

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系

陈成龙¹, 高明^{1,2*}, 木志坚^{1,2}, 倪九派^{1,2}, 祁乐¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 利用长期田间监测数据, 分析了三峡库区典型农业小流域不同土地利用类型土壤、浅层地下水氮磷含量分异特征, 剖析了坡面土壤氮磷含量与浅层地下水、坡面地表径流氮磷浓度的相互关系。结果表明梯田的土壤 TN 平均含量显著 ($P < 0.05$) 高于坡耕地, 水田梯田平均含量 $1.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 最高; 旱地坡耕地和桑树套种坡耕地土壤 TP 平均含量显著高于其它地类; 旱地梯田土壤 NO_3^- -N 平均含量最高, 离散程度最大。坡面土地利用类型对浅层地下水 TN、 NO_3^- -N 浓度影响较大, 但对 TP 浓度影响较小; 流域浅层地下水 TN 浓度与 NO_3^- -N 浓度呈极显著正相关, 不同坡面浅层地下水 NO_3^- -N 对 TN 平均贡献率在 67.82% ~ 78.51% 之间; 浅层地下水 TN、 NO_3^- -N 月平均浓度变化规律基本一致, 春秋两季农作物施肥后均呈现明显上升趋势。坡面土壤 TN 平均含量与浅层地下水 TN 浓度呈显著指数关系, 坡面土壤 NO_3^- -N 平均含量与浅层地下水 NO_3^- -N 浓度呈对数关系, 但与坡面地表径流 TN、 NO_3^- -N 浓度无显著相关性; 当坡面地表径流 TP 浓度 $> 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 坡面土壤 TP 平均含量与其呈显著线性相关; 坡面地表径流与浅层地下水 TN、 NO_3^- -N 浓度均呈显著幂函数关系, 且 NO_3^- -N 相关性更好。

关键词: 小流域; 土地利用; 土壤养分; 浅层地下水; 地表径流; 关系

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3254-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701137

Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Cheng-long¹, GAO Ming^{1,2*}, MU Zhi-jian^{1,2}, NI Jiu-pai^{1,2}, QI Le¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: Long-term field monitoring data was analyzed regarding the characteristics of nitrogen and phosphorus in the soil and shallow groundwater of different land use types in a typical small watershed of the Three Gorges Reservoir area. Furthermore, the relationships among soil nitrogen and phosphorus contents, concentrations of nitrogen and phosphorus in shallow groundwater, and slope surface runoff were analyzed. The results showed that the average contents of TN and NO_3^- -N in terrace soil were significantly higher than those in sloping upland soil ($P < 0.05$), for which the average content of paddy terrace was highest ($1.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The average contents of TP in the soil of sloping upland and mulberry-sloping upland were significantly higher than those in the soil of other land types. The average content of NO_3^- -N in the soil of dryland terrace was highest of all land use types and its discrete degree was also largest. The slope land use type had greater impact on the concentrations of TN and NO_3^- -N in shallow groundwater, but it had little influence on TP concentration. In addition, the shallow groundwater TN concentration and NO_3^- -N concentration had significant positive correlation, and the average contribution rate of NO_3^- -N to TN in five wells ranged from 67.82% to 78.51%. The monthly average concentration of TN and NO_3^- -N in shallow groundwater changed little, only showing a significant upward trend after the fertilization stage of the two crops in spring and autumn. The average contents of TN and NO_3^- -N in the slope soil were significantly correlated with the TN and NO_3^- -N concentrations in the shallow groundwater, but there was no significant correlation between the TN and NO_3^- -N concentrations in the surface runoff. When the slope surface runoff TP concentration was $> 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the average content of TP had a significant linear correlation with it. There was a significant power function relationship between the concentrations of TN and NO_3^- -N in the surface runoff and concentrations of TN and NO_3^- -N in the shallow groundwater, with higher correlation of NO_3^- -N concentrations between surface runoff and shallow groundwater.

Key words: small watershed; land use type; soil nutrients; shallow groundwater; surface runoff; relationship

土壤养分流失的过程实质上是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程, 降雨和径流是土壤养分流失的动力, 土壤是其相互作用的界面^[1]。土壤养分在水的驱动下, 一部分随地表径流、侵蚀泥沙

收稿日期: 2017-01-16; 修订日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671291)

作者简介: 陈成龙(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为面源污染、土地利用与生态环境, E-mail: swcccl@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

