

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 赵仕伟,高晓清(2637)

秋冬季节华北背景地区 PM₁ 污染特征及来源 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)

杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)

西安市重污染与清洁天 PM_{2.5} 组分及其活性氧物质对比 王莹,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)

黄山 PM₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)

泉州市大气 PM_{2.5} 镧系元素组成特征及来源解析 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 张磷,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)

四川省 2005~2014 年农业源氨排放清单及分布特征 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 鲁君,黄成,胡馨遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)

地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段雨琴,曲宝晓,王启栋(2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)

都柳江水系沉积物镉等重金属空间分布特征及生态风险 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 陈政宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雷,兰晨,王箫(2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)

CaO₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 徐焱,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)

氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)

Pd/Fe⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 韩慧慧,缪恒峰,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)

K⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,袁澄伟(2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)

CO₂-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)

微生物对汞矿区农田土壤甲基化的影响 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,李静(3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)

甲烷催化还原 NO_x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何焯,贺亚飞(3085)

《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征

鲜青松^{1,2}, 唐翔宇^{1*}, 朱波¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 于 2015 年两场代表性降雨事件下研究了紫色土坡耕地(1 500 m²)水文过程驱动的氮磷地表和地下迁移特征. 结果表明:①前期土壤水饱和度和降雨量决定地表径流和裂隙潜流的产流深度和胶体浓度的基本水平;降雨强度则控制产流量的变化趋势和胶体浓度的峰值水平. ②氮素主要以溶解态随裂隙潜流迁移;磷素则主要以细颗粒结合态通过地表径流流失. ③氮磷迁移过程的水文驱动特征明显,氮素迁移主要受裂隙潜流的驱动作用影响,而磷素迁移则主要受地表径流的驱动作用影响. 该研究结果丰富了对坡耕地薄层土壤-裂隙母岩二元系统中氮磷迁移对降雨响应规律的认识,可为农业氮磷非点源污染防治提供可靠的田间数据支持并明确关键的水文调控环节.

关键词: 紫色土;坡耕地;径流过程;胶体颗粒;氮磷养分迁移

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2843-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201611230

Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks

XIAN Qing-song^{1,2}, TANG Xiang-yu^{1*}, ZHU Bo¹

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In a sloping farmland plot(1500 m²) of purple soil with underlying fractured mudrock in Southwest China, field monitoring and sampling campaigns were undertaken to explore the mechanisms of surface and subsurface transport of nitrogen and phosphorus upon two representative rain events in the summer of 2015. The results indicated that: ① depths of surface runoff and subsurface fracture flow as well as average colloid export flux were dependent on antecedent soil wetness and rainfall amount, while discharge dynamics and colloid peak concentration were determined by rainfall intensity; ② nitrogen export was mainly in dissolved forms through subsurface fracture flow, however, phosphorus was mainly transported in particle-associated forms through surface runoff; ③ the transport of nitrogen and phosphorus was strongly influenced by hydrological processes, with nitrogen and phosphorus transport being controlled by fracture flow and surface runoff, respectively. Our findings contribute significantly to the knowledge of nitrogen and phosphorus export from sloping farmland with thin soil underlain by fractured rock upon rainfall, and on the other hand this study provides reliable field data in support of developing effective approaches for controlling agricultural non-point source pollution of N and P and identifying key hydrological processes to be manipulated.

Key words: purple soil; sloping farmland; hydrological process; colloidal particle; nitrogen and phosphorus transport

农田(尤其是坡耕地)土壤氮磷随径流迁移是土壤质量退化的重要原因,导致肥料利用率和粮食产量下降,同时可能造成下游受纳水体的富营养化,对水环境质量和用水安全造成有害影响^[1~3]. 氮磷迁移过程受包括降雨(雨型、雨强、持续时间、降雨量)、土壤结构(厚度、孔隙度、团聚性、导水率)和地形地貌(决定径流类型、迁移路径)在内等诸多因素的综合影响^[4,5]. 王辉等^[6]采用室内人工降雨模拟试验的方法,发现硝态氮仅在前期含水量较高时才会随地表径流流失. 陈维梁等^[7]的野外径流小区试验结果表明氮素随壤中流输出形态在不同降雨强度下差异较大. 地表径流中磷素主要以泥沙吸附态流失,壤中流中则主要是以溶解态有机磷为主^[8]. 有研究发现:环境中存在各类胶体颗粒(直径在 10

μm 以下的悬浮细颗粒),因其巨大的比表面积和丰富的吸附位点,可作为磷肥在地表和地下环境中快速长距离迁移的重要载体^[9,10]. 已有的研究仍主要是采用室内土槽模拟或者野外小型径流场观测氮磷的流失或淋溶特征^[11]. 在土层浅薄区(如紫色土低山丘陵区),有关土-岩二元系统中氮磷随地表径流和地下裂隙潜流的迁移过程及其对降雨的响应特征,尚未见野外的同步观测研究.

