

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.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星, 性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥配施秸秆的响应

熊子怡¹, 王子芳¹, 龙翼², 严冬春², 徐国鑫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: 紫色土旱坡地被认为是三峡库区泥沙和面源污染的主要来源地, 加强对紫色土旱坡地壤中流和地表径流中氮流失特征的研究, 对防控三峡库区的面源污染有重要的现实意义. 依托中科院成都山地所忠县石宝寨试验站的紫色土旱坡地定位径流小区, 设置不施肥(CK)、常规施肥(T_1)、优化施肥(T_2)和减肥配施秸秆(T_3)这4种不同的处理, 通过监测在油菜-玉米轮作制度下紫色土旱坡地壤中流和地表径流的流失通量、各次径流不同氮形态的流失浓度和流失通量, 研究紫色土旱坡地氮流失通量对减肥配施秸秆的响应. 结果表明, 壤中流径流量占总径流量的比例达到60.14%~88.56%, 壤中流氮流失通量占全氮流失通量的72.88%~92.35%. 铵态氮主要通过地表径流的方式流失, 硝态氮主要通过壤中流的方式流失且是氮流失的主要形态. 不同处理的铵态氮和硝态氮流失通量均呈现出 $T_1 > T_2 > T_3 > CK$, T_3 处理的氮流失通量为 $20.07 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 较 T_1 和 T_2 分别下降了43.59%和39.55%. 减肥配施秸秆显著降低了紫色土旱坡地铵态氮、硝态氮和全氮的流失通量, 对紫色土旱坡地雨季径流中氮流失有显著的消减效应.

关键词: 紫色土旱坡地; 面源污染; 地表径流; 壤中流; 秸秆

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1930-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910002

Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw

XIONG Zi-yi¹, WANG Zi-fang¹, LONG Yi², YAN Dong-chun², XU Guo-xin¹, 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: The purple soil sloping field is considered as the main source of sediment and non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area. To prevent and control the non-point source pollution, it is indispensable to explore the characteristics of nitrogen loss in the overland flow and interflow of purple soil sloping field in Three Gorges Reservoir area. The purple soil sloping runoff plots, located in the Shibaozhai Experimental Station of Chengdu Institute of Chinese Academy of Sciences in Zhongxian County, Chongqing, were studied. The experiment included no fertilization treatment (CK), traditional fertilization treatment (T_1), amended fertilization treatment (T_2), and reduced fertilizer with straw treatment (T_3). According to the data of volume of the interflow and runoff and the leach concentration and flux of nitrogen forms under rapeseed-maize rotation system, the response of nitrogen leaching flux to reduce fertilizer with straw application can be definite in purple soil sloping plots. The results show that the ratio of interflow to total runoff is 60.14%-88.56%, and the flux of nitrogen leaching in the interflow accounts for 72.88%-92.35% of total nitrogen loss flux. Ammonium was mainly leached by the overland flow. In addition, nitrate was mainly leached by the interflow and was the main form of nitrogen leaching. The fluxes of ammonium and nitrate under different treatments followed the order $T_1 > T_2 > T_3 > CK$. The total nitrogen flux of T_3 was $20.07 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, which was 43.59% and 39.55% lower than that of T_1 and T_2 , respectively. The reduced fertilizer with straw application significantly decreased the leaching flux of ammonium, nitrate, and total nitrogen, and weakened the effect on runoff nitrogen leaching in the purple soil sloping plots.

Key words: purple soil sloping field; non-point source pollution; overland flow; interflow; straw

化肥是农业可持续发展的物质保证和粮食增产的基础,为了维持农业高产稳产,我国的化肥年施用量巨大且在逐年增加,而肥料利用率却不容乐观^[1]. 过量施用化肥造成巨大的经济损失,同时增加地下水污染风险和面源污染风险^[2-5]. 三峡库区是长江上游面源污染较严重的地区之一,依据中国环境监测总站的统计资料,2016年三峡库区的化肥流失量为1.06万t,占所施化肥量的8.87%^[6]. 三峡库区的开发历史悠久,坡地开垦严重,紫色土旱坡地占耕地总面积的一半以上. 紫色土旱坡地具有土层薄,易风化,质地疏松、孔隙度大以及团聚结构少的特点,易被侵蚀,被认为是三峡库区泥沙和面源污

染的主要来源地^[7],给三峡工程和长江中下游的生态安全造成了极大威胁. 因此,加强紫色土旱坡地氮流失特征的研究,对防控三峡库区的面源污染有重要的现实意义.

秸秆是一种重要的农业资源,直接还田是目前秸秆利用的主要途径,秸秆还田不但能减轻因焚烧产生的大气污染,也是提高土壤肥力的重要措

收稿日期: 2019-10-02; 修订日期: 2019-10-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101); 重庆市技术创新与应用专项(cstc2018jszx-zdyfmxX0014)

作者简介: 熊子怡(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 550828749@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

施^[8,9]. 秸秆还田能够为土壤提供大量的有机碳以及氮、磷和钾等营养元素^[10], 不仅能改良土壤理化性质, 并且能够有效降低旱坡地的地表径流量^[11], 减小养分流失风险^[12,13]. 秸秆覆盖还田能够显著减少地表水土流失, 如果将秸秆进行 20~30cm 的深埋还田处理, 还可以降低氮素的淋溶量. 徐泰平等^[14]通过研究秸秆还田对川中丘陵区暴雨情况下耕地的氮磷流失的影响发现秸秆还田能够显著地降低地表径流量达 26%~31%, 氮磷流失总量减少达 60%~76%. 郭智等^[15]的研究发现, 相比常规施肥处理, 秸秆还田能显著减少全氮流失量达到 15.95%.

目前, 许多学者已经对秸秆还田减少土壤养分流失的效果进行了大量研究, 但研究对象主要集中在农田水稻土^[16], 且以地表径流研究为主^[17], 而对紫色土旱坡地壤中流氮流失特征的研究较少. 因此, 本研究通过标准人工径流小区, 连续监测油菜-玉米轮作制度下紫色土地表径流、壤中流的产流产沙特征、各次径流不同氮素形态的浓度变化特征, 并结合不同施肥处理[不施肥(CK)、常规施肥(T_1)、优化

施肥(T_2)和减肥配施秸秆(T_3)]下的紫色土旱坡地氮流失通量规律, 探讨紫色土旱坡地氮流失对减肥配施秸秆措施的响应特征, 以期减少三峡库区紫色土旱坡地氮流失提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤选自中国科学院三峡库区水土保持与环境研究试验站, 试验站的地理位置见图 1. 试验站位于重庆市忠县石宝镇新政村 ($E108^{\circ}10'$, $N30^{\circ}22'$), 距离忠县县城约 32 km, 地处忠县、万州、石柱三县(区)的交界处, 是三峡库区的腹地地带. 试验小区年均温度 $19.2^{\circ}C$, 雨量充沛, 年均降雨量为 1 150 mm, 无霜期 320 d 左右, 日照充足. 试验小区位于长江主河道北岸, 坡度在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间, 土壤为沙溪庙组砂岩、粉砂岩和泥岩快速风化形成的中性紫色土, 在三峡库区具有很强的代表性. 试验中所用玉米秸秆购自试验地周围农户, 玉米秸秆的全氮含量为 $8.23 g\cdot kg^{-1}$, 全磷含量为 $3.15 g\cdot kg^{-1}$. 供试土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

