), ρ 为水的密度($1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), A 为地块面积(m^2).

降雨产生地表径流和壤中流时磷流失量计算公式为^[28]:

$$P_i = \sum_{i=1}^n (C_i \times V_i) \tag{2}$$

式中, P_i 为水样中各形态磷流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_i 为第 i 次径流事件水中各形态磷的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V_i 为第 i 次径流事件中径流量($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$), n 为一个完整监测期的产流总次数.

原始数据基于 Excel 2016、SPSS 25.0 和 Origin 9.0 软件进行处理与分析. 所有结果均用 3 次测定平均值表示. 处理间差异采用 Duncan 多重比较法 ($P<0.05$).

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施生物炭和秸秆对产沙和径流的影响

如图 2 和图 3 所示,2018~2020 年 CK 处理产沙、发生地表径流和壤中流次数均为最多,分别为 29、33 和 69 次; SF 处理产沙和发生地表径流次数均为最少,分别为 15 次和 19 次;发生壤中流次数则以 CF 处理最少,为 43 次;产沙和产流事件主要

发生在玉米季. 各处理产沙量年际变化无明显规律,其中 CK 处理 3 a 总产沙量最高,为 $25\,801\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为 BF 处理($22\,168\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),SF 处理最低,为 $2\,704\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 在 CK ($R^2=0.266$, $P<0.05$)、CF ($R^2=0.265$, $P<0.05$) 和 OF ($R^2=0.243$, $P<0.05$) 处理中,地表径流流失通量与降雨量存在显著非线性相关性[图 2(e)]. CK 处理地表径流流失通量最高,3 a 地表径流总量为 $1392.88\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,而 SF 处理地表径流流失总量最少,为 $298.66\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,与其它处理相比,降低了 $60.08\%\sim78.56\%$. CK ($R^2=0.588$, $P<0.01$)、CF ($R^2=0.706$, $P<0.01$)、OF ($R^2=0.684$, $P<0.01$)、BF ($R^2=0.511$, $P<0.01$) 和 SF ($R^2=0.631$, $P<0.01$) 处理壤中流流失通量均与降雨量存在极显著非线性相关性[图 2(f)]. BF 和 SF 处理壤中流流失总量分别为 $5\,450.55\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\,430.16\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,与 CK、CF 和 BF 处理相比,增加了 $22.58\%\sim$

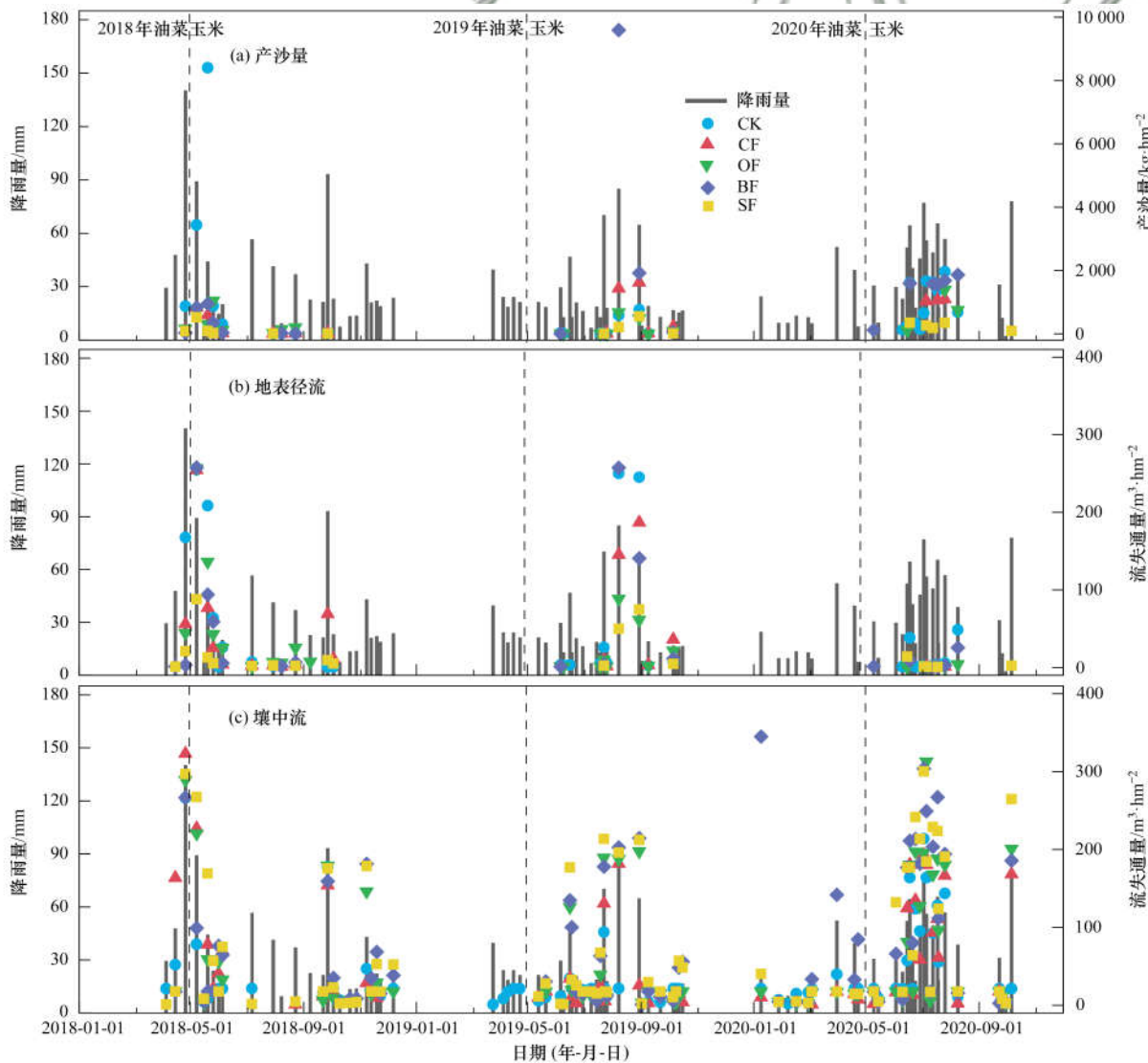
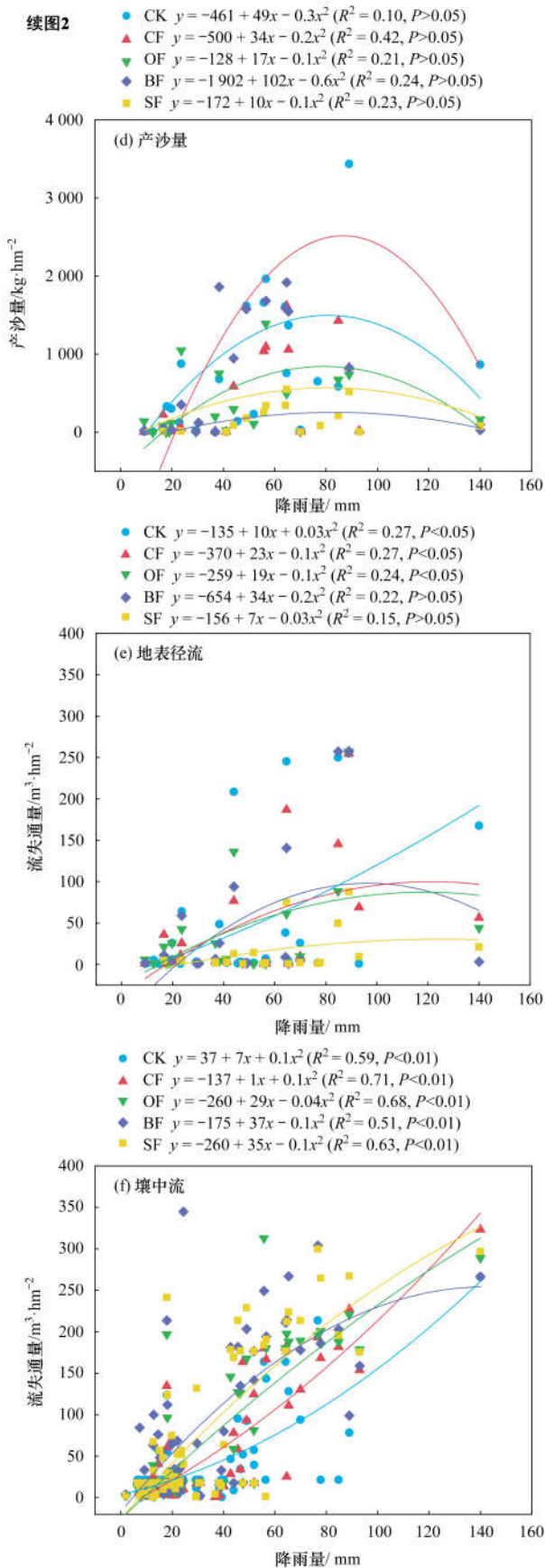