长江上游紫色土低山丘陵区是四川盆地重要的

收稿日期: 2016-11-29; 修订日期: 2017-02-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800203); 国家自然科学基金项目(41430750, 41471268)

作者简介: 鲜青松(1991~),男,博士研究生,主要研究方向为污染物水文学, E-mail: 13558830693@163.com

* 通信作者, E-mail: xytang@imde.ac.cn

农业区域,其土层浅薄、有机质含量低、团聚结构和抗蚀性差、胶体颗粒易于分散迁移、土壤大孔隙发育、泥页岩中微细裂隙丰富,因而入渗能力强、土壤大孔隙和岩石裂隙优先流现象较为发育、氮磷迁移流失风险较高^[12,13]。因此,本文通过降雨事件中大型坡耕地径流场的连续观测与采样分析,同步研究坡面水文过程驱动下氮磷的地表与地下迁移特征,以期对氮磷农业非点源污染负荷的准确估算提供可靠的数据支持和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验观测在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(31°16' N, 105°27' E)的大型坡耕地径流场(50 m长、30 m宽、平均坡度6°)进行。剖面自上而下依次为浅薄的紫色土层、含丰富裂隙的泥岩层以及不透水的砂岩层。土层厚度在坡上部约为25 cm,向坡下部逐渐增至约60 cm左右,下伏约210~480 cm厚的泥岩层。为确保降雨为唯一的外来水源,在径流场四周自砂岩层向上建有水泥隔水墙。本研究主要在玉米季(雨季)展开,在玉米播种前使用旋耕机进行翻耕,耕作深度约为15 cm。按当地现行施肥方式,整个玉米季仅在玉米拔节期(2015年7月7日)施氮150 kg·hm⁻²(以N计;含氮量为46.3%的尿素);前季小麦仅在播种时(2014年10月27日)施氮130 kg·hm⁻²(以N计;含氮量为17.1%的碳酸氢铵)、施磷90 kg·hm⁻²(以P₂O₅计;含磷量为12%的磷肥)、施钾36 kg·hm⁻²(以K₂O计;K₂O含量为60%的钾肥)。除此之外,对该径流场不进行任何灌溉和其它施肥处理,其余田间管理方式与当地传统农作习惯一致。该地区属中亚热带湿润季风气候,年均气温在17.3℃,多年平均年降雨量为826 mm,总降雨量的65.5%~85.0%集中于每年的5~9月(雨季),汛期暴涨暴落^[14]。该地区土壤为发育于侏罗系蓬莱镇组紫色页岩的石灰性紫色土,属壤质土。该径流场土壤的pH值为8.3,容重为1.33 g·cm⁻³,饱和导水率在0.01~0.1 mm·min⁻¹范围内,黏粒、粉粒、砂粒含量分别为22.3%、34.6%和43.1%,有机质含量为8.57 g·kg⁻¹,总氮、总磷、总钾分别为0.62、0.64和18.42 g·kg⁻¹,碱解氮、有效磷、速效钾分别为42.29、4.16和71.39 mg·kg⁻¹^[15]。

1.2 研究方法

径流场观测设施的基本设置如图1所示。根据

2012~2013年的观测结果,在泥岩层较深厚的坡耕地中侧向壤中流极少发生^[16],故而仅在坡下部对地表径流和裂隙潜流(泥岩-砂岩层界面)进行监测与采样分析。使用翻斗式自记流量计测定产流量的动态变化。在坡下部土层15、25、35和45 cm深度处分别安装有水势计(T4e, UMS公司,德国),测定土壤不同层次的水饱和度,以明确径流的产流方式及水源贡献。在径流场外侧的中上部安装有自计雨量计,测定降雨量和降雨强度。雨量计、水势计和翻斗式流量计均连接到CR1000数据采集系统(Campbell, Logan, UT, 美国),实现自动连续监测,时间间隔为15 min。为保证数据精度和可靠获取,同时采用HOBO计数器(HOBO Event Logger, H8, Boume, 美国,最小响应时间0.5 s)对翻斗式流量计和雨量计进行计数,以校验CR1000采集记录的数据。

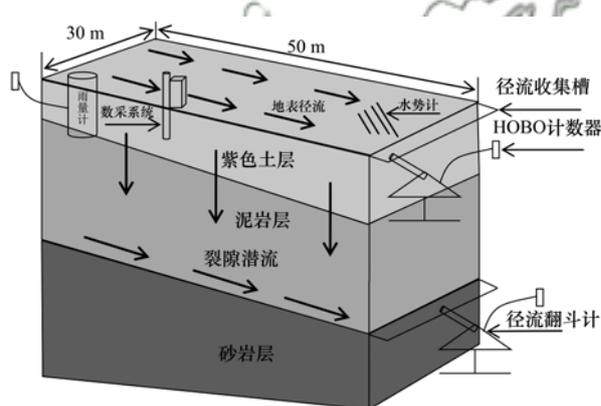


图1 1500 m²大型坡耕地径流场监测系统示意

Fig. 1 Schematic of the field monitoring system in the 1500 m² sloping farmland plot