项目	pH	有机质 / $g\cdot kg^{-1}$	全氮 / $g\cdot kg^{-1}$	全磷 / $g\cdot kg^{-1}$	全钾 / $g\cdot kg^{-1}$	碱解氮 / $mg\cdot kg^{-1}$	有效磷 / $mg\cdot kg^{-1}$	速效钾 / $mg\cdot kg^{-1}$
参数值	8.3	7.56	0.35	0.30	32.31	25.71	9.16	100.00

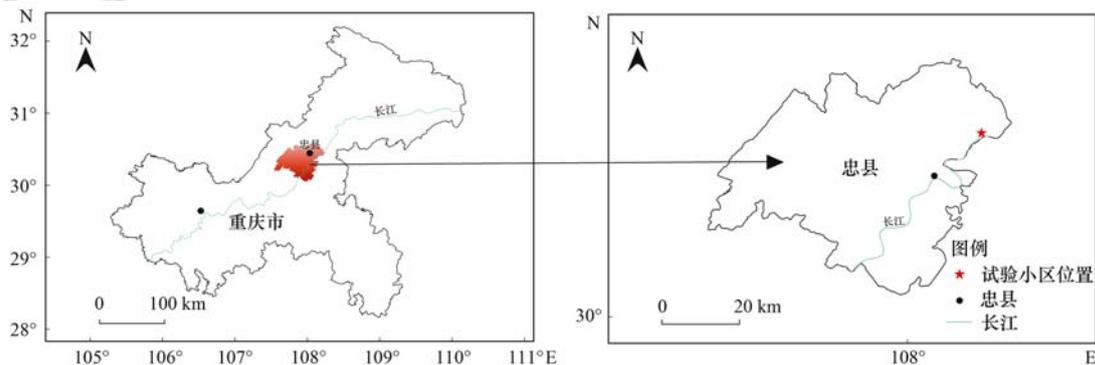


图 1 试验站地理位置示意

Fig. 1 Location of experimental station

1.2 试验设计与样品采集

径流试验小区为长方形, 各小区投影面积均为 $100 m^2$ ($20 m \times 5 m$), 底面以及四周均为混凝土修筑, 壤中流和地表径流出水口设置汇流沟, 各小区外安装壤中流和地表径流的集水桶, 为防止夏季产流量过大, 在集水桶旁设计添加分流桶, 具体装置见图 2. 试验在 15° 坡度下设置 4 个施肥处理, 3 个重复: ①不施肥(CK)、②常规施肥(T_1)、③优化施肥(T_2)和④减肥配施秸秆(T_3). 同种处理的施肥量相同,

具体施肥量见表 2, 各小区的农作管理均相同.

本试验种植模式采用“油-玉两熟”制, 油菜和玉米的肥料用量依照当地种植的施肥量进行减量施用, 各季作物栽培方式和田间管理措施均按照当地传统. 4 个施肥处理种植的作物相同, 油菜于 2017 年 10 月 23 日移栽, 2018 年 4 月 29 日收获, 玉米于 2018 年 4 月 13 日移栽至油菜的行间, 2018 年 7 月 20 日收获. 油菜季氮肥分基肥和基肥两次施用(基肥占 80%), 磷肥、钾肥、硼肥做基肥一次性施入, 基

表 2 各处理的施肥量

Table 2 Amount of fertilizer applied for each treatment

项目	处理	N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²	硼砂 /kg·hm ⁻²	秸秆 /kg·hm ⁻²
油菜季	不施肥(CK)	—	—	—	—	—
	常规施肥(T ₁)	150	90	90	15	—
	优化施肥(T ₂)	120	75	75	15	—
	减肥配施秸秆(T ₃)	102	63.75	63.75	15	4 500
玉米季	不施肥(CK)	—	—	—	—	—
	常规施肥(T ₁)	300	150	135	—	—
	优化施肥(T ₂)	270	120	105	—	—
	减肥配施秸秆(T ₃)	229.5	102	89.25	—	4 500

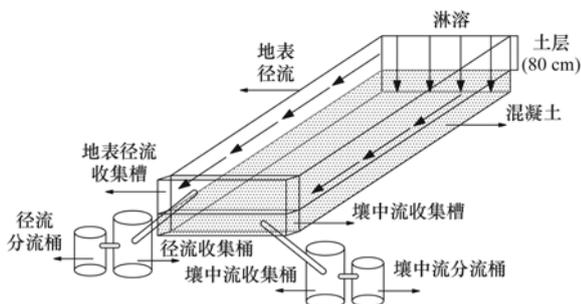


图 2 径流小区设计示意

Fig. 2 Schematic diagram of runoff plot design

肥和基肥施用时间分别为2017年11月7日和2017年12月5日,于小雨前后撒施。玉米季肥料分两次施入,第一次为玉米移栽时,各处理施入2.5 kg尿素,其余肥料于4月27日一次性施入。

本试验观测期为2017年10月23日至2018年10月22日,在观测期内,逢降雨产流就进行采样。采样时,先测定各径流小区径流桶中地表径流和壤中流的水位,以计算各小区的地表径流和壤中流的径流量,然后用塑料瓶采集地表径流和壤中流,地表径流采集混合水样两瓶,分别用于测定养分浓度和泥沙含量,壤中流水样充分混匀后,待水体静置至悬浮物沉淀后采样。收集池和分流池的样品分别测定养分浓度,然后计算整体的平均养分浓度。水样采集后,立即测定不同形态氮养分的浓度,或在样品中加硫酸至pH小于2,并存放在低于4℃的冰箱中冷冻,待测。采用梅花形多点取样法取表层(0~20 cm)土壤,四分法混合土样后保留1.0 kg带回实验室,将土样在室温下风干,研磨后过筛,用于测定土壤氮含量和基本理化性质。本试验过程共采集土样3次,第一次是试验处理前采集基础土样,第二次是油菜收获后采样,第三次是玉米收获后采样。降雨量数据从试验站人工气象降雨观测平台获取,观测仪器为虹吸式雨量计。

1.3 分析和测定方法

水样测定指标包括硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、溶解性总氮(DTN)和总氮(TN)。TN用

摇匀后的水样直接测定,NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和DTN用过0.45 μm滤膜的水样测定。溶解性总氮(DTN)和总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)用纳氏试剂比色法测定,硝态氮(NO₃⁻-N)用紫外分光光度法测定。颗粒态氮(PN)=总氮(TN)-溶解性总氮(DTN)。

土样和泥沙样测定指标中,总氮(TN)用H₂SO₄消煮-凯氏定氮法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)用KCl提取-靛酚蓝比色法测定,硝态氮(NO₃⁻-N)用KCl提取-紫外分光光度法测定,土壤pH采用pH计测定(水:土为5:1)。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2007和SPSS 23.0软件进行数据处理和图表绘制。所有结果均用3次测定结果的平均值表示。不同处理之间的多重比较采用LSD最小显著差数法(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 自然降雨条件下紫色土旱坡地产流、产沙特征