图 2 降雨量、产沙量和产流量年际变化

Fig. 2 Interannual variation in rainfall, sediment yield and runoff flux

续图2



46.12%。总体来看,不同处理降雨后径流流失均以壤中流为主要流失方式(67.83%~94.79%),且2019和2020年壤中流流失主要集中在6~8月,与CK处理相比,各施肥处理均显著降低了地表径流

失通量($P < 0.05$),但不同程度增加了壤中流流失风险,尤以BF处理更为明显。

2.2 化肥减量配施生物炭和秸秆对磷浓度的影响

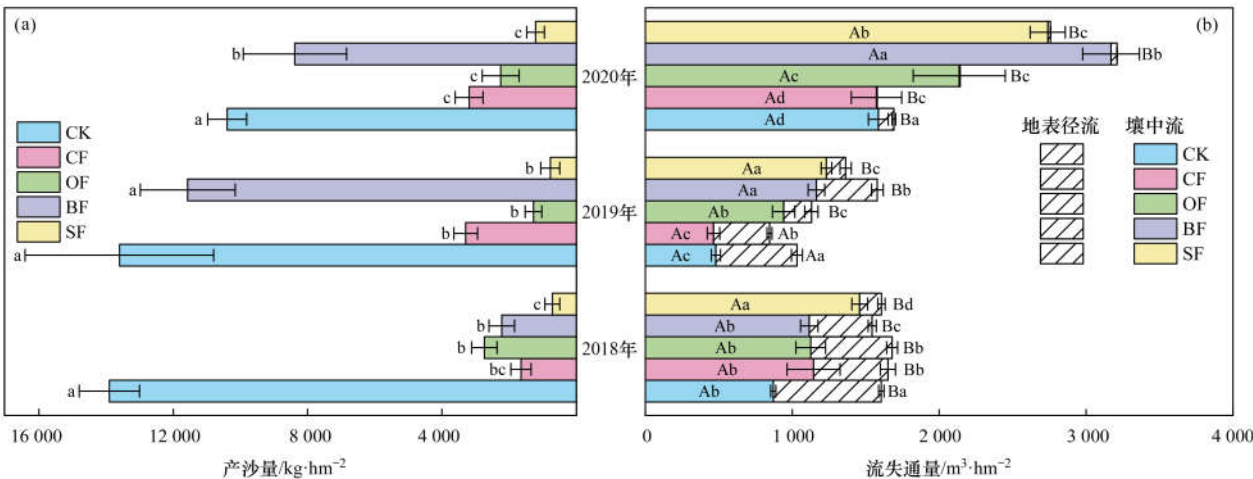
2018~2020年油菜-玉米轮作标准径流小区地表径流中磷(PO_4^{3-} -P、TP和PP)浓度变化如图4所示,地表径流 PO_4^{3-} -P、TP和PP浓度峰值均出现在玉米季施肥后,其间 $\rho(\text{PO}_4^{3-}$ -P)峰值出现在2018年5月8日的CF处理,为 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{PP})$ 峰值均出现在2018年8月23日的BF处理,分别为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

地表径流各施肥处理 PO_4^{3-} -P浓度平均值比CK处理增加了56.38%~65.46%,但处理间差异不显著;各施肥处理TP浓度平均值比CK处理增加了22.33%~96.29%,以BF处理最高($0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且显著高于其它处理($P < 0.05$);与CK处理相比,CF、OF和BF处理PP浓度平均值分别增加了0.64%、42.86%和99.41%,其中BF处理($0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著高于其它处理($P < 0.05$),而SF处理比CK处理降低了17.93%。此外,CK和BF处理中PP占TP的质量分数分别为67.66%和68.73%,CF和OF处理较前二者有所降低,但PP质量分数仍大于50%,在TP中占主导地位,而SF处理中PP占TP的质量分数最低,为47.83%。

2018~2020年壤中流中各磷浓度变化如图5所示, PO_4^{3-} -P和TP浓度峰值均出现在玉米季施肥后,其间 $\rho(\text{PO}_4^{3-}$ -P)峰值出现在2019年10月12日的CK处理,为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TP})$ 峰值出现在2020年8月23日的CF处理,为 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。各处理 PO_4^{3-} -P和TP浓度呈波动趋势。与CK处理相比,CF、OF和BF处理 PO_4^{3-} -P浓度平均值分别增加了7.87%、13.36%和37.80%,而SF处理降低了5.14%,但处理间差异不显著;与CK处理相比,各施肥处理TP浓度增加了9.23%~39.94%,但处理间差异不显著。