对于地表径流,因其历时较短,在整个产流过程中,采样间隔均为15 min;在降雨开始阶段和降雨强度明显变化时,按5 min或10 min的间隔进行加密采样。对于裂隙潜流,视径流响应时间(主要由土壤前期水饱和度和降雨强度决定),在降雨开始后先按30 min的时间间隔采样;在随后开始的涨水段,采样间隔缩短至15 min;在降雨事件基本结束后的退水段,按30 min或60 min的间隔采样,直至流量降至基本稳定的水平。特别说明的是:针对多峰型降雨事件,在降雨强度增大时,按15 min的时间间隔对裂隙潜流进行适当加密采样。所有水样保存在玻璃瓶中,4℃冷藏等待分析各项指标。

产流样品在24 h内使用复合型pH计(SensLion+MM150,美国)测定pH和电导率。利用Picarro-i2120液态水稳定同位素分析仪测定水样中氧同位

素含量,其精度可达到 0.1%。使用德国 Seal 公司的 AA3HR 连续流动分析仪对未过滤的水样和过滤样(过 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜)进行测定,得到 DOC、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、总氮(TN)、溶解态氮(DN)、总磷(TP)、溶解态磷(DP)各项指标的浓度,并采用差减法求得颗粒结合态氮(PN)和颗粒结合态磷(PP)的浓度。用双光束紫外可见分光光度计(TU-1900,普析,中国)在波长 400 nm 处测定未过滤的水样中的胶体颗粒浓度。颗粒粒径分布采用激光粒度仪(LA950,Horiba,日本)测定。

2 结果与讨论

2.1 径流和胶体颗粒迁移对降雨的响应

本研究监测了 2015 年的 6 场降雨,选取降雨-产流特征不同且动态数据完整性较好的两场地表与地下均产流的代表性降雨事件(一场为前期土壤干

旱、以裂隙潜流为主的 6 月 23 日暴雨事件,另一场为土壤水分相对饱和、以地表径流为主的 6 月 29 日大雨事件),分析水文过程驱动下的氮磷迁移过程对降雨的响应规律。两场降雨事件的基本特征和前期土壤干旱情况见表 1。产流量以及氮磷和胶体颗粒浓度响应的特征值列于表 2,而各指标在降雨过程中的动态变化如图 2 所示。

6 月 23 日降雨事件前 3 d 总降雨量仅有 9.6 mm,土壤含水量较低,泥岩裂隙潜流在雨前已基本断流[图 2(a)]。6 月 23 日的降雨属双峰型,降雨开始后迅速达到第一个雨强峰值[05:00; 18.6 $\text{mm}\cdot(15\text{ min})^{-1}$],表层土壤水势快速上升至饱和状态(土壤水势 $\geq 0\text{ cm}$);对应第一个雨强峰值,地表径流出现短时间产流(地表径流阶段 1),表现为超渗产流;裂隙潜流响应迅速,在第一阶段降雨停止时,达到第一个峰值流量[582.8 $\text{L}\cdot(15\text{ min})^{-1}$],而

表 1 2015 年两场代表性降雨事件的基本特征和前期土壤水分状况

Table 1 Characteristics of two representative rain events in 2015 and antecedent soil moisture conditions

降雨日期	前期降雨量 (3 d)/mm	前期土壤水势/cm		降雨时间	历时/h	降雨量 /mm	雨强峰值 ¹⁾ / $\text{mm}\cdot(15\text{ min})^{-1}$	
		15 cm 深	45 cm 深					
2015-06-23	9.6	-398	-104	04:30 ~ 17:00	12.5	95.2	18.6(05:00)	7.4(11:15)
2015-06-29	64.6	-27	-5	07:15 ~ 08:45	1.5	27.4	6.8(07:45)	5.6(08:45)

1) 括号内为该峰值对应时刻点

表 2 氮磷和胶体颗粒迁移对降雨事件的响应特征值¹⁾

Table 2 Response of nitrogen, phosphorus and colloid transport to rain events

降雨日期	产流种类	径流量峰值 / $\text{L}\cdot(15\text{ min})^{-1}$		TN 浓度峰值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DN 浓度峰值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP 浓度峰值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PP 浓度峰值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	胶体浓度峰值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
2015-06-23	地表径流	34.5 (05:00)	2.3 (11:45)	11.6 (04:45)	8.7 (04:45)	3.7 (04:45)	6.7 (12:15)	2.5 (04:45)	6.6 (12:15)	1283.2 (04:45)	201 (11:45)
	裂隙潜流	582.8 (09:00)	817.5 (13:15)	23.7 (05:30)	22.6 (05:30)	—	—	—	—	178.1 (05:00)	229.4 (11:45)
2015-06-29	地表径流	979.8 (08:15)	1090.2 (08:45)	5.1 (07:40)	3.7 (08:00)	5.6 (08:30)	6.7 (09:15)	5.6 (08:30)	6.6 (09:15)	4827.6 (07:45)	2187.7 (08:45)
	裂隙潜流	429.6 (09:15)	316.4 (11:15)	7.9 (08:30)	7.8 (08:30)	—	—	—	—	29.4 (07:45)	145.9 (08:45)