的横向迁移途径流失,一部分随水分下渗形成的纵向迁移途径流失。土壤养分流失受降雨、植被覆盖、土地利用方式、地形地貌等诸多因素的影响,但土壤养分含量是影响降雨径流和下渗携带养分能力的重要源因子^[2,3]。土壤养分含量越高,通过地表径流和淋溶流失形成的农业面源污染的潜在风险就越大。大尺度区域土壤养分含量主要受土壤母质、气候条件、地形地貌等差异影响,而在景观和流域尺度上,气候和母质相对均一,土地利用类型及其空间分布、施肥、农作物种植模式等因素的影响相对较大^[4~8]。土壤养分在降雨-径流作用下迁移流失过程十分复杂,雨滴打击和径流冲刷作用会产生一定厚度的扰动层,层内土壤溶质会以一定的比例和模式分配到径流水、土壤水和入渗水中^[9],土壤养分随径流迁移和下渗迁移密不可分。紫色土是由紫色页岩发育而成,土层薄、孔隙度大、透水性良好,土层下伏透水性较弱的泥页岩^[10],土壤养分与地表径流、浅层地下水关系更为密切。

因此,本研究以三峡库区紫色土农业小流域为例,利用所采集的土壤、浅层地下水和地表径流样品,分析了流域不同土地利用类型土壤氮磷养分含量特征和浅层地下水氮磷浓度时空变化特征,探讨了坡面土壤氮磷养分含量与浅层地下水、坡面地表径流氮磷浓度之间的关系,以期对三峡库区农业流域土壤养分流失机制研究和面源污染有效控制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于三峡库区涪陵段珍溪镇王家沟小流域(E107°30', N29°54'),地处三峡库区腹心地带,属长江一级支流。流域地形为低山丘陵,海拔在186~317 m之间,土壤以紫色土为主,分布有少部分水稻土。流域内由地貌自然分割成两个树状结构的子流域,面积分别为47.21 hm²、35.13 hm²,子流域主要集水线上筑有水泥干渠。研究区域属亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量为1 011 mm,4~10月降雨量约占全年的85%。研究区域基础资料详实,绘有1:1 000实测地形图和土地利用现状图。流域内土地垦殖率高,农作物种植模式较单一,春季以玉米、水稻为主,秋季轮种榨菜。玉米纯氮施肥量约210 kg·hm⁻²,榨菜约260 kg·hm⁻²,水稻-榨菜轮作和桑树套种方式下,水稻、桑树施肥量很少。

1.2 采样点布设和样品采集

1.2.1 井水采样点布设和样品采集

依据研究区域内地形地貌分布特征,从土地利用类型的代表性角度考虑,选择坡面集水区域界线分明、不易发生回归流的5个坡面,在坡底布设浅层地下水采集水井(图1),井深在1.5~2.5 m间,采样深度在0.5~1 m处。5口水井下渗面土地利用类型分别为:W1旱地梯田配置桑树篱;W2旱地坡耕地;W3桑树套种坡耕地;W4由旱坡地、桑园、林地和农村居民点用地组成的复合型坡面;W5为林地和部分旱坡地。井水样品采集频率为:4~10月(雨季)每隔20天左右采集一次;11月至次年3月每隔30 d左右采集一次。2012年3月~2015年12月共采集浅层地下水55次,其中,2014~2015年采集次降雨地表径流次日采集浅层地下水8次。

1.2.2 坡面地表径流采集点布设和样品采集

本研究共布设9个坡面地表径流监测点(图1):W1、W3、W5井口所在的集水坡面均由地形自然形成唯一排水口,坡面地表径流监测点布设在坡底排水口处;W2井口所在集水坡面由坡底高出地面的水泥干渠将坡面径流拢聚,通过干渠设计的矩形槽口排入干渠,坡面地表径流监测点布设于槽口;其它所选5个坡面地表径流采样点布设于坡面集水区主排水口处,集水区相对独立,且集水区内土地利用类型单一。根据每场降雨历时,分别采集地表产

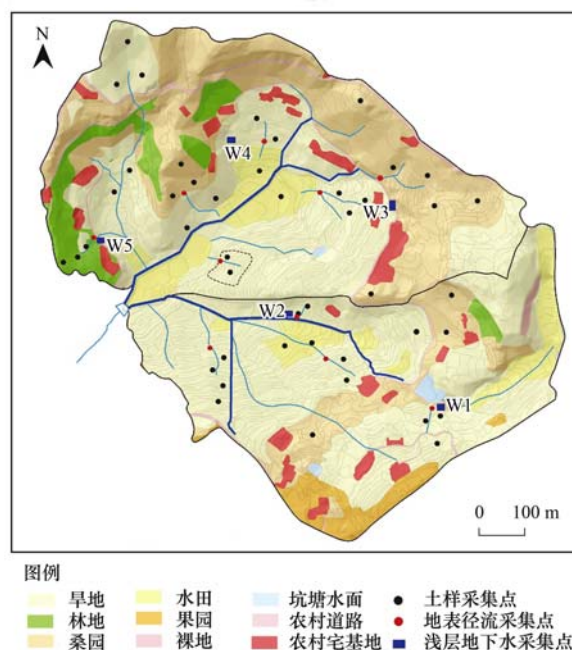


图1 王家沟小流域土地利用现状和采样点布设

Fig. 1 Current situation of land use and layout of sampling points in the Wangjiagou watershed