2.3 化肥减量配施生物炭和秸秆对磷流失通量的影响

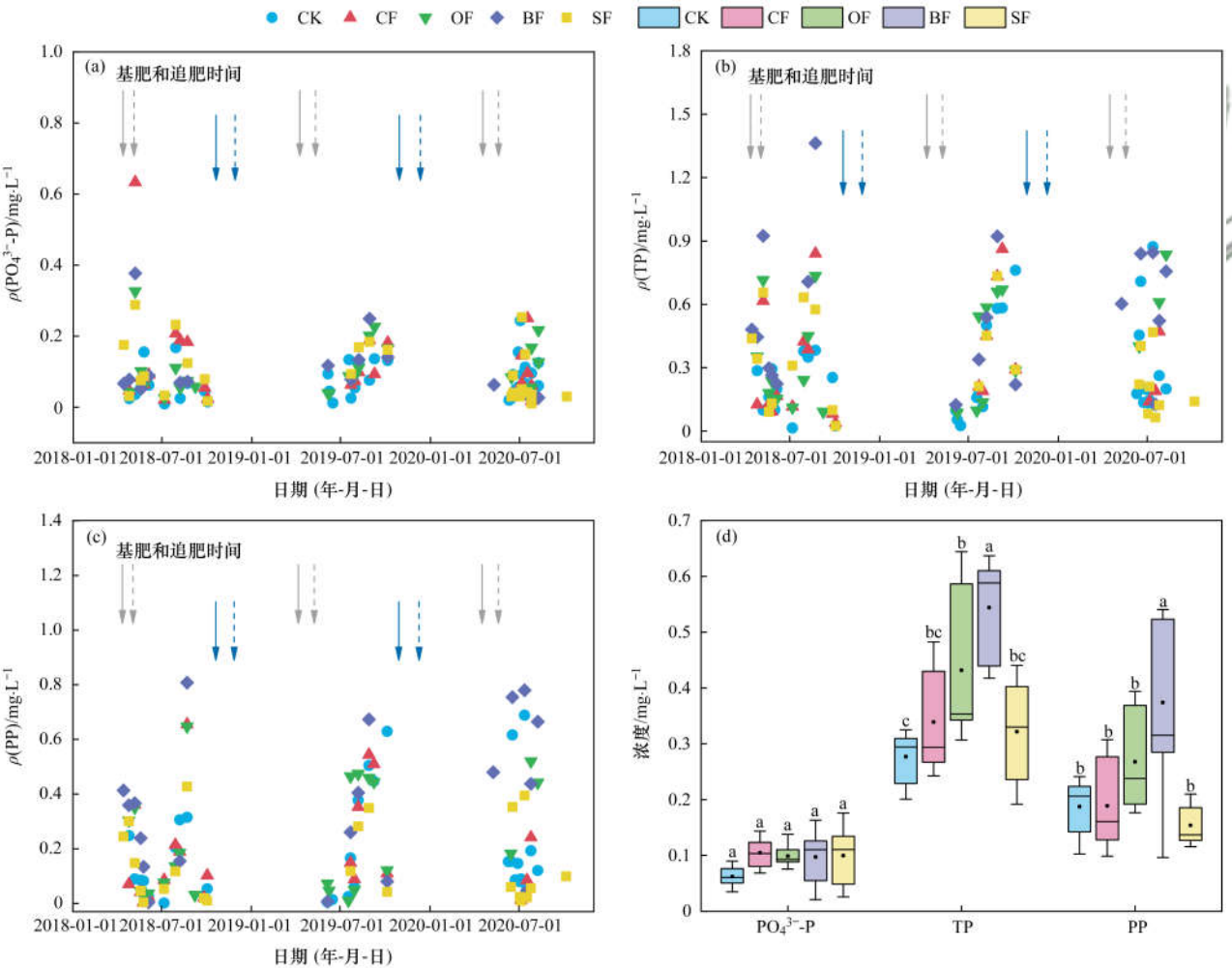
各处理磷(PO_4^{3-} -P、TP和PP)流失通量如表3所示。2018~2020年期间,各处理地表径流的 PO_4^{3-} -P、TP和PP流失量变幅分别为 $0.40 \sim 117.42$ 、 $1.80 \sim 294.98$ 和 $0.86 \sim 228.62 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,壤中流的 PO_4^{3-} -P和TP流失量变幅分别为 $14.89 \sim 119.54 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $36.27 \sim 539.39 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在地表径流中,BF和SF处理 PO_4^{3-} -P和TP的总流失量均高于壤中流,而CK和CF处理 PO_4^{3-} -P和TP的总流失量均低于壤中流,但仅CF、BF和SF处理 PO_4^{3-} -P的



不同大写字母表示同一处理地表径流和壤中流差异显著,不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同处理各年份平均产沙量与产流量

Fig. 3 Average sediment yield and runoff flux in different years under different treatments



实、虚线箭头分别表示基肥和追肥时间,灰、蓝色箭头分别表示玉米季和油菜季;

不同小写字母表示不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

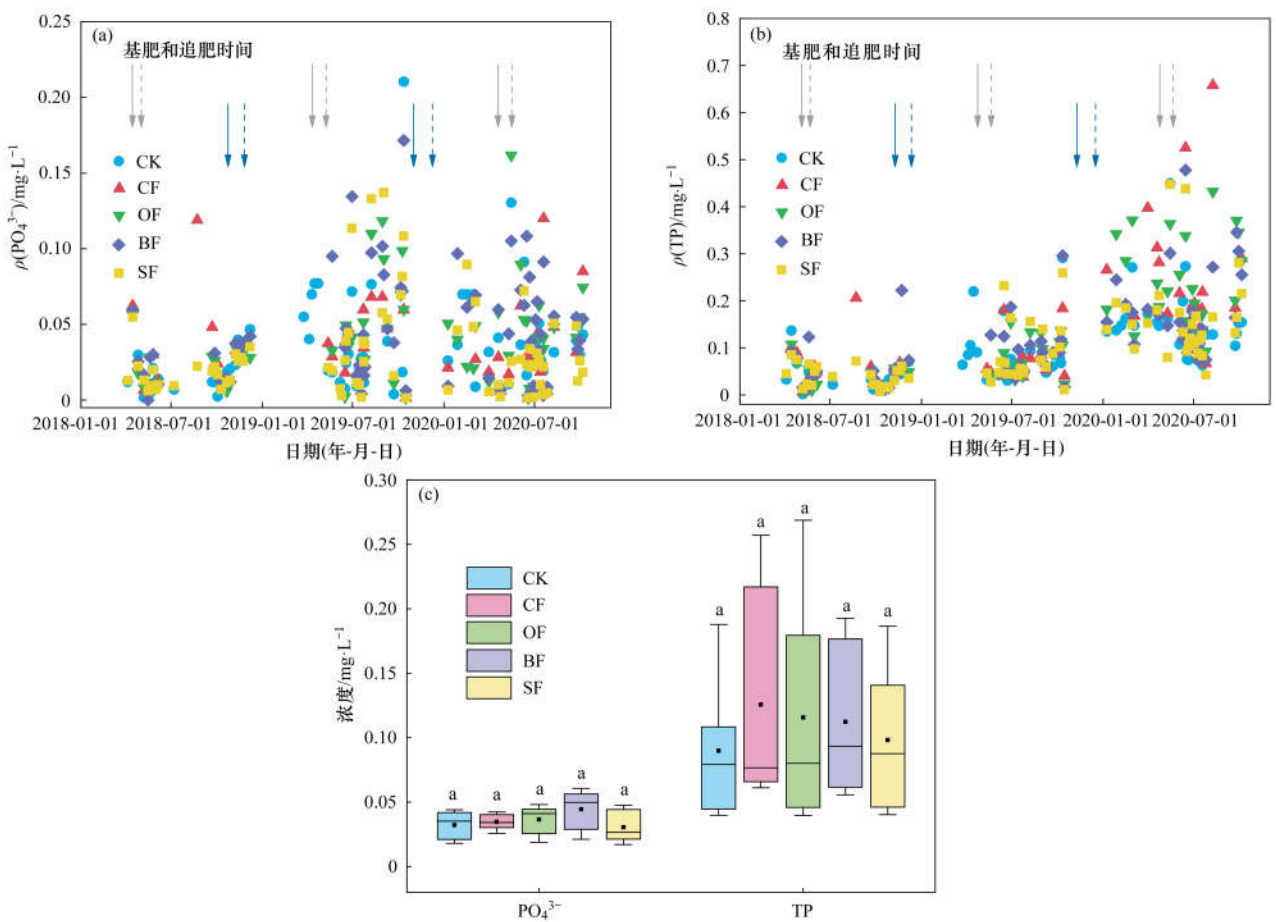
图4 2018~2020年地表径流磷浓度变化

Fig. 4 Changes in phosphorus concentration in surface flow from 2018 to 2020

总流失量在地表径流和壤中流间存在显著差异 ($P < 0.05$).