1) 括号内为该峰值对应时刻点

后开始缓慢下降。第二阶段降雨的雨强峰值相对较小[11:15; 7.4 $\text{mm}\cdot(15\text{ min})^{-1}$],但仍观测到少量地表径流产生(地表径流阶段 2),此时土壤各深度均已达到饱和状态,为蓄满产流;裂隙潜流量在第二阶段降雨开始后迅速上升,在降雨停止时达到最大流量[817.5 $\text{L}\cdot(15\text{ min})^{-1}$],然后进入缓慢退水期。6 月 23 日降雨事件中,在每个降雨阶段,地表径流和裂隙潜流中的胶体颗粒浓度主要随降雨强度同步升降,其响应速度明显快于产流(胶体浓度峰先于径流量峰出现,表 2);地表径流中的胶体浓度在第

一阶段降雨中成倍数地高于裂隙潜流,最高可达 1283.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而第二阶段降雨的地表径流胶体浓度明显小于第一阶段,最高为 201 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能与其主要受降雨强度控制有关。对于裂隙潜流,胶体颗粒浓度与第一阶段降雨的最大雨强[05:00; 18.6 $\text{mm}\cdot(15\text{ min})^{-1}$]同步出现 10 倍以上的增长[04:45, 13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 05:00, 178.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$],可能主要是分散的表层土壤胶体颗粒通过优先通道快速下渗出流的结果;而第二阶段降雨中裂隙潜流的胶体浓度(229.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于第一阶段(178.1