本试验观测的年降雨量为1 105.2 mm,属于平水年。由图3可知,在观测期内产生径流的降雨共计18次,累积降雨量为726.1 mm,降雨主要集中在4、5和9月,降雨量峰值出现在4月26日,达到140 mm。曹瑞霞等^[18]的研究表明当次降雨量不低于24 mm时,才会出现明显地径流现象,这与本文的观测结果一致。不施肥(CK)、常规施肥(T₁)、优化施肥(T₂)和减肥配施秸秆(T₃)处理的紫色土旱坡地分别产生了14、12、12、15次壤中流和12、11、10、9次地表径流,壤中流径流量占总径流量的60.14%~88.56%,是雨季径流的主要输出方式。在同一施肥方式下,随着降雨量的增大,壤中流和地表径流的总量也增加。不同处理的壤中流径流量大小呈现:减肥配施秸秆(T₃)>常规施肥(T₁)>优化施肥(T₂)>不施肥(CK),不施肥(CK)处理的壤中流径流量最小,T₃、T₁和T₂分别是CK的

1.55、1.51 和 1.22 倍。地表径流量大小呈现: 不施肥(CK) > 优化施肥(T_2) > 常规施肥(T_1) > 减肥配施秸秆(T_3), 施肥处理(T_2 、 T_1 和 T_3) 的地表径流量较 CK 分别减少了 31.48%、25.17% 和 80.21%, 施肥能明显减少地表径流量, 其中减肥配

施秸秆(T_3) 的效果最好。

从表 3 可以看出, 各施肥处理(T_2 、 T_1 和 T_3) 的侵蚀产沙量均显著低于 CK ($P < 0.05$), 减肥配施秸秆(T_3) 的紫色土旱坡地产沙量最少, 较 CK 降低了 94.86%。

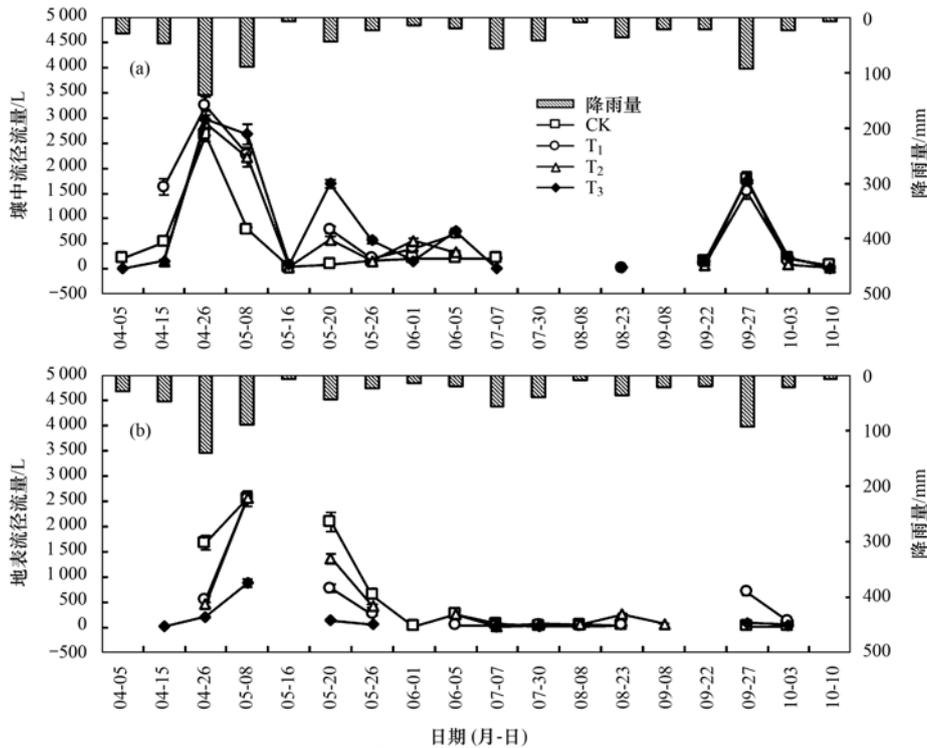


图 3 自然降雨条件下紫色土旱坡地壤中流径流量和地表径流量

Fig. 3 Interflow and surface runoff of purple soil sloping field under natural simulated rainfall

表 3 自然降雨条件下紫色土旱坡地的产沙量¹⁾/kg

Table 3 Sediment yield of purple soil on sloping land under natural simulated rainfall/kg

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		
CK	8.66 ± 1.21a	34.34 ± 6.21a	84.03 ± 9.95a	8.77 ± 1.06b	3.01 ± 0.35a	0.02 ± 0.00c	0.06 ± 0.00b	0.02 ± 0.01b	0.09 ± 0.00b	139.00 ± 18.80a	
T_1	1.23 ± 0.28b	8.31 ± 1.15b	5.87 ± 0.81b	0.49 ± 0.10c	0.18 ± 0.06b	0.05 ± 0.01b	0.04 ± 0.00b	0.13 ± 0.01b	0.20 ± 0.01a	16.50 ± 2.43bc	
T_2	1.66 ± 0.22b	7.40 ± 0.96b	2.97 ± 0.31b	10.48 ± 1.32a	1.21 ± 0.13b	0.24 ± 0.02a	1.40 ± 0.13a	2.04 ± 0.36a	0.00 ± 0.00d	27.40 ± 3.45b	
T_3	0.81 ± 0.13b	5.20 ± 0.76b	0.91 ± 0.19b	0.15 ± 0.02c	0.00 ± 0.00b	0.03 ± 0.00bc	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.05 ± 0.02c	7.15 ± 1.12c	

1) 表中所示数据是平均值 ± 标准差, 同列不同字母表示各处理差异显著 ($P < 0.05$)