在地表径流中,CF 和 BF 处理的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,以及

CK 和 BF 处理的 TP 和 PP 表现出较高的流失趋势,其中 BF 处理 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 和 PP 总流失量最高,分别为 180.78、596.81 和 358.83 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$; SF 处理的



实、虚线箭头分别表示基肥和追肥时间,灰、蓝色箭头分别表示玉米季和油菜季;
不同小写字母表示不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

图5 2018~2020年壤中流磷浓度变化

Fig. 5 Changes in phosphorus concentration in subsurface flow from 2018 to 2020

表3 2018~2020年不同处理磷流失通量¹⁾/g·hm⁻²

Table 3 Loss fluxes of phosphorus in different treatments from 2018 to 2020/g·hm⁻²

年份	处理	地表径流			壤中流	
		PO_4^{3-} -P	TP	PP	PO_4^{3-} -P	TP
2018	CK	37.21 ± 4.0Ab	143.32 ± 59.0Ab	89.62 ± 6.5a	14.89 ± 3.6Ba	36.27 ± 4.7Aa
	CF	117.42 ± 7.4Aa	243.09 ± 32.6Aa	105.15 ± 48.3a	26.42 ± 8.9Ba	63.70 ± 9.4Ba
	OF	107.81 ± 10.9Aa	262.01 ± 37.2Aa	130.90 ± 70.2a	15.97 ± 0.1Ba	43.04 ± 10.7Ba
	BF	108.12 ± 22.4Aa	294.98 ± 32.8Aa	132.00 ± 104.3a	17.27 ± 2.5Ba	43.53 ± 17.1Ba
	SF	28.81 ± 2.8Ab	71.39 ± 14.7Ab	21.57 ± 4.0a	19.51 ± 8.7Aa	54.85 ± 7.3Aa
2019	CK	52.92 ± 17.8Aab	281.55 ± 26.1Aa	228.62 ± 16.5a	20.81 ± 4.3Ab	40.90 ± 4.4Bc
	CF	57.11 ± 12.2Aab	217.83 ± 25.5Aa	159.89 ± 19.9b	25.52 ± 10.3Ab	39.74 ± 7.1Bc
	OF	27.33 ± 5.6Ab	105.85 ± 16.6Ab	78.52 ± 13.3c	61.91 ± 18.0Aa	90.93 ± 12.3Ab
	BF	71.44 ± 12.0Aa	272.26 ± 45.5Aa	200.83 ± 20.6a	77.07 ± 16.7Aa	111.62 ± 14.1Bb
	SF	23.05 ± 2.0Bb	78.90 ± 7.5Bb	40.53 ± 6.6d	68.56 ± 6.0Aa	135.46 ± 11.6Aa
2020	CK	5.26 ± 0.8Ba	42.54 ± 6.5Ba	33.28 ± 6.5a	37.19 ± 4.4Ab	197.41 ± 18.0Ad
	CF	0.40 ± 0.2Bb	1.80 ± 0.4Bc	0.86 ± 0.1b	48.51 ± 2.2Ab	312.67 ± 21.4Ac
	OF	0.68 ± 0.2Bb	4.66 ± 0.7Bc	2.71 ± 0.2b	68.14 ± 14.8Ab	377.88 ± 23.1Ab
	BF	1.22 ± 0.2Bb	29.57 ± 1.6Bb	26.00 ± 5.5a	119.54 ± 14.3Aa	539.39 ± 26.7Aa
	SF	0.60 ± 0.2Bb	3.77 ± 0.1Bc	1.12 ± 0.1b	46.51 ± 12.1Ab	411.00 ± 25.2Ab
总量	CK	95.40 ± 14.6Ac	467.41 ± 78.5Aab	351.52 ± 16.5a	72.89 ± 3.6Ac	274.57 ± 18.2Ae
	CF	174.93 ± 5.0Aa	462.72 ± 58.5Aab	265.90 ± 68.1a	100.45 ± 17.0Bbc	416.11 ± 38.0Ad
	OF	135.82 ± 16.7Ab	372.53 ± 53.1Ab	212.13 ± 56.6a	146.02 ± 32.9Ab	511.86 ± 0.1Ac
	BF	180.78 ± 10.6Ba	596.81 ± 76.8Aa	358.83 ± 89.2a	213.88 ± 0.1Aa	694.54 ± 23.7Aa
	SF	52.47 ± 5.0Bd	154.06 ± 22.2Ac	63.23 ± 10.7b	134.59 ± 26.8Ab	601.31 ± 6.3Ab

1) 数据为平均值 ± 标准差,不同小写字母表示不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,不同大写字母表示地表径流与壤中流在 $P < 0.05$ 水平差异显著

PO_4^{3-} -P、TP 和 PP 表现出较低的流失趋势,其总流失量分别为 52.47、154.06 和 63.23 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著低于其它处理($P < 0.05$). 在壤中流中,BF 和 SF 处理 PO_4^{3-} -P和 TP 表现出较高的流失趋势,其中 BF 处理 PO_4^{3-} -P和 TP 总流失量最高,分别为 213.88 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 694.54 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其它处理($P < 0.05$); CK 处理 PO_4^{3-} -P和 TP 表现出较低的流失趋势,其总流失量分别为 72.89 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 274.57 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$.

2.4 化肥减量配施生物炭和秸秆对土壤养分和作物产量的影响

经连续 3 a 的定位试验发现,各施肥处理均能不同程度增加土壤氮磷养分库容量(表 4). 2018 ~ 2020 年,与 CF 处理相比,BF 和 SF 处理提高了 TN、AN、 NH_4^+ -N 和 AP 的含量,增幅在 0.21% ~ 247.61%之间. OF 处理土壤养分含量呈波动趋势,

如 NO_3^- -N含量随时间变化呈先下降后上升趋势. 总体来看,BF 和 SF 处理增加土壤氮磷养分库容量的优势更为明显.

各处理油菜和玉米产量如图 6 所示. 与 CK 处理相比,各施肥处理均能提高油菜和玉米产量,且显著高于 CK 处理($P < 0.05$). 各处理油菜平均产量呈 $\text{CF} > \text{OF} > \text{BF} > \text{SF} > \text{CK}$ 处理的趋势,但 CF、OF、BF 和 SF 处理平均产量分别为 2 310.33、2 213.67、1 912.33和1 784.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各施肥处理间差异不显著;各处理玉米平均产量呈 $\text{OF} > \text{CF} > \text{SF} > \text{BF} > \text{CK}$ 处理的趋势,但 OF、CF、SF 和 BF 处理平均产量分别为 6 989.67、6 342.00、6 185.33和6 033.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各施肥处理间差异不显著. 综合各年份与 3 a 平均作物产量情况来看,BF 和 SF 处理在化肥减量情况下也能保证作物产量.