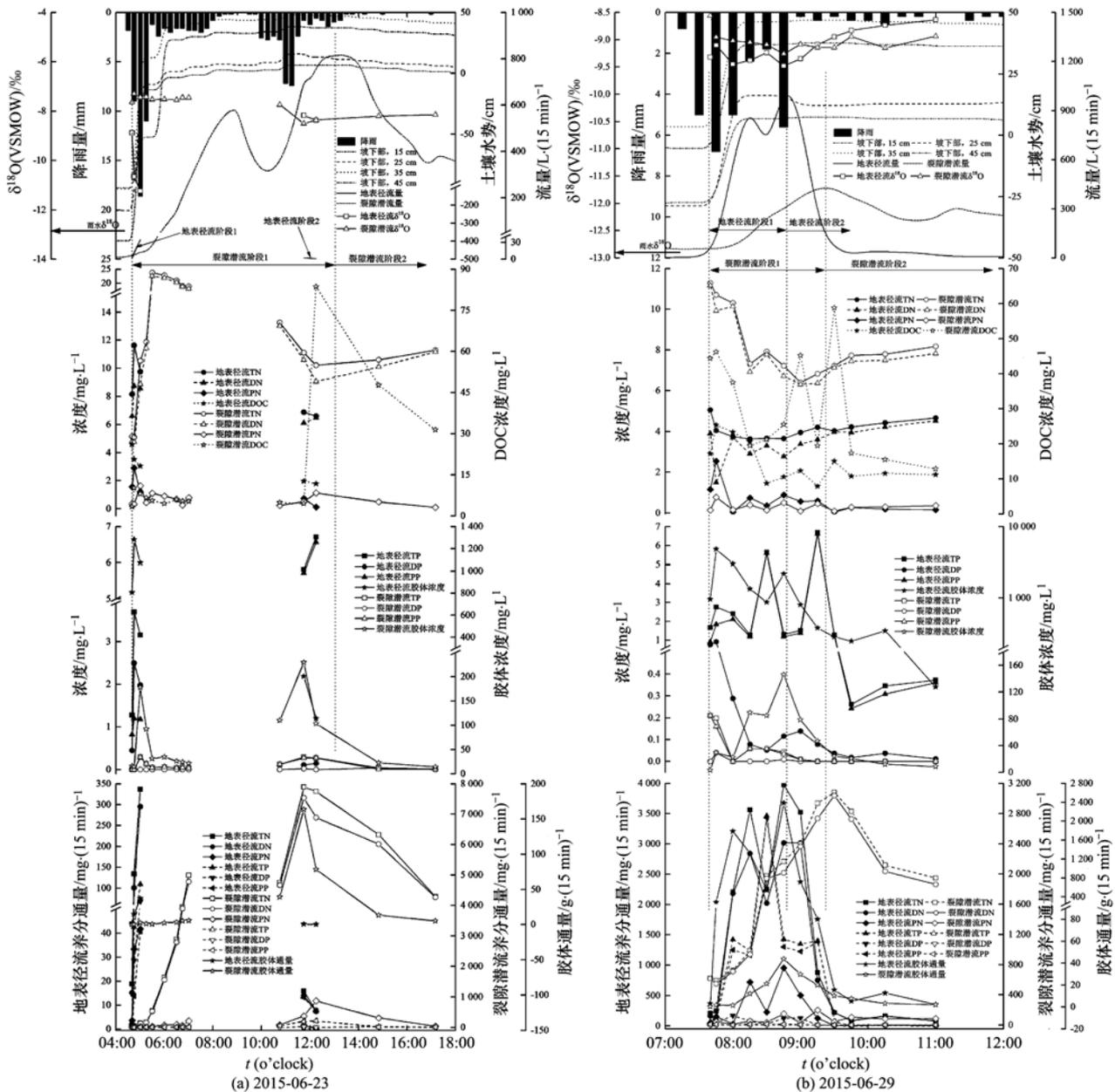


图 2 径流、胶体颗粒和养分迁移对 2015 年两场降雨事件的响应动态

Fig. 2 Dynamics of flow processes, colloid and nutrient transport for two investigated rain events in 2015

mg·L⁻¹), 这表明裂隙潜流中的胶体颗粒除来源于降雨击溅近地表土壤后携带下移, 还受水流对土壤孔隙内壁的冲刷裹挟作用(由流量决定)影响^[17]. 由 δ¹⁸O 的数据结果发现, 在降雨强度较大时, 地表径流和裂隙潜流的 δ¹⁸O 值均有向雨水靠近的趋势, 说明此时雨水对产流的贡献在逐渐增加.

区别于 6 月 23 日降雨事件, 6 月 29 日降雨前土壤湿润(前 3 d 总降雨量达 64.6 mm), 坡下部土壤层均接近饱和状态, 裂隙潜流基流量接近 60 L·(15 min)⁻¹ [图 2(b)]. 在降雨开始后, 地表径流迅速进入产流涨水阶段 [07:30 开始, 图 2(b) 中所

示地表径流阶段 1]; 在达到第一个雨强峰值 [07:45; 6.8 mm·(15 min)⁻¹] 30 min 后, 流量上升至第一个峰值 [979.8 L·(15 min)⁻¹]; 与第二个雨强峰值 [08:45; 5.6 mm·(15 min)⁻¹] 同步达到流量最大值 [1090.2 L·(15 min)⁻¹]; 而后随降雨强度的骤降, 地表径流量进入迅速下降的退水期(地表径流阶段 2). 裂隙潜流量从降雨开始到第 2 个雨强峰值出现后的 0.5 h (裂隙潜流阶段 1) 这段时间内持续增加, 达到最大流量 [429.6 L·(15 min)⁻¹], 而后缓慢下降, 进入退水阶段; 在降雨停止 2.5 h 后, 裂隙潜流量出现了第二个峰值 [316.4 L·(15 min)⁻¹],

这可能与滞后的土壤大孔隙排水贡献有关。相较于 6 月 23 日降雨事件,6 月 29 日的降雨量和最大雨强都明显小于前者,裂隙潜流量和胶体浓度也小于前者;但由于地表径流量呈数量级增加,胶体浓度则超过前者的二倍。

表 3 列出了两场降雨事件中地表径流和裂隙潜流的径流深(mm)、产流系数和胶体累积迁移量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。不难发现,6 月 23 日的裂隙潜流深度(14.96 mm)远大于 6 月 29 日(3.10 mm)的地表径

流深,但胶体迁移总量不到后者的四分之一,说明降雨事件中地表径流驱动胶体迁移的能力明显强于裂隙潜流。

综上,在降雨事件中,地表径流和裂隙潜流的产流深度决定其所携带迁移的累积胶体量。地表径流和裂隙潜流的径流量和胶体浓度均表现出与降雨强度一致的变化趋势,且以地表径流胶体浓度的响应速度更快,但受前期土壤水饱和度(由水势反映)影响,表现出不同程度的滞后效应。

表 3 大型坡耕地观测场的产流、胶体与养分累计迁移量

Table 3 Characteristics of surface runoff, subsurface fracture flow, colloid transport and associated cumulative nutrient export in the large sloping farmland plot