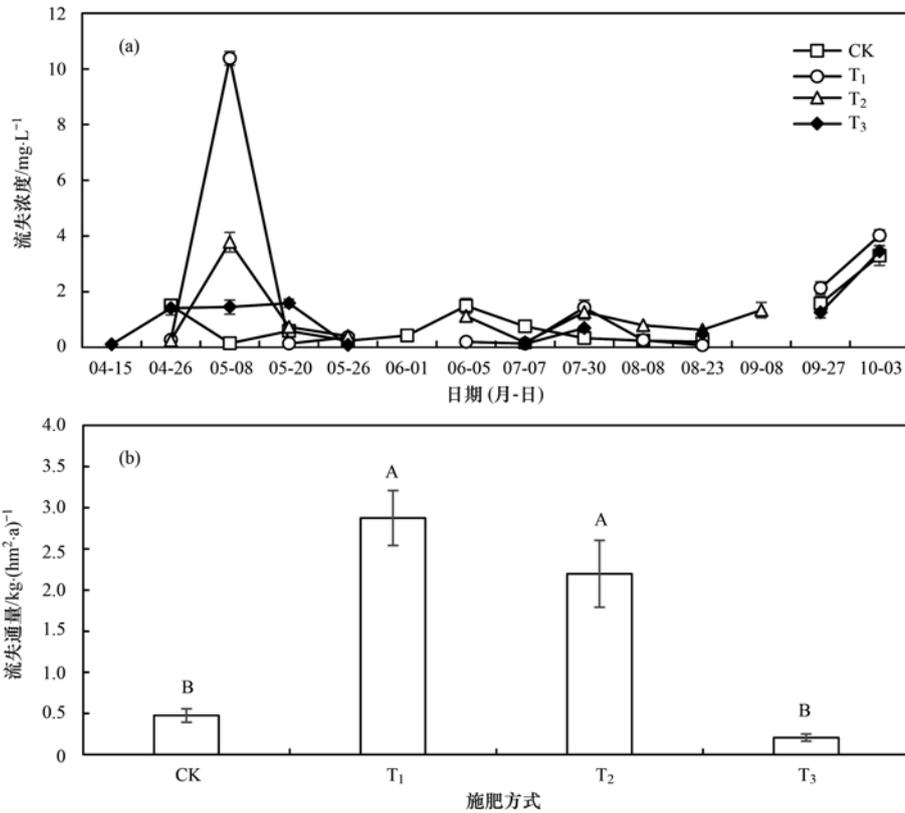
2.2 不同施肥方式对紫色土旱坡地土壤颗粒态氮流失的影响

在图 4 中, 常规施肥(T_1) 和减肥配施秸秆(T_3) 均于 5 月 8 日达到峰值, 其中 T_1 的颗粒态氮流失浓度最大, 为 $10.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 优化施肥(T_2) 和减肥配施秸秆(T_3) 较常规施肥(T_1) 分别降低了 63.59% 和 86.05%。不同施肥处理的颗粒态氮流失通量大小呈现出: 常规施肥(T_1) > 优化施肥(T_2) > 不施肥(CK) > 减肥配施秸秆(T_3), 其中 T_1 和 T_2 之间无显著性差异, CK 和 T_3 之间也无显著性差异。 T_1 的颗粒态氮流失通量是最大的, 为 $2.87 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, T_3 的流失通量显著低于 T_2 和 T_1 ($P < 0.05$), 减肥配

施秸秆较常规施肥和优化施肥能明显降低土壤颗粒态氮的流失。

2.3 不同施肥方式对紫色土旱坡地土壤全氮流失的影响

分析不同处理(CK、 T_1 、 T_2 和 T_3) 的壤中流全氮流失浓度, 发现施肥方式对壤中流全氮的流失有显著影响(图 5)。在 4 ~ 7 月 CK 的全氮流失浓度变化范围为 $0.49 \sim 12.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于各施肥处理(T_1 、 T_2 和 T_3), 常规施肥(T_1) 在 5 月 26 日的流失浓度达到峰值 ($112.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 显著高于 CK ($1.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、优化施肥 ($32.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和减肥配施秸秆 ($36.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ($P < 0.05$)。在 9 ~ 10 月, 各处理



不同字母表示不同施肥处理的颗粒态氮流失通量差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 土壤颗粒态氮的流失浓度变化情况和流失通量特征

Fig. 4 Changes in the loss concentration and characteristics of loss flux of soil particulate nitrogen

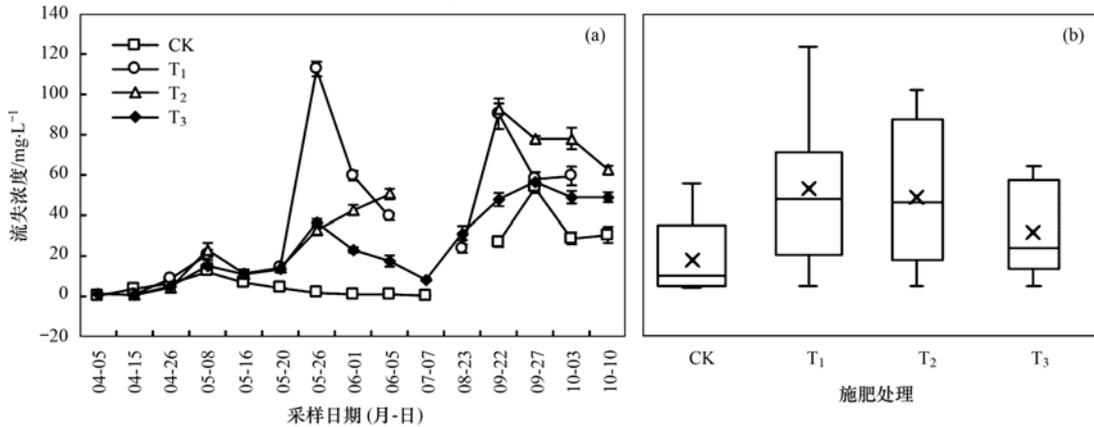


图 5 壤中流全氮流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 5 Changes of total nitrogen loss in the interflow and box plots

的流失浓度均出现明显地上升趋势,CK、T₂ 和 T₃ 流失浓度的峰值均出现在 9 月,其中 T₂ 的峰值最大 (92.97 mg·L⁻¹),其次为 T₃ (56.66 mg·L⁻¹) 和 CK (53.67 mg·L⁻¹)。

在图 5(b)中,从平均值来看,各处理的壤中流全氮平均流失浓度大小呈现:常规施肥(T₁) > 优化施肥(T₂) > 减肥配施秸秆(T₃) > 不施肥(CK),说明 T₃ 能显著降低紫色土旱坡地壤中流全氮的流失浓度。就其极值范围来看,CK 和 T₃ 全氮流失浓度的变化范围相近,T₁ 的变化范围最大。

图 6 中可以看出,各施肥处理(T₁、T₂ 和 T₃) 的地表径流全氮流失浓度在 5 月 8 日达到峰值,其中常规施肥(T₁) 最大,为 13.07 mg·L⁻¹,其次为 T₃ (12.59 mg·L⁻¹)、T₂ (6.66 mg·L⁻¹),分别是同期 CK 处理的 13.36、12.84 和 6.32 倍。在 6 月 1 日的降雨中,只有 CK 处理产生地表径流。各处理(CK、T₁、T₂ 和 T₃) 在 6~7 月的地表径流全氮流失浓度变幅不大,在 8 月 8 日的地表径流全氮流失浓度较 7 月 30 日均有升高,其中 T₁ 的升高最显著,是上一次的 1.49 倍,而 T₃ 在 8 月 8 日未产生地表径流。各处

理在 10 月 3 日的地表径流全氮流失浓度较 9 月 27 日提高了 36.71%~92.73% (T_2 未产生地表径流)。

从全氮流失浓度的均值来看[图 6(b)], 地表径流全氮平均流失浓度的最高值出现在常规施肥处理(T_1), 为 $4.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CK 最低 ($1.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 优化施肥(T_2) 和减肥配施秸秆(T_3) 分别为 $2.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 只有 CK 与 T_1 之间存在显著性差异($P < 0.05$), 其它处理间均无显著性差异。

表 4 所示, 不同施肥处理条件下全氮的流失通量也存在一定的差异. 常规施肥(T_1) 的壤中流全氮流失通量最大, 其次为优化施肥(T_2), 二者均显著高于不施肥处理(CK), 而减肥配施秸秆(T_3) 的壤中流全氮流失通量较 T_1 和 T_2 有显著地降低($P <$