流后 0.5、1、2、4、8 h 和降雨结束后 1 h 地表径流水样 4~6 个,每个样品 200 mL,再将这些样品混合后取 250 mL 作为本次降雨采样点测试水样。一般在土壤样品采集后的最近一次降雨采集坡面地表径流样品,2014~2015 年共采集坡面地表径流样品 72 个。

1.2.3 土样采集点布设和样品采集

根据坡面降雨径流采样点和井水采样点布局,在坡面地表径流采样点汇水区域内沿坡面方向不同坡面位置(坡顶、坡腰、坡底)布设土样采集点;同时,针对流域内主要土地利用类型空间分布特征,增设部分土样采集点,研究区域内共布设 45 个土样采集点。土壤样品每年采集 4~5 次,主要采集时间为春秋两季作物种植前和农作物追肥结束一段时间后以及夏季春秋作物轮空期间,2014~2015 年共采集土壤样品 9 次。

1.3 样品测试方法

采集的水样 4℃ 保存,并在 48 h 内完成测试。水样原液一部分用来测定总氮(TN)、总磷(TP),另一部分水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后,测定硝态氮(NO_3^- -N)。水样中 TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89)测定;TP 采用钼蓝比色法(GB 11893-89)测定; NO_3^- -N 使用 DX-120 型离子色谱仪(Dionex 公司,美国)测定。

土壤样品 TN 采用半微量凯氏定氮法测定,土样 TP 采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法,采用酚二磺酸比色法测定新鲜土样 NO_3^- -N 含量。

1.4 数据统计与分析

利用 Origin 8.5 和 SPSS 21 软件,对 2014~2015 年采集的不同土地利用类型土壤样品和 2012~2015 浅层地下水样品的 TN、TP 和 NO_3^- -N 含量的分布水平及其变异程度进行比较分析(箱体中间空心点为其平均值,箱体上方的英文字母为多重比较显著性差异结果)。

选取 W1、W2、W3 所在的 3 个土地利用方式单一的农用地坡面,利用所采集的坡面土壤样品和浅层地下水样品(共 27 个水样)分析坡面土壤氮磷养分平均含量与浅层地下水氮磷浓度关系;利用土样采集后最近一次降雨采集的坡面地表径流水样(除 2014 年 3 月土样采集后长期无降雨外,8 次降雨事件 9 个坡面共采集 72 个水样),分析坡面土壤氮磷养分平均含量与地表径流氮磷浓度关系;2014~2015 年采集坡面地表径流样品次日采集浅层地下水样品共 8 次,利用除 W4(井口旁边农户日常生

活用水未能进行有效收集和处理,会对地表径流产生一定影响,因此,未在该坡面布设地表径流监测点)外的 4 口井和其所在的下渗坡面地表径流监测点采集的样品(均为 32 个水样),分析坡面地表径流与浅层地下水氮磷浓度的关系。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型空间分布及其土壤养分含量特征

2.1.1 不同土地利用类型空间分布特征

流域内土地利用类型包括旱地、水田、桑园、林地、坑塘水面、农村居民点等。其中,受人为耕作影响的主要有旱地、水田和桑园三大类,结合流域内现有的不同地类耕作方式可细分为:旱地坡耕地(L1)、旱地梯田(L2)、旱地梯田配置桑树篱(L3)、桑树套种坡耕地(L4)、密植桑园(L5)、水田梯田(L6)这 6 类。根据其在流域内空间分布,利用洛伦兹曲线的理论,计算 6 种地类随空间相对高程(流域出口为 0,最高高程为 1)和相对坡度(流域内田块最小坡度为 0,最大坡度为 1)的面积累计比例变化(图 2)。根据图 2,旱地坡耕地相对高程曲线与均衡线最为接近,结合图 1 也可以看出,旱地坡耕地在流域分布较广泛,不同高程区间均有分布;梯田(L2、L3、L6)相对高程曲线分布于均衡线的左上侧,可见流域内的梯田分布的高程相对较低,尤其是水田梯田主要分布在流域内相对海拔较低的冲沟中;桑树套种坡耕地相对高程曲线多在均衡线右下方,相对高程标准值 0.3~0.8 区间的面积约占 80%,其空间布局主要为流域的中上部,分布较为集中连片。但当相对高程标准值大于 0.8 时,6 种地类中只有 L1 和 L4 面积累计比仍在增加,这也表明只有此两者在流域内高海拔区域有分布;密植桑园主要布局于流域的中部地势由高向低过渡区域,这些区域地形陡峭,其相对坡度最大。不同地类的坡度洛伦兹曲线具有整体性的平行分布趋势,且主要分布于均衡线的左上方。梯田随坡度的洛伦兹曲线更靠近 Y 轴,可见流域内梯田分布的坡度最缓;旱地坡耕地和桑树套种旱坡地较为接近,桑树套种旱坡地更陡。