表 4 2018 ~ 2020 年不同处理土壤养分含量¹⁾

Table 4 Soil nutrient content in different treatments from 2018 to 2020

年份	项目	CK	CF	OF	BF	SF
2018	$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.40 ± 0.03b	0.56 ± 0.05a	0.50 ± 0.05ab	0.57 ± 0.06a	0.60 ± 0.06a
	$\omega(\text{AN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	40.10 ± 2.33bc	43.77 ± 1.17ab	34.58 ± 3.38c	47.45 ± 4.00ab	49.29 ± 2.92a
	$\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.72 ± 0.07c	2.39 ± 0.13b	1.94 ± 0.19bc	2.4 ± 0.32b	4.51 ± 0.25a
	$\omega(\text{NO}_3^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.04 ± 0.20d	3.46 ± 0.20c	6.35 ± 0.54a	3.78 ± 0.41c	5.04 ± 0.16b
	$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.29 ± 0.02a	0.35 ± 0.01a	0.31 ± 0.02a	0.31 ± 0.03a	0.31 ± 0.02a
	$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.09 ± 0.01d	5.15 ± 0.25c	3.51 ± 0.31d	6.79 ± 0.80b	8.48 ± 0.52a
2019	$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.43 ± 0.02b	0.56 ± 0.08ab	0.48 ± 0.04ab	0.67 ± 0.08a	0.62 ± 0.06a
	$\omega(\text{AN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	37.27 ± 2.03a	30.83 ± 1.94b	24.73 ± 2.34c	35.2 ± 2.47ab	37.96 ± 2.4a
	$\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.47 ± 0.25c	1.20 ± 0.14d	3.24 ± 0.17b	4.16 ± 0.26a	4.05 ± 0.13a
	$\omega(\text{NO}_3^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.13 ± 0.20c	5.53 ± 0.39a	3.00 ± 0.11c	4.63 ± 0.28b	5.13 ± 0.17ab
	$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.56 ± 0.04b	0.70 ± 0.10ab	0.78 ± 0.04ab	0.78 ± 0.11ab	0.85 ± 0.06a
	$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.21 ± 0.17c	5.98 ± 0.62b	5.78 ± 0.57b	8.84 ± 0.27a	9.53 ± 0.91a
2020	$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.42 ± 0.05a	0.53 ± 0.05a	0.53 ± 0.04a	0.72 ± 0.05a	0.56 ± 0.08a
	$\omega(\text{AN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	46.44 ± 1.4a	55.20 ± 2.27a	49.09 ± 2.12a	58.73 ± 2.34a	62.11 ± 2.17a
	$\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.67 ± 0.31b	1.49 ± 0.13b	3.13 ± 0.25ab	4.93 ± 0.29a	4.41 ± 0.39a
	$\omega(\text{NO}_3^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.97 ± 0.38a	6.25 ± 0.55a	3.57 ± 0.31a	6.19 ± 0.27a	5.57 ± 0.31a
	$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.54 ± 0.09a	0.92 ± 0.08a	0.81 ± 0.04a	0.83 ± 0.12a	0.95 ± 0.23a
	$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.06 ± 0.15c	4.43 ± 0.16c	4.53 ± 0.23bc	5.76 ± 0.42ab	7.33 ± 0.29a

1) 数据为平均值 ± 标准差,同列不同小写字母表示不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

2.5 紫色土坡耕地磷流失主控因子分析

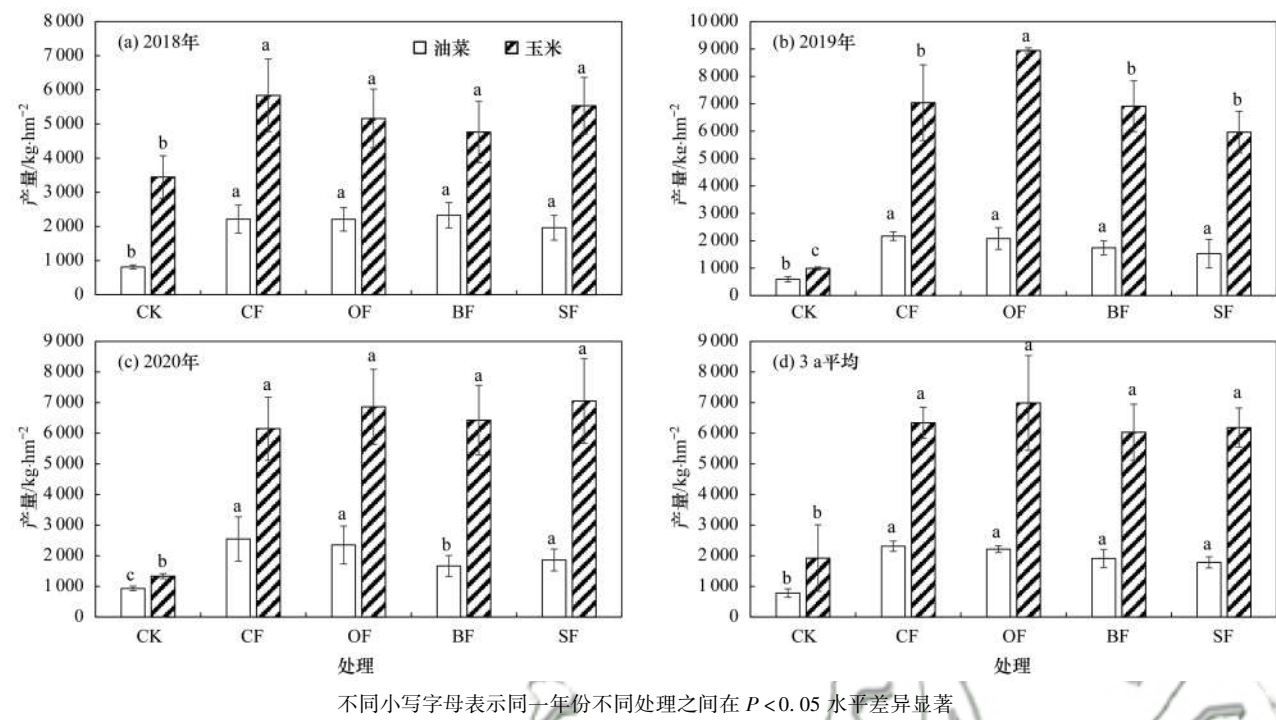
冗余分析(RDA)排序较好地描述了磷流失量与土壤养分、降雨和施肥措施等因素间的相应关系(图 7). 在地表径流中,第一轴和第二轴分别解释了 95.36%和 4.53%的地表径流磷损失[图 7(a)],地表径流量增加和生物炭的施用是造成地表径流磷损失的主要原因,土壤氮磷养分库容量增加、壤中流量增加和秸秆还田可减少地表径流中磷损失,产沙量主要对地表径流中 PP 损失呈正向影响. 在壤中流中,第一轴和第二轴分别解释了 98.58%和 1.42%的壤中流磷损失[图 7(b)],除地表径流量外,壤中流量、土壤氮磷养分库容量、磷肥投

入、生物炭投入和秸秆还田等均对壤中流磷损失呈正向影响,影响大小表现为:壤中流量 > 土壤氮磷养分库容量 > 生物炭投入 > 磷肥投入 > 秸秆还田 > 降雨量.