0.05). 各处理(CK、 T_1 、 T_2 和 T_3) 的地表径流全氮流失通量较壤中流有明显的降低, 其中 T_1 的值最大, 而 T_3 的地表径流全氮流失通量最低, 说明 T_3 较 T_1 和 T_2 能显著减少地表径流中氮素的流失. 计算全氮总流失通量发现, 常规施肥(T_1) 和优化施肥(T_2) 之间无显著性差异, 减肥配施秸秆(T_3) 的全氮总流失通量最低, 显著低于 T_1 和 T_2 , T_3 较 T_1 和 T_2 显著减少了紫色土旱坡地的氮素流失。

通过计算发现, 各处理(CK、 T_1 、 T_2 和 T_3) 的壤中流全氮流失通量占全氮总流失通量的 72.88%~92.35%, 泥沙全氮流失通量占比最小(CK 处理除外), 仅占总流失通量的 1.19%~2.18%. 紫色土旱坡地的氮素流失主要是通过壤中流的方式。

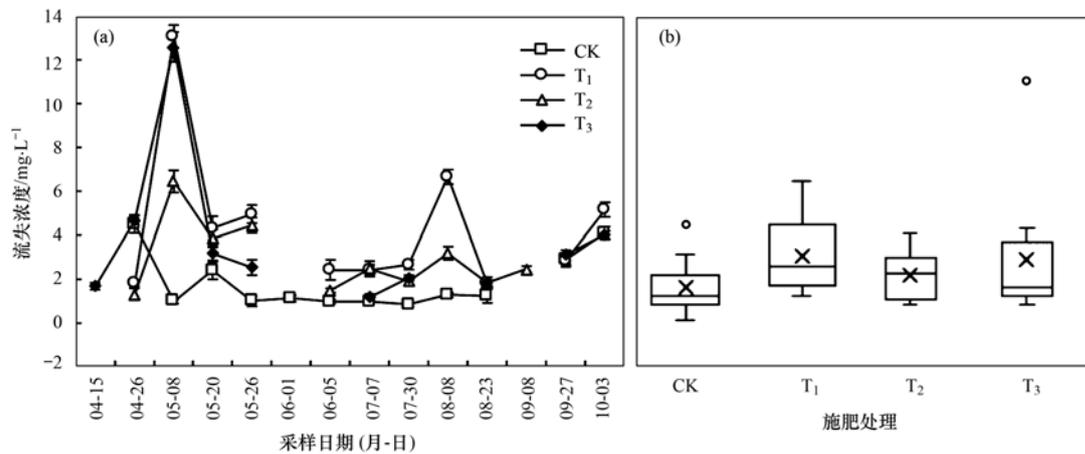


图 6 地表径流全氮流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 6 Changes of total nitrogen loss in the overland flow and box plots

表 4 不同施肥处理条件下全氮的流失通量特征¹⁾/kg·(hm²·a)⁻¹

Table 4 Characteristics of loss flux of total nitrogen with different fertilization treatments/kg·(hm²·a)⁻¹

处理	壤中流全氮流失通量	地表径流全氮流失通量	泥沙全氮流失通量	全氮总流失通量
CK	15.76 ± 2.05b	1.56 ± 0.25c	4.31 ± 1.18a	21.63 ± 3.45b
T ₁	30.84 ± 5.78a	4.04 ± 0.79a	0.70 ± 0.16b	35.58 ± 6.70a
T ₂	29.59 ± 3.20a	2.62 ± 0.49b	0.99 ± 0.23b	33.20 ± 3.79a
T ₃	18.54 ± 3.92b	1.30 ± 0.25c	0.24 ± 0.04b	20.07 ± 4.21b

1) 表中所列数据是平均值 ± 标准差, 同列不同字母表示各处理差异显著($P < 0.05$)

2.4 不同施肥方式对紫色土旱坡地土壤铵态氮和硝态氮流失的影响

2.4.1 壤中流和地表径流中铵态氮的流失情况

在图 7 中, T_1 、 T_2 和 T_3 的壤中流铵态氮平均流失浓度分别为 0.06、0.05 和 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与 CK (0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 之间均无显著性差异($P < 0.05$), 3 种施肥方式对壤中流铵态氮的流失均无显著影响。

在图 8 中, 各施肥处理(T_1 、 T_2 和 T_3) 的地表径流铵态氮流失浓度在 5 月 8 日达到峰值, 分别为 1.98、1.92 和 2.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 图 3(b) 显示各施肥处理条件下地表径流量的峰值也出现在 5 月 8 日, T_1 、 T_2 和 T_3 的地表径流量分别是 2546.10、2569.85 和

878.20 L, 但降雨量的峰值出现在 4 月 26 日, 说明地表径流对降雨的响应有延迟. 与 CK (0.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 各施肥处理的地表径流铵态氮的平均浓度均有显著升高, 但 T_1 、 T_2 和 T_3 之间没有显著性差异($P < 0.05$). 从极值的范围看(除离群值外的最大值和最小值, 下同), T_1 的波动范围最大。

从图 9 中可以看出, 各处理(CK、 T_1 、 T_2 和 T_3) 的地表径流铵态氮流失通量显著高于壤中流铵态氮流失通量, 占总流失通量的 82.23%~96.58%. 各施肥处理(T_1 、 T_2 和 T_3) 的地表径流铵态氮流失通量均显著高于 CK 处理, T_3 较 T_1 和 T_2 分别下降了 61.98% 和 61.39%, 说明 T_3 较 T_1 和 T_2 能显著减少

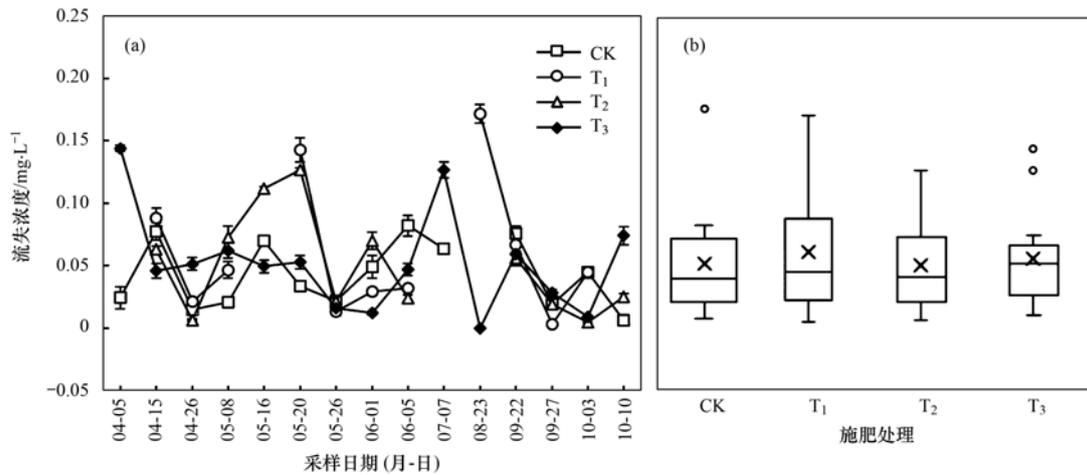


图 7 壤中流铵态氮流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 7 Changes of ammonium nitrogen loss in the interflow and box plots