降雨日期	产流种类	产流深度 /mm	产流系数	胶体迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	TN 迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	DN 迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	PN 迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	TP 迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	DP 迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	PP 迁移量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
2015-06-23	地表径流	0.03	3.62×10^{-4}	0.81	7.69×10^{-3}	6.48×10^{-3}	1.21×10^{-3}	2.63×10^{-3}	1.47×10^{-3}	1.16×10^{-3}
	裂隙潜流	14.96	0.16	24.61	4.27	4.06	0.21	0.04	3.57×10^{-3}	3.82×10^{-2}
2015-06-29	地表径流	3.10	0.11	107.66	0.27	0.22	0.04	0.16	9.14×10^{-3}	0.15
	裂隙潜流	1.87	0.07	1.94	0.41	0.39	0.02	1.05×10^{-3}	7.26×10^{-5}	9.76×10^{-4}

2.2 氮磷流失对降雨的响应

在本研究所讨论分析的两场降雨事件中观测到的氮磷流失主要来自于前季小麦施肥在土壤中的残留。在 6 月 23 日降雨事件中,地表径流(产流系数为 0.0004)中 TN 和 DN 的浓度变化范围分别为 $6.6 \sim 11.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.1 \sim 8.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在裂隙潜流(产流系数为 0.16)中表现出更高的浓度值(分别为 $5.1 \sim 23.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.76 \sim 22.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),氮素迁移受降雨强度影响明显,其浓度变化响应迅速,主要以溶解态随占主导地位的裂隙潜流迁移。在 6 月 29 日降雨事件中,地表径流中 TN 和 DN 浓度的变化范围分别是 $3.63 \sim 5.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.5 \sim 4.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,裂隙潜流中则分别是 $6.4 \sim 11.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.31 \sim 11.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两场降雨事件的裂隙潜流中, TN 和 DN 浓度峰同步出现(表 2),其数值接近、变化趋势一致,说明氮素主要以溶解态氮(DN)迁移,以颗粒结合态氮(PN)流失的氮素在裂隙潜流中仅占 0.88% ~ 7.29%;在 6 月 29 日地表径流的总氮浓度中,颗粒结合态氮(PN)所占比例高于 6 月 23 日,但小于 25% ($1.19\% \sim 24.91\%$)。曹杰君等的研究也发现典型次降雨事件中地表径流氮流失以溶解态氮为主^[18]。6 月 29 日降雨事件中,氮素随地表径流(产流系数为 0.11)迁移的比例(40%)明显高于 6 月 23 日,但仍低于随裂隙潜流(产流系数为 0.07)迁移的比例(累计迁移量的 60%)。这表明降雨产流方式主导氮素的迁移路径。

在两场降雨事件中,裂隙潜流中溶解态磷(DP)

浓度极低(基本低于检测限),总磷(TP)浓度的最大值也不超过 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;地表径流中溶解态磷(DP)浓度也基本不超过 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (除 6 月 23 日地表径流阶段 1 外),而总磷(TP)和颗粒结合态磷(PP)浓度同步升降、变化范围接近,分别为 $0.26 \sim 6.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.24 \sim 6.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2)。由此可见,在降雨事件中,紫色土坡耕地的磷素流失主要以细颗粒结合态(胶体态)进行,其主要的迁移路径为地表径流^[19,20]。以 6 月 29 日降雨事件为例,地表径流中颗粒的中径在 $9 \sim 15 \mu\text{m}$ 范围内,以 $<20 \mu\text{m}$ 细颗粒为主。

本研究两场降雨事件中随地表径流和裂隙潜流的累积养分流失量列于表 3,反映了水文驱动过程下氮磷地表和地下迁移的主要形态与流失负荷($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)特征。6 月 23 日降雨以裂隙潜流为主导水文过程,累计 TN 流失量达到了 $4.27 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (DN 占 95%),但累计 TP 流失量仅 $0.04 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 PP 为主,占 95%以上);地表径流中氮流失量是磷的近 3 倍,但仅 $0.01 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。6 月 29 日降雨,地表径流成为主导水文过程,累计 TP 流失量达到了 $0.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (PP 占 93.75%),远大于 6 月 23 日和 29 日降雨事件中随裂隙潜流的磷流失量。这说明降雨事件中地表径流驱动磷迁移的能力要明显强于裂隙潜流。

综上,降雨事件中,紫色土坡耕地氮素流失主要以溶解态(主要是硝态氮)随裂隙潜流迁移;部分氮素以细颗粒结合态流失,其占总氮浓度的比例在地

表径流中更高. 磷素流失则主要是以细颗粒结合态为主, 由于土壤层孔隙系统对细颗粒结合态磷的截留作用, 地表径流对磷素的驱动作用要强于裂隙潜流. 因此, 磷素的主要迁移路径为地表径流, 仅有极少部分细颗粒态(胶体态)磷能通过土壤大孔隙和泥岩裂隙等优先通道迁移.