3 讨论

3.1 施肥方式对产沙量和径流流失通量的影响

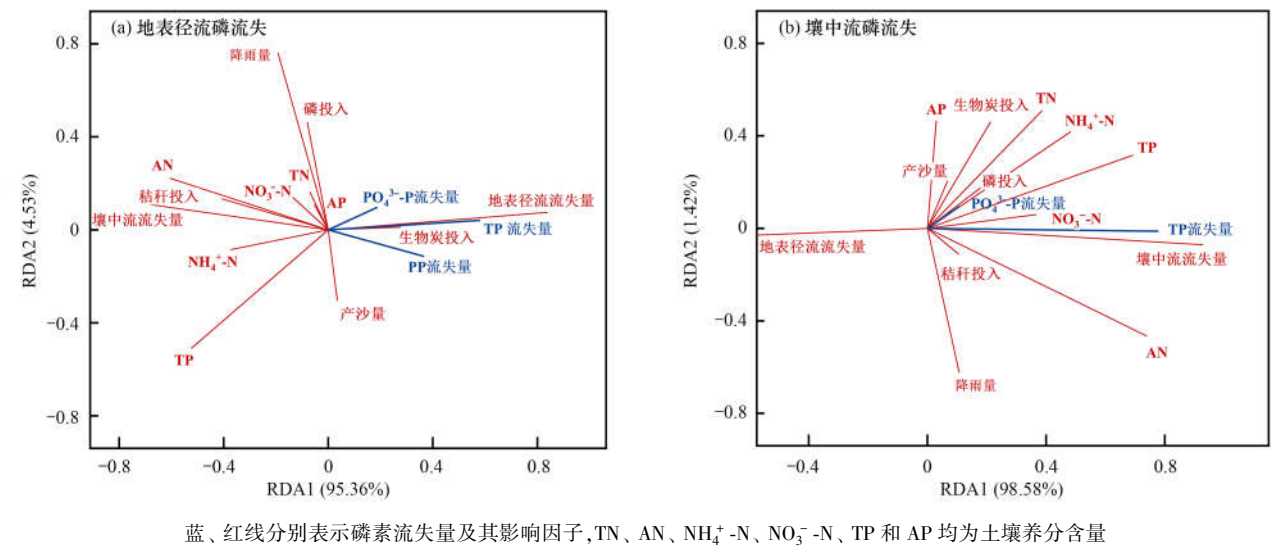
本研究结果表明,CF、OF、BF 和 SF 处理降低了产沙量和地表径流流失通量($P < 0.05$),但增加了壤中流流失通量($P < 0.05$)(图 3),即施肥可以有效减少地表径流侵蚀,但增加了壤中流流失风险. 这是因为施肥促进了作物地上部生长,同时促进了



不同小写字母表示同一年份不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

图 6 不同处理各年份作物产量

Fig. 6 Crop yield in different years under different treatments



蓝、红线分别表示磷素流失量及其影响因素, TN、AN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP 和 AP 均为土壤养分含量

图 7 磷流失与环境因素的冗余分析 ($P < 0.05$)

Fig. 7 Redundancy analysis between phosphorus loss and environmental factors ($P < 0.05$)

作物根系发育伸长,发育良好的根系增加了土壤孔隙度^[29],进而增强了壤中流侵蚀能力. BF 处理可降低地表径流流失通量,但在部分强降雨事件中仍表现出较其它施肥处理更高的地表径流产流量,这与罗东海等^[30]研究的结果相似. Obia 等^[31]研究发现,生物炭因具有孔隙度丰富和表面积大等特性,而具有较强的吸附作用,施入土壤后可提高土壤保水能力,从而减少了地表径流产流量,但生物炭保水性能是有限的,当降雨量强度超过其保水性临界值时,生物炭的保水性就大大削弱^[32],而出现地表径流量高于其它施肥处理的情况. 一般来说,地表径流流失通

量越少,土壤侵蚀越小^[33],但 BF 处理平均产沙量仅略低于 CK 处理,对减少泥沙流失效果并不明显,这可能是因为生物炭粒度细、密度低且质量轻,且较土壤颗粒具有更大的浮力,更易被侵蚀^[27,33]. SF 处理减少产沙量和地表径流流失通量效果最为显著,但其增加壤中流流失通量也尤为明显,这主要是因为秸秆具有吸水保水能力,自然降雨条件下,秸秆对雨水具有吸收作用,故地表径流量最小^[34],同时,秸秆覆盖避免了雨滴直接击打地面,减弱了降雨对坡耕地的冲刷作用^[35],减少了泥沙流失;另一方面,秸秆覆盖对降雨具有拦截作用,增加了雨水滞留在

坡耕地表层的时间,加大了土壤入渗量,因而壤中流流失通量也随之增加^[36,37],持续降雨条件下,土壤孔隙逐渐饱和,秸秆覆盖对减少地表径流的效果才逐渐减弱^[21].

在本研究中,降雨量和地表径流为非线性关系[图 2(e)],其中 CK 处理地表径流流失通量随降雨量增加而增加,其它施肥处理随降雨量增加呈先上升后下降或趋于平稳趋势. 李飞等^[34]研究指出,降雨强度对地表径流曲线影响较大,当降雨强度增大时,地表径流曲线由缓慢增长向快速增长转变,此外,地表径流量和入渗量相互作用,呈此消彼长的关系(即当水分入渗能力强时,地表径流量小,反之,地表径流量则增加),降雨初期,当土壤湿度较低呈非饱和状态时,水分以土壤入渗方式为主^[3,16],同时,施肥处理作物根系伸长生长发育良好的情况下,增加了土壤孔隙度^[29],为优先流的形成创造了条件,进一步增强了水分入渗能力^[38],而研究区降雨强度较低^[28],土壤孔隙无法达到饱和状态,因此,本研究中地表径流量并未随降雨量增加而增加. 这也解释了不同处理壤中流流失通量均呈上升趋势

[图 2(f)],且壤中流流失通量始终占径流流失总量的主体部分. 然而,本研究暂未从降雨强度和历时方面进行深入探讨,因此,后续可结合从此方面对紫色土坡耕地磷流失开展进一步研究.

3.2 施肥方式对磷流失通量的影响

有研究表明施入土壤中的磷肥容易被表层土壤固定,不易向下层土壤渗透^[39],而在本研究的一些产流事件中,壤中流磷流失通量显著高于地表径流磷流失通量($P < 0.05$),这与壤中流流失通量有关图 8(b),RDA 结果表明壤中流流失通量对壤中流磷流失正向影响最大也再次证实了这一点[图 7(b)]. 壤中流流失通量还受降雨强度影响,这是因为降雨强度低时,地表径流处于低流速状态,水分入渗能力强,壤中流流失通量大幅增加^[3,16],进而壤中流磷流失通量增加. 一般认为,地表径流磷流失以 PP 为主要流失形态^[30],这与本研究结果相符(除 SF 处理),地表径流中 PP 与 TP 的显著正相关也说明了这一点[图 9(a)]. 然而,PP 主要吸附于泥沙,进而随水流失. 因此,控制坡耕地磷流失首先应控制水土流失^[40].