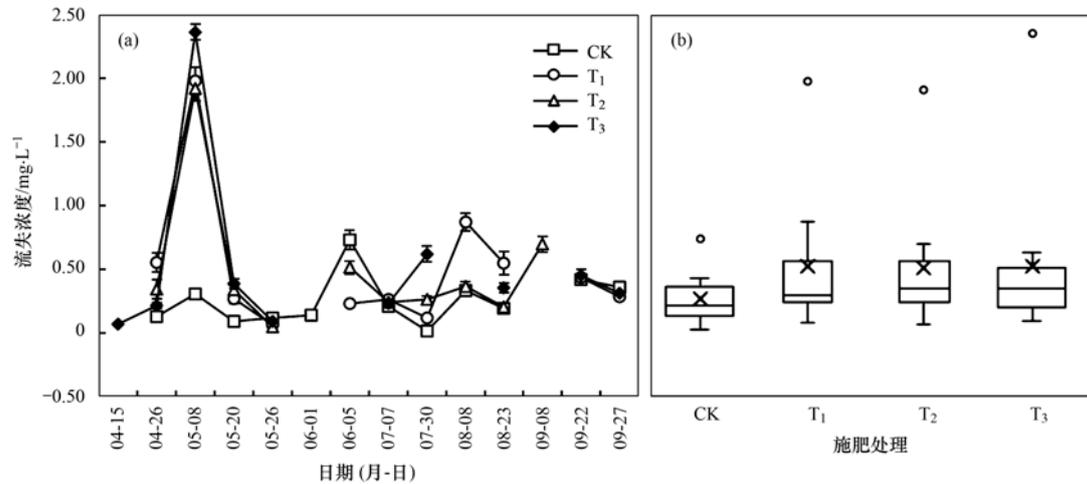
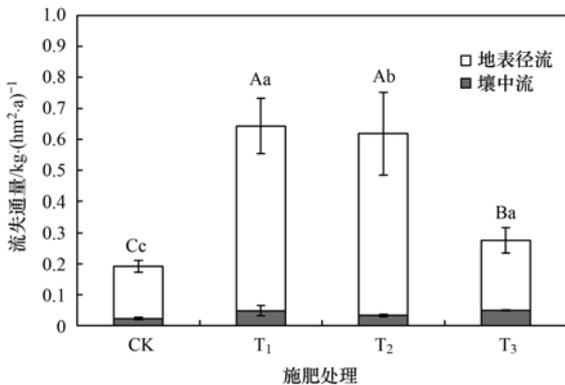


图 8 地表径流铵态氮流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 8 Changes of ammonium nitrogen loss in the overland flow and box plots



不同大写字母表示不同施肥处理的地表径流差异显著, 不同小写字母表示壤中流差异显著 ($P < 0.05$)

图 9 不同施肥处理条件下铵态氮的流失通量特征

Fig. 9 Characteristics of loss flux of ammonium nitrogen under different fertilization treatments

地表径流中铵态氮的流失.

2.4.2 壤中流和地表径流中硝态氮的流失情况

如图 10 所示,各施肥处理(T_1 、 T_2 和 T_3)的壤中流硝态氮流失浓度随降雨过程出现了 3 次峰值变化.

在 3 次峰值中,减肥配施秸秆(T_3)较常规施肥(T_1)和优化施肥(T_2)均出现了显著地下降.在图 10(b)中,常规施肥(T_1)、优化施肥(T_2)和减肥配施秸秆(T_3)的硝态氮平均流失浓度分别为 39.15 、 38.73 和 $24.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均显著高于 CK ($P < 0.05$),而 T_3 较 T_1 和 T_2 显著降低了硝态氮的流失浓度,说明减肥配施秸秆能明显减缓壤中流硝态氮的流失.

从图 11 中可以看出,各施肥处理(T_1 、 T_2 和 T_3)的地表径流硝态氮流失浓度的变化趋势与壤中流的相似,均在 5 月 26 日和 8 月 8 日出现了峰值.在 5 月 26 日, T_1 的流失浓度为 $4.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, T_2 和 T_3 较 T_1 分别下降了 13.07% 和 65.51% .从地表径流硝态氮平均流失浓度来看[图 11(b)], T_1 处理的硝态氮平均流失浓度最大,为 $1.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,各施肥处理间无显著性差异.

在图 12 中,各处理(CK、 T_1 、 T_2 和 T_3)的壤中流硝态氮流失通量均高于地表径流,占总流失通量的 $92.61\% \sim 96.35\%$.常规施肥(T_1)的壤中流硝态氮

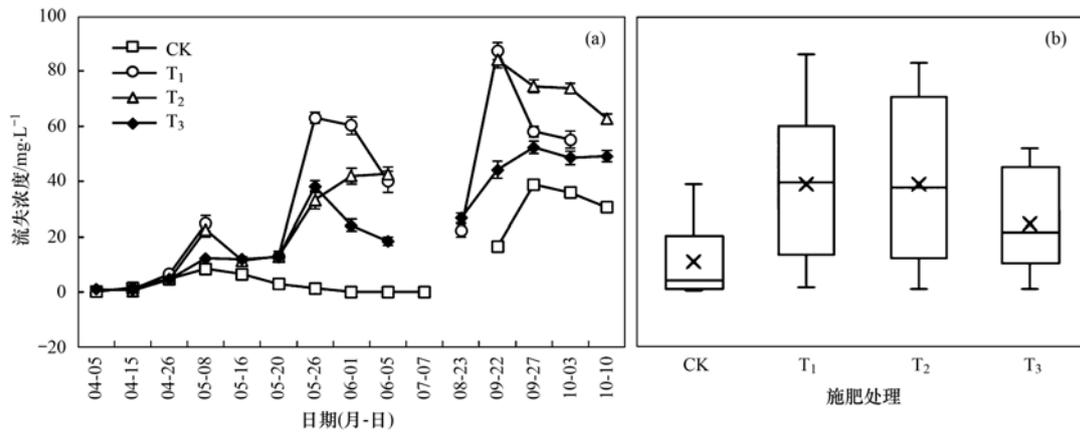


图 10 壤中流硝态氮流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 10 Changes of nitrate nitrogen loss in the interflow and box plots