2.3 氮磷流失规律分析

由上述观测结果可知, 氮、磷迁移路径受前期土壤水饱和度、降雨特征及所发生的径流类型与径流量等多因素影响. 对两场代表性降雨事件的时间序列数据的统计分析发现: 氮磷流失各形态浓度与径流量、胶体颗粒浓度等并无显著的相关关系, 说明水流驱动、颗粒释放搬运及氮磷溶出过程交织在一起, 加之运移通道(土壤孔隙与泥岩裂隙)空间分布的高度异质性, 各自的相对贡献随时间发生复杂的非线性变化.

以6月29日降雨事件为例, 前期土壤较为湿润, 大量含较高浓度溶解态氮的老水存在于土壤孔隙中. 降雨开始后, 雨水(新水)击溅、冲刷表层土壤, 溶出大量氮素随地表径流迁移, 导致地表径流中DN流失通量(单位时间的流失质量)迅速上升, 对应于两次降雨强度峰值形成两个DN流失通量峰值, 分别为 $2\ 842\ \text{mg}\cdot(15\ \text{min})^{-1}$ 和 $3\ 018\ \text{mg}\cdot(15\ \text{min})^{-1}$; 而裂隙潜流中的溶解态氮可能来源于下渗雨水的淋溶作用及其与土壤孔隙中可动老水的混合作用, 其流失通量增长相对较缓, 但在裂隙产流高峰(09:30)时达到最大值 $3\ 037\ \text{mg}\cdot(15\ \text{min})^{-1}$ [图2(b)]. 降雨结束后, DN随地表径流的流失通量迅速下降至零; 裂隙潜流中由于土壤孔隙及泥岩裂隙排水的贡献, DN迁移通量随之发生缓慢下降. 尽管裂隙潜流的最大流量不到地表径流的一半(表2), 但二者的DN最大流失通量接近, 这也说明裂隙潜流是氮素迁移的主要途径. 综上, 紫色土坡耕地土壤中的氮素极易溶出迁移, 受降雨事件中水文驱动特征明显, 其迁移路径决定于土壤前期水饱和度、土层中氮素的剖面分布情况和降雨特征.

磷素迁移的主要形态为细颗粒结合态磷(PP), 在6月29日降雨事件中, 受雨滴击溅和径流的冲刷裹挟作用, 表层土壤被剥离、分散释放出细颗粒结合态, 成为磷的运移载体随地表径流迁移^[21]. 统计分析发现: PP和胶体颗粒的累积地表流失通量[以 $\text{mg}\cdot(15\ \text{min})^{-1}$ 计]之间存在显著相关关系($R^2 = 0.978, P < 0.01$). 6月23日降雨以裂隙潜流为主导水文过程[图2(a)], PP也主要通过裂隙潜流迁

移, 统计分析也发现PP和胶体颗粒累积地下迁移通量之间存在显著相关关系($R^2 = 0.995, P < 0.01$). 由此可以得出推论: 磷主要与细颗粒(尤其是胶体颗粒)结合, 而地表径流中细胶体颗粒所占比例更大, 富磷的细胶体颗粒优先快速迁移; 在裂隙潜流中由于土壤孔隙的尺寸排阻效应和孔隙壁的吸附作用, 细胶体颗粒所占比例反而较小^[22,23], 只有极少量的细颗粒结合态磷随土壤大孔隙优先流及裂隙潜流迁移.

紫色土坡耕地土壤团聚结构差, 易发生水土流失^[24,25], 加之土壤中大孔隙和泥岩裂隙优先流较为发育, 降雨引发的地表径流和裂隙潜流中往往含有一定浓度的胶体颗粒, 会对氮磷的运移形态和流失通量产生影响. 在之前的研究中发现, 降雨事件中地表径流和裂隙潜流胶体颗粒中不同级配所占比例受降雨强度等因素影响不断变化, 径流中胶体颗粒的比表面积也不断变化, 对氮磷流失的吸附-解吸、碰撞裹挟等作用可能并不稳定^[10]. 本文只有两场代表性降雨事件下坡耕地的氮磷流失特征分析结果, 未来有必要通过多年野外监测, 进一步关注胶体颗粒级配在降雨事件中的动态变化以及氮磷粒级分布特征, 以明确养分胶体颗粒结合态运移对流失通量的相对贡献及其主要影响因素.

3 结论

(1) 紫色土坡耕地的前期土壤水饱和度和降雨量决定地表径流和裂隙潜流的产流深度, 从而影响胶体浓度的基本水平; 降雨强度则控制产流量的变化趋势和胶体浓度的峰值水平.

(2) 紫色土坡耕地土壤中的氮素极易溶出迁移, 流失形态以溶解态为主, 其主要迁移路径取决于前期土壤水饱和度、降雨特征(最大雨强及历时)和土壤剖面中氮素的分布情况, 水文驱动特征明显.

(3) 紫色土坡耕地土壤中的磷素主要以细颗粒结合态(胶体态)随地表径流快速流失, 而随裂隙潜流发生的胶体态迁移通量非常低.