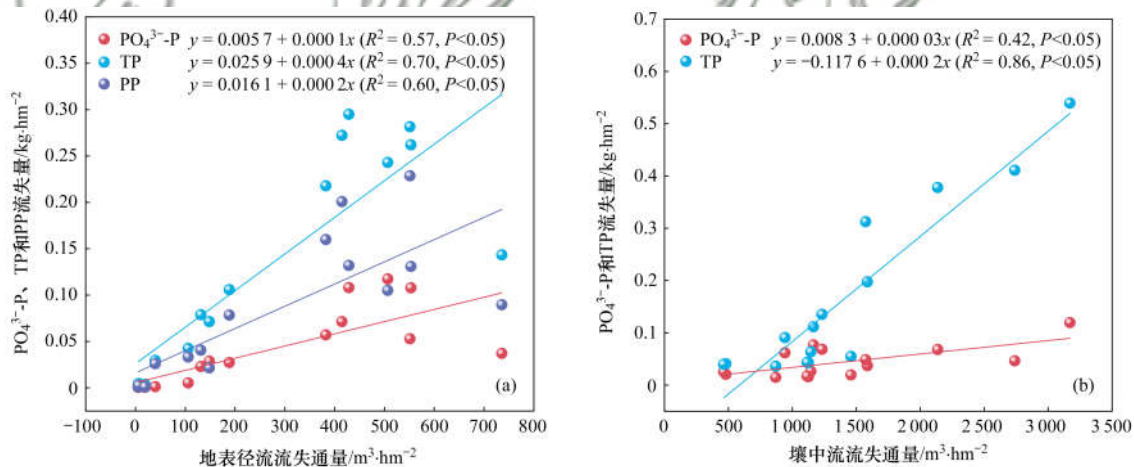


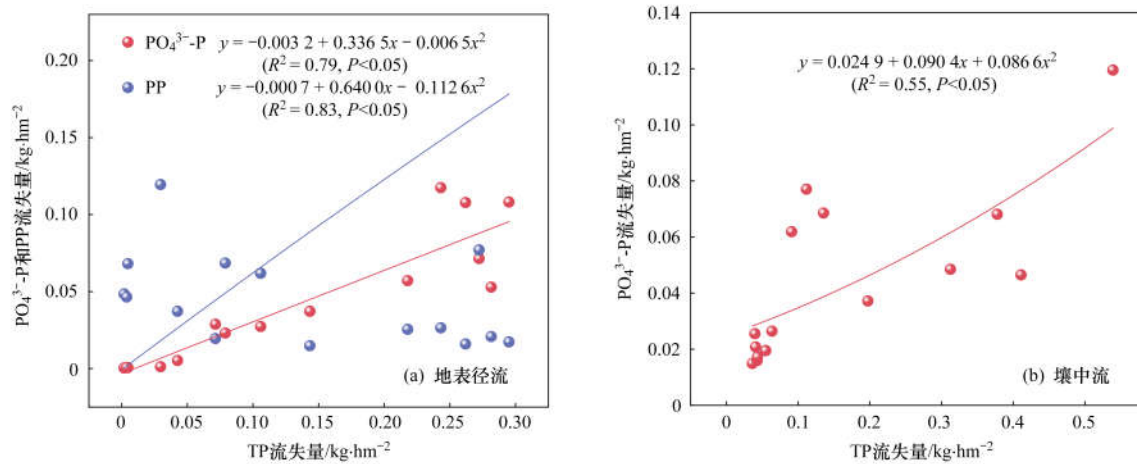
图 8 磷流失与径流通量的关系

Fig. 8 Relationship between phosphorus loss and runoff flux

CF 和 OF 处理地表径流和壤中流中磷流失通量均高于 CK 处理,这是施肥带来的磷投入,增加了磷流失浓度,故尽管 CF 和 OF 处理地表径流流失通量小于 CK 处理,但仍表现出了更高的磷流失量. 在本研究中,每年玉米季施肥后,地表径流中 PO₄³⁻⁻-P、TP 和 PP 浓度均有大幅变化,而壤中流中并未出现此种现象,可见,施肥措施对地表径流中磷浓度的影响远大于壤中流^[30].

BF 处理地表径流磷流失变化呈不稳定状态,这可能与生物炭自身特性有关. 生物炭由于其自身多孔结构、巨大比表面积和表面富含多种官能团等特性^[41,42],具有离子吸附交换能力且存在一定吸附容

量,其可以通过分子间引力对土壤中多余的 PO₄³⁻⁻-P 产生交换吸附,甚至是不可逆的吸附作用,进而减少磷流失量. 同时,生物炭自身含有大量磷而不能完全被植物吸收利用(BF 处理土壤 TP 和 AP 含量均较高很好地佐证了这一点,表 4)^[42],加之其也存在粒度细、密度低、质量轻和强浮性等特性^[33],更容易受到侵蚀,在自然降雨条件下,未被吸收的一部分磷通过解析作用以可溶性磷形态流失^[43],另一部分则随地表径流和泥沙以 PP 形态流失. 因此,生物炭这种两面性(一方面可通过吸附作用减少磷流失,另一方面则是磷含量高、易受侵蚀)使得其在控制地表径流磷流失效果不稳定. 此外,生物炭和无机肥料

图9 PO₄³⁻-P和PP与TP的关系Fig. 9 Relationship between PO₄³⁻-P, PP, and TP

配比对磷流失有一定影响,过高的生物炭配比可促进土壤中闭蓄态磷向有效磷的转化^[44],从而增加磷流失风险.因此,在后续研究中可进一步探讨不同特性生物炭以及生物炭投放比例对坡耕地磷流失的影响.

与CK、CF、OF和BF处理相比,SF处理对控制地表径流磷流失表现出更大的优势.一方面,秸秆还田可以改善土壤结构,增加土壤养分含量^[22](表4),提高水土保持性能,良好的土壤环境促进了作物对磷的吸收利用^[45],从而降低地表径流磷流失风险,这与RDA分析表明土壤养分对地表径流磷流失呈负向影响的结果相符[图7(a)];另一方面,秸秆覆盖可以有效吸收降雨冲击力,削减了地表径流的流速和流量,从而减少了磷流失^[34,35].SF处理壤中流磷流失通量高于CK、CF和OF处理,这与李同杰等^[46]研究发现秸秆还田可以减少磷素向下层迁移的结果不符,其试验土壤为棕壤,而本试验土壤为新垦紫色土,存在土壤孔隙度大、质地疏松、渗透力强等问题,是易受侵蚀的“岩土二元结构体”^[30],因而磷流失风险更高;其次,从本研究结果来看,SF处理壤中流磷流失通量较高主要还是因为秸秆覆盖增加了雨水滞留在坡耕地表层的时间,加大了雨水入渗量[图8(b)],促进了磷向下运移,从而增加了壤中流磷流失^[36,37].此外,磷在土壤中的迁移还受土壤^[47]、地形^[48]、植被^[49]和秸秆种类^[50]等因素的影响,具体的差异还需进一步研究.因此,后续研究可基于现有试验,着眼于不同土壤类型、不同坡度、不同植被和不同种类秸秆等因素对坡耕地磷流失的影响.

4 结论

(1)在紫色土坡耕地中,壤中流是径流流失的

主要方式,其发生频率和流失通量均高于地表径流,且化肥减量配施生物炭和秸秆增加了壤中流流失通量.

(2)不同施肥处理对地表径流和壤中流磷流失的影响不一致.化肥减量配施生物炭增加了地表径流和壤中流的磷流失通量;化肥减量配施秸秆增加了壤中流磷流失通量、减少了地表径流的磷流失通量.优化施肥、化肥减量配施生物炭和秸秆这3种处理磷损失均以壤中流流失途径为主.

(3)化肥减量配施秸秆对减少三峡库区紫色土坡耕地产沙量、地表径流产流量和磷流失量最为有效,但其可增加壤中流流失风险这一现象不可忽视.

参考文献:

- [1] Du Y N, Li T Y, He B H. Runoff-related nutrient loss affected by fertilization and cultivation in sloping croplands: an 11-year observation under natural rainfall[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **319**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107549.
- [2] FAO. FAO FAOSTAT[EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>, 2022-10-28.
- [3] Yao Y W, Dai Q H, Gao R X, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and nutrient loss of gently sloping farmland in a karst area of SW China[J]. *PLoS One*, 2021, **16**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0246505.
- [4] Zhu Q C, de Vries W, Liu X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980-2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 1497-1505.
- [5] 靳玉婷,刘运峰,胡宏祥,等.持续性秸秆还田配施化肥对油菜-水稻轮作周年氮磷径流损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, **54**(9): 1937-1951.
Jin Y T, Liu Y F, Hu H X, et al. Effects of continuous straw returning with chemical fertilizer on annual runoff loss of nitrogen and phosphorus in rice-rape rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(9): 1937-1951.
- [6] Shen Z Y, Chen L, Hong Q, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **454-455**: 383-392.