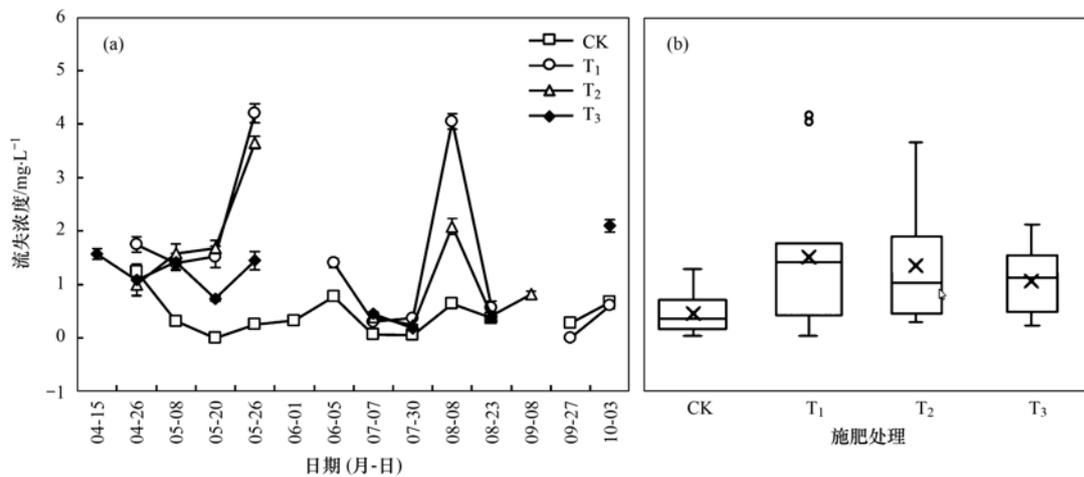
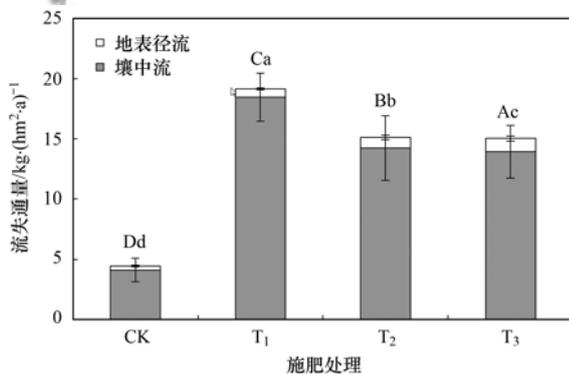


图 11 地表径流硝态氮流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 11 Changes of nitrate nitrogen loss in the overland flow and box plots



不同大写字母表示不同施肥处理的地表径流差异显著, 不同小写字母表示壤中流差异显著 ($P < 0.05$)

图 12 不同施肥处理条件下硝态氮的流失通量特征

Fig. 12 Characteristics of loss flux of nitrate nitrogen under different fertilization treatments

流失通量最大, 为 $18.46 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 优化施肥 (T_2) 和减肥配施秸秆 (T_3) 的壤中流硝态氮流失通量为 $14.23 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $13.94 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, T_3 和 T_2 的壤中流硝态氮流失通量显著低于 T_1 , 说明减肥配施秸秆较常规施肥处理显著减少了土壤中

硝态氮的流失。

2.5 不同施肥方式对紫色土旱坡地土壤氮含量的影响

如表 5 所示, 在油菜季中, 减肥配施秸秆 (T_3) 的土壤铵态氮含量最高 ($4.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别是不施肥 (CK)、常规施肥 (T_1) 和优化施肥 (T_2) 的 2.62、1.89 和 2.32 倍, 减肥配施秸秆 (T_3) 的土壤碱解氮和全氮含量也显著高于常规施肥 (T_1) 和优化施肥 (T_2), 说明减肥配施秸秆 (T_3) 能显著提高土壤碱解氮和全氮的含量。在玉米季中, 各处理的土壤铵态氮含量呈现: 减肥配施秸秆 (T_3) > 优化施肥 (T_2) > 常规施肥 (T_1) > 不施肥 (CK), 优化施肥 (T_2) 和减肥配施秸秆 (T_3) 的土壤硝态氮含量均显著高于常规施肥 (T_1), 不同施肥处理条件下土壤碱解氮的含量也存在一定差异, 其中 T_3 最大, 为 $49.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为 T_1 ($43.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 二者均显著高于 T_2 , 但 T_1 和 T_3 之间无显著性差异 ($P < 0.05$)。 T_1 、 T_2 和 T_3 的土壤全氮含量之间不存在显著差异, 但 T_1 和 T_3 均显著高于 CK。

表 5 不同施肥处理条件下土壤的氮含量¹⁾

Table 5 Nitrogen content in soil with different fertilization treatments

处理	油菜季				玉米季			
	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹
CK	1.72 ± 0.48b	2.66 ± 0.11b	34.38 ± 2.11b	0.26 ± 0.05b	8.59 ± 0.64d	1.04 ± 0.42d	40.10 ± 2.60bc	0.40 ± 0.04b
T ₁	2.39 ± 1.74b	3.42 ± 0.98ab	34.38 ± 2.11b	0.33 ± 0.04b	11.30 ± 0.21c	3.46 ± 0.54c	43.77 ± 4.68ab	0.56 ± 0.08a
T ₂	1.94 ± 0.15b	3.34 ± 0.02ab	33.64 ± 1.06b	0.38 ± 0.03b	14.32 ± 1.07b	6.35 ± 0.42a	34.58 ± 2.08c	0.50 ± 0.05ab
T ₃	4.51 ± 0.32a	4.16 ± 0.52a	41.11 ± 5.29a	0.56 ± 0.12a	15.83 ± 0.64a	5.04 ± 0.60b	49.29 ± 2.08a	0.60 ± 0.05a

1) 表中所列数据是平均值 ± 标准差, 同列不同字母表示各处理差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

施肥会改善作物的生长情况从而影响紫色土旱坡地的产流产沙量, 平衡施肥是降低旱坡地土壤氮素随径流流失的有效方法之一^[19]. 平衡施肥法可以充分提供作物生长所需的营养, 提高植被覆盖率, 有利于降低径流产生量和养分流失量. 本文主要研究减肥配施秸秆对紫色土旱坡地氮素流失的影响. 研究表明, 减肥配施秸秆对紫色土旱坡地氮流失通量具有较好的消减效应.

在本文中, 减肥配施秸秆 (T₃) 的紫色土旱坡地产流产沙量远低于其他处理, 因为试验采用的是晒干后截成 5 ~ 10 cm 的秸秆, 一方面可以增加地表糙率, 阻挡雨水冲击, 减少雨水向下渗漏, 另一方面干燥的秸秆也会吸收一部分雨水, 使地表径流剥蚀土壤和搬运泥沙的能力显著下降^[20, 21], 相对于未添加任何物料的不施肥 (CK)、常规施肥 (T₁) 和优化施肥 (T₂) 处理降低了产流产沙量. 尹忠东等^[22] 研究江西丘陵红壤区坡面径流及其与降雨关系的结果也表明, 秸秆覆盖能显著降低地表径流量, 对水土保持有很好的效果, 与本文结果一致.

进行相关性分析发现, 全氮流失浓度和硝态氮流失浓度存在显著的正相关关系, 与陈成龙^[23] 的研究结果一致. 氮肥施入土壤后, 通过化学以及微生物过程转化成铵态氮、硝态氮以及亚硝态氮等形式, 其淋失以硝态氮为主, 铵态氮只占很小比例^[24], 说明硝态氮是紫色土旱坡地氮流失的主要形态. 土壤颗粒会吸附铵态氮但几乎不吸附硝态氮, 导致铵态氮大量滞留在土壤剖面的上中层, 而硝态氮主要富集在下层^[25], 因此在本文中, 各处理的地表径流铵态氮流失浓度均显著高于壤中流, 而硝态氮流失浓度则恰好相反. 林超文等^[7] 通过研究紫色土区不同雨强和施肥方式对养分流失的影响表明, 壤中流的氮素流失浓度受施肥的影响较大, 而地表径流受施肥的影响较小, 但本文中地表径流的全氮流失浓度和硝态氮流失浓度在施肥后有显著的增加, 这可能是因为施肥在降雨的前 1 ~ 2 d, 全氮和硝态氮随降雨

产流而流失. 各处理壤中流的全氮流失浓度在 8、9 和 10 月出现大幅上升, 而地表径流的全氮流失浓度变化并不明显, 这是因为连续干旱造成土壤氮素累积, 在后期的降雨中集中淋溶出来^[3].