致谢: 感谢中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站对本研究的支持.

参考文献:

- [1] Zhao P, Tang X Y, Tang J L, et al. The nitrogen loss flushing mechanism in sloping farmlands of shallow Entisol in southwestern China: a study of the water source effect[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, **8**(12): 10325-10337.
- [2] 丁晓雯, 沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 4025-4032.

- Ding X W, Shen Z Y. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fujiang watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 4025-4032.
- [3] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- Ouyang W, Cai G Q, Huang H B, *et al.* Temporal-spatial distribution of agricultural diffuse nitrogen pollution and relationship with soil respiration and nitrification [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [4] 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 等. 瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1051-1059.
- Li R Z, Zou Y, Xu J J, *et al.* Distribution characteristics and erosion risk of nitrogen and phosphorus in soils of Zhuangmu town in Lake Wabuhu basin[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1051-1059.
- [5] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(1): 7-12.
- Shan B Q, Yin C Q, Yu J, *et al.* Study on phosphorus transport in the surface layer of soil with rainfall simulation method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(1): 7-12.
- [6] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1571-1578.
- Wang H, Wang Q J, Shao M A. Effect of antecedent soil moisture on Nitrate-N and Phosphorus loss from loess slope-land and determination of optimal moisture values[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(8): 1571-1578.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] VandeVoort A R, Livi K J, Arai Y. Reaction conditions control soil colloid facilitated phosphorus release in agricultural Ultisols [J]. *Geoderma*, 2013, **206**: 101-111.
- [10] 张维. 紫色土坡地产流过程及胶体迁移研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [11] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. *环境科学*, 2003, **24**(2): 35-40.
- Liang T, Wang H, Zhang S, *et al.* Characteristics of phosphorous losses in surface runoff and sediment under different land use in west Tiaoxi catchment [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(2): 35-40.
- [12] 朱波, 汪涛, 徐泰平, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. *山地学报*, 2006, **24**(5): 601-606.
- Zhu B, Wang T, Xu T P, *et al.* Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(5): 601-606.
- [13] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. *水利学报*, 2009, **40**(6): 659-666.
- Jiang R, Zhu B, Tang J L, *et al.* Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(6): 659-666.
- [14] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, *et al.* Tracing water flow from sloping farmland to streams using oxygen-18 isotope to study a small agricultural catchment in southwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **134**: 180-194.
- [15] Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**(4): 1419-1426.
- [16] 吕玉娟. 坡耕地紫色土水力特性及其水分与产流动态研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [17] Shang J Y, Liu C X, Wang Z M. Transport and retention of engineered nanoporous particles in porous media: effects of concentration and flow dynamics [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, **417**: 89-98.
- [18] 曹杰君, 高扬, 黄海波, 等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2587-2593.
- Cao J J, Gao Y, Huang H B, *et al.* Output characteristics of non-point nitrogen from a typical village region in Yangtze Delta under an individual rainfall event [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2587-2593.
- [19] 胡万里, 刘宏斌, 鲁耀, 等. 南方丘陵区耕地磷素地表径流流失特征研究[J]. *西南农业学报*, 2016, **29**(11): 2676-2681.
- Hu W L, Liu H B, Lu Y, *et al.* Research on phosphorus runoff of farmland in south hilly region [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, **29**(11): 2676-2681.
- [20] 沈茜, 唐家良, 朱波. 紫色丘陵区典型小流域非点源磷迁移特征[J]. *山地学报*, 2015, **33**(5): 528-537.
- Shen X, Tang J L, Zhu B. Characteristics of non-point-source phosphorus losses in some representative land-use sub-catchments in the hilly area of purple soil [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, **33**(5): 528-537.
- [21] Zhou B T, Gao M, Wei C F, *et al.* Study on kinetics of phosphorus adsorption on the surface of organo-mineral colloidal complex in purple paddy soil [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2000, **25**(5): 553-560.
- [22] Zhang W, Tang X Y, Weisbrod N, *et al.* A review of colloid transport in fractured rocks [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, **9**(6): 770-787.
- [23] Zhang W, Tang X Y, Xian Q S, *et al.* A field study of colloid transport in surface and subsurface flows [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **542**: 101-114.
- [24] 何毓蓉, 黄成敏. 四川紫色土退化及其防治[J]. *山地学报*, 1993, **11**(4): 209-215.
- He Y R, Huang C M. Purple soil degradation and its control in Sichuan province [J]. *Mountain Research*, 1993, **11**(4): 209-215.
- [25] 严冬春, 文安邦, 史忠林, 等. 川中紫色丘陵坡耕地细沟发生临界坡长及其控制探讨[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(6): 1-4.
- Yan D C, Wen A B, Shi Z L, *et al.* Critical slope length and control of rill occurrence on cultivated land of purple soil in Sichuan basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, **17**(6): 1-4.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)