- [7] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- Cao R X, Liu J, Deng K K, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- [8] Cheng J H, Tang X Y, Cui J F. Effect of long-term manure slurry application on the occurrence of antibiotic resistance genes in arable purple soil (entisol) [J]. Science of the Total Environment, 2019, **647**: 853-861.
- [9] 吴小雨, 李天阳, 何丙辉. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2810-2816.
- Wu X Y, Li T Y, He B H. Characteristics of runoff-related total nitrogen and phosphorus losses under long-term fertilization and cultivation on purple soil sloping croplands [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2810-2816.
- [10] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, *et al.* Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of northern China [J]. Plant and Soil, 2013, **369**(1-2): 585-598.
- [11] 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 等. 降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3597-3607.
- Zhou H, Chen F X, Luo Y F, *et al.* Influence of optimal land use allocation on phosphorus loss in the process of rainfall and runoff [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3597-3607.
- [12] Zhong S Q, Han Z, Li J W, *et al.* Mechanized and optimized configuration pattern of crop-mulberry systems for controlling agricultural non-point source pollution on sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(10), doi: 10.3390/ijerph17103599.
- [13] Wu L, Peng M L, Qiao S S, *et al.* Assessing impacts of rainfall intensity and slope on dissolved and adsorbed nitrogen loss under bare loessial soil by simulated rainfalls [J]. CATENA, 2018, **170**: 51-63.
- [14] Hu Z F, Gao M, Xie D T, *et al.* Phosphorus loss from dry sloping lands of Three Gorges Reservoir area, China [J]. Pedosphere, 2013, **23**(3): 385-394.
- [15] Zhang Y, Xie D T, Ni J P, *et al.* Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area; no-till is better than mulch-till [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107003.
- [16] Gao R X, Dai Q H, Gan Y X, *et al.* The production processes and characteristics of nitrogen pollution in bare sloping farmland in a karst region [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(26): 26900-26911.
- [17] Bechmann M. Long-term monitoring of nitrogen in surface and subsurface runoff from small agricultural dominated catchments in Norway [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **198**: 13-24.
- [18] Oliveira F R, Patel A K, Jaisi D P, *et al.* Environmental application of biochar: current status and perspectives [J]. Bioresource Technology, 2017, **246**: 110-122.
- [19] Li Y, Yang Y Q, Shen F, *et al.* Partitioning biochar properties to elucidate their contributions to bacterial and fungal community composition of purple soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, **648**: 1333-1341.
- [20] 王萌萌, 周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 768-780.
- Wang M M, Zhou Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(5): 768-780.
- [21] Park S I, Yang H I, Park H J, *et al.* Rice straw cover decreases soil erosion and sediment-bound C, N, and P losses but increases dissolved organic C export from upland maize fields as evidenced by $\delta^{13}\text{C}$ [J]. Science of the Total Environment, 2021, **753**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142053.
- [22] Wang X H, Yang H S, Liu J, *et al.* Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system [J]. CATENA, 2015, **127**: 56-63.
- [23] Turmel M S, Speratti A, Baudron F, *et al.* Crop residue management and soil health: a systems analysis [J]. Agricultural Systems, 2015, **134**: 6-16.
- [24] Yang H S, Zhai S L, Li Y F, *et al.* Waterlogging reduction and wheat yield increase through long-term ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system [J]. Field Crops Research, 2017, **209**: 189-197.
- [25] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] Peng X, Zhu Q H, Xie Z B, *et al.* The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol [J]. CATENA, 2016, **138**: 30-37.
- [28] Huang R, Gao X S, Wang F H, *et al.* Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106988.
- [29] Franqueville D, Benhamou C, Pasquier C, *et al.* Modelling reactive nitrogen fluxes and mitigation scenarios on a landscape in Central France [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **264**: 99-110.
- [30] 罗东海, 王子芳, 龙翼, 等. 化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 [J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1286-1295.
- Luo D H, Wang Z F, Long Y, *et al.* Effect of optimized fertilization and biochar application on phosphorus loss in purple soil sloping farmland [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1286-1295.
- [31] Obia A, Mulder J, Martinsen V, *et al.* In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils [J]. Soil and Tillage Research, 2016, **155**: 35-44.
- [32] 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.
- [33] Lee C H, Wang C C, Lin H H, *et al.* In-situ biochar application conserves nutrients while simultaneously mitigating runoff and erosion of an Fe-oxide-enriched tropical soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 665-671.
- [34] 李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控 [J]. 水土保持学报, 2020, **34**(4): 37-42.

- Li F, Han X, Ma X L, *et al.* Straw mulch controls runoff and nitrogen and phosphorus loss from slope farmland in black soil region of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(4): 37-42.
- [35] Zhou H, Peng X H, Darboux F. Effect of rainfall kinetic energy on crust formation and interrill erosion of an Ultisol in subtropical China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, **12**(4): 1-9.
- [36] Cerdà A, González-Pelayo ó, Giménez-Morera A, *et al.* Use of barley straw residues to avoid high erosion and runoff rates on persimmon plantations in Eastern Spain under low frequency-high magnitude simulated rainfall events [J]. *Soil Research*, 2016, **54**(2): 154-165.
- [37] Prosdociimi M, Tarolli P, Cerdà A. Mulching practices for reducing soil water erosion: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, **161**: 191-203.
- [38] Hlaváčiková H, Novák V, Holko L. On the role of rock fragments and initial soil water content in the potential subsurface runoff formation[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2015, **63**(1): 71-81.
- [39] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- Chen L, Liu D F, Song L X, *et al.* Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellowbrown under different rainfall intensities [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [40] Li X F, Song Y J, Xie S H, *et al.* Research progress on dynamic monitoring technology of soil erosion in sloping farmland[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **560**, doi: 10.1088/1755-1315/560/1/012082.
- [41] Mohanty P, Nanda S, Pant K K, *et al.* Evaluation of the physicochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: effects of heating rate [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, **104**: 485-493.
- [42] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review [J]. *Chemosphere*, 2014, **99**: 19-33.
- [43] Sharpley A N, Smith S J, Naney J W. Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1987, **35**(5): 812-817.
- [44] Steiner C, Glaser B, Gerdal Teixeira W, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(6): 893-899.
- [45] Li Z C, Song Z L, Singh B P, *et al.* The impact of crop residue biochars on silicon and nutrient cycles in croplands[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 673-680.
- [46] 李同杰, 刘晶晶, 刘春生, 等. 磷在棕壤中淋溶迁移特征研究[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(4): 35-39.
- Li T J, Liu J J, Liu C S, *et al.* Study about movement of phosphate in brown soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(4): 35-39.
- [47] Liu R M, Wang J W, Shi J H, *et al.* Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 1069-1077.
- [48] Xing W M, Yang P L, Ren S M, *et al.* Slope length effects on processes of total nitrogen loss under simulated rainfall [J]. *CATENA*, 2016, **139**: 73-81.
- [49] Liu Y F, Dunkerley D, López-Vicente M, *et al.* Trade-off between surface runoff and soil erosion during the implementation of ecological restoration programs in semiarid regions: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136477.
- [50] Shin M H, Won C H, Jang J R, *et al.* Effect of surface cover on the reduction of runoff and agricultural NPS pollution from upland fields[J]. *Paddy and Water Environment*, 2013, **11**(1-4): 493-501.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)