有研究表明: 紫色土氮素流失主要是通过泥沙, 泥沙带走的氮素远多于径流携带的氮素, 并认为泥沙携带的氮素损失量能代表氮素损失总量^[26-29], 这与本文的研究结果不一致, 主要是因为忽略了壤中流对土壤氮素流失的影响, 而主要研究地表径流中的氮素流失. 紫色土土层较薄, 饱和渗透率高, 渗透速率快, 壤中流带走的氮素占总流失养分的比例较大, 因此全面研究紫色土的氮素流失, 必须考虑壤中流的流失特征^[7]. 在本文中, 壤中流径流量占总径流量的 60.14% ~ 88.56%, 是雨季径流的主要输出方式^[30], 不同施肥处理壤中流的氮流失通量均高于地表径流, 说明壤中流是紫色土旱坡地雨季径流的主要方式和氮流失的主要途径, 这与贾海燕等^[31] 的研究结果一致. 周志红等^[32] 通过在紫色土中分别施入 50 t·hm⁻² 和 100 t·hm⁻² 的玉米秸秆后发现, 施秸秆能显著降低土壤的氮流失通量. 本文的减肥配施秸秆处理同样降低了全氮的平均流失浓度, 这与郭智等^[15] 和刘红江等^[33] 的研究结果一致.

4 结论

(1) 紫色土旱坡地的雨季径流方式以壤中流为主, 各施肥处理壤中流径流量占总径流量的比例达到 60.14% ~ 88.56%. 施肥能通过改善作物的生长情况从而显著减少紫色土旱坡地的地表径流量和泥沙流失量, 其中减肥配施秸秆的效果最显著.

(2) 铵态氮主要通过地表径流的方式流失, 硝态氮主要通过壤中流的方式流失且是全氮流失的主要形态. 不同施肥处理的全氮流失浓度和硝态氮流失浓度呈显著的正相关关系, 全氮也主要是通过壤中流的方式流失, 壤中流全氮流失通量占全氮总流失通量的 72.88% ~ 92.35%.

(3) 不同处理的铵态氮和硝态氮流失通量均呈现出: 常规施肥 (T₁) > 优化施肥 (T₂) > 减肥配施秸

秆(T_3) > 不施肥(CK), 不同处理的颗粒态氮流失通量和全氮总流失通量呈现出: 常规施肥(T_1) > 优化施肥(T_2) > 不施肥(CK) > 减肥配施秸秆(T_3), 减肥配施秸秆较常规施肥和优化施肥能显著降低紫色土旱坡地的硝态氮流失通量、铵态氮流失通量、颗粒态氮流失通量和全氮总流失通量, 减肥配施秸秆还能显著提高紫色土旱坡地土壤碱解氮和全氮的含量. 秸秆部分替代化肥是一种既经济又环保的措施, 对实现农田土壤的可持续利用具有重要意义, 因此在农业生产中应大力提倡减量化肥配施秸秆.

参考文献:

- [1] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
Yan X. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [2] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [3] 陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2129-2138.
Chen W L, Gao Y, Lin Y M, *et al.* Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- [4] Oenema O, Van Liere L, Schoumans O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, **304**(1-4): 289-301.
- [5] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**(2): 153-226.
- [6] 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1468-1474.
Wang T, Huang Z L, Zeng L X, *et al.* Effects of fertilization on the nitrogen residual amounts and leaching from citrus orchard soil in the three gorges reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1468-1474.
- [7] 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.
- [8] Huang R, Lan M L, Liu J, *et al.* Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(36): 27942-27952.
- [9] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, **51**(12): 2336-2347.
Gai X P, Liu H B, Zhai L M, *et al.* Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(12): 2336-2347.
- [10] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2912-2919.
Xu X C, Su Y R, Wang G H, *et al.* Straw returning plus nitrogen fertilizer affects the soil microbial community and organic carbon mineralization in karst farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2912-2919.
- [11] 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.
- [12] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 等. 稻草不同还田方式对双季水稻产量及稻米品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(3): 534-542.
Zeng Y H, Wu J F, Pan X H, *et al.* Study on yield and quality of double cropping rice in different straw return approaches[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, **19**(3): 534-542.
- [13] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 有机物料等氮量施用对紫色土氮形态及温室气体排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, **51**(21): 4087-4101.
Huang R, Gao M, Li J C, *et al.* Effects of combined application of various organic materials and chemical fertilizer on soil nitrogen formation and greenhouse gas emission under equal nitrogen rates from purple soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(21): 4087-4101.
- [14] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(1): 30-32, 36.
Xu T P, Zhu B, Wang T, *et al.* Effects of returned straw on nutrient loss from slope cropland of purple soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(1): 30-32, 36.
- [15] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(4): 17-20, 25.
Guo Z, Zhou W, Chen L G, *et al.* Effects of rice straw return on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat growing season in intensive rice-wheat rotation field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(4): 17-20, 25.
- [16] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田面水不同形态氮动态变化特征研究[J]. *水利学报*, 2014, **45**(4): 410-418.
Wang J, Guo X S, Wang Y Q, *et al.* Study on dynamics of nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(4): 410-418.
- [17] 范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(3): 638-649.
Fan Y L, Liu X Z, Gao L, *et al.* Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(3): 638-649.
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, **41**(11): 1374-1381.
Zhou M H, Zhu B, Wang T, *et al.* Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **41**(11): 1374-1381.
- [21] 马良, 左长清, 邱国玉. 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(1): 74-79.
Ma L, Zuo C Q, Qiu G Y. Erosive rainfall characteristics on red soil slope land in northern Jiangxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, **30**(1): 74-79.
- [22] 尹忠东, 丛晓红, 李永慈. 江西丘陵红壤区坡面径流及其与降雨关系的影响因素[J]. 水土保持通报, 2008, **28**(4): 7-10.
Yin Z D, Cong X H, Li Y C. Factors affecting runoff and its relationship with rainfall factors in red earth hilly regions in Jiangxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, **28**(4): 7-10.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000, **21**(6): 16-19.
Zhang X C, Liu G B, Fu H F. Soil nitrogen losses of catchment by water erosion as affected by vegetation coverage [J]. *Environmental Science*, 2000, **21**(6): 16-19.
- [27] 蒋光毅, 史东梅, 卢喜平, 等. 紫色土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.
- [28] 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.
- [29] 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, *et al.* Effect of contour hedgerows on soil nutrient loss in slopeland[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, **5**(2): 23-29.
- [30] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2770-2778.
Han X F, Gao M, Xie D T, *et al.* Reduction effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2770-2778.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(6): 1031-1036.
Liu H J, Zheng J C, Chen L G, *et al.* Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(6): 1031-1036.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)