利用 ArcGIS10.2 软件,对所布设的土壤采集点中的 L1~L6 地类采样点空间分布特征进行统计(表 1)。从 6 种地类土样采集点坡度、高程空间分布来看,基本能够代表该地类在流域内空间分布。

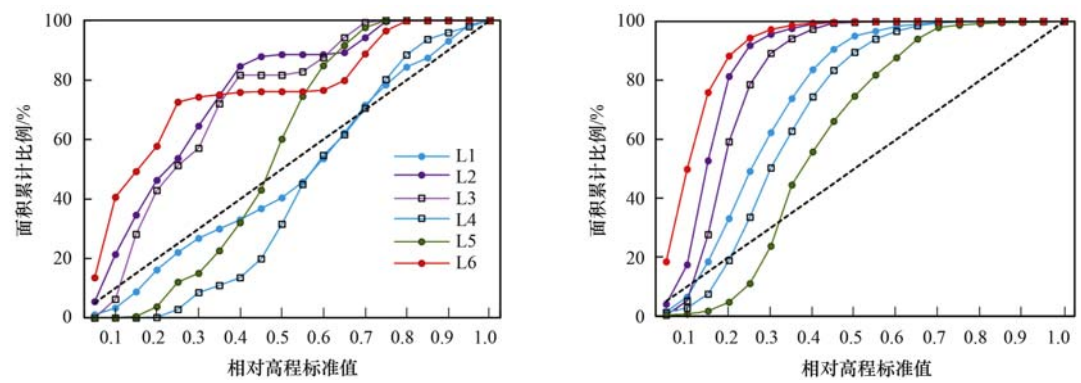


图2 6种地类相对高程、相对坡度的洛伦兹曲线

Fig. 2 Six types Lorenz curve of relative elevation and relative gradient

表1 研究区域6种地类土壤采样点空间分布情况

Table 1 Six types of soil sampling points spatially distribution in the study area

地类	L1	L2	L3	L4	L5	L6
样本数	9	10	8	6	6	4
坡度范围/(°)	12 ~ 23	5 ~ 10	6 ~ 13	18 ~ 25	19 ~ 28	3 ~ 5
平均坡度/(°)	17.36	7.41	9.02	20.11	23.44	4.52
高程范围/m	208 ~ 277	204 ~ 232	210 ~ 276	216 ~ 286	227 ~ 267	196 ~ 219
平均高程/m	238.74	215.75	235.03	239.55	241.45	206.26

2.1.2 不同土地利用类型土壤氮磷养分含量特征

从6种地类土壤氮磷养分含量比较来看(图3),梯田土壤TN平均含量均值显著($P < 0.05$)高于坡耕地,其中:水田梯田TN平均含量 $1.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 最高,密植桑园 $1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 最低;桑树套种坡地土壤TN平均含量高出旱坡地约 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而田坎配置桑树篱的旱地梯田也比一般的旱地梯田略有提升. 不同地类土壤TP平均含量则与TN相反,旱地坡耕地和桑树套种坡耕地土壤TP平均含量均显著高于其它4种地类,其中:桑树套种坡耕地土壤TP平均含量 $1.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 最高,水田梯田平均含量为 $0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 最低. 6种地类土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均含量与TN变化趋势大致相同,但水田梯田土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量水平较TN有所下降,与其它地类也均无显著性差异;配置桑树篱的旱地梯田土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均含量为

$32.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 最高,是密植桑园平均值 $13.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的2.3倍.

从不同地类土壤氮磷含量分布水平和离散程度比较来看:L5土壤TN、TP和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量在上下四分位数之间箱体最短,数据分布较为集中,这主要是因为桑树施肥量少,加之其枝叶地表覆盖度高、根系发达,土壤抗侵蚀力强,不同时空条件下土壤养分含量离散程度较小;与L5相比,L4受坡面坡度、桑树套种的方式差异等因素影响,土壤TN和TP含量呈现较大浮动,极值偏离上下四分位数也较远;氮肥施用量是影响土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的最大外界因素^[11],流域内旱地(L1、L2、L3)单位面积氮肥施用量最高,而紫色土区降雨丰富、土壤质地疏松,氮素在降雨径流和淋溶过程中主要以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 形式流失^[12,13],土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量变化较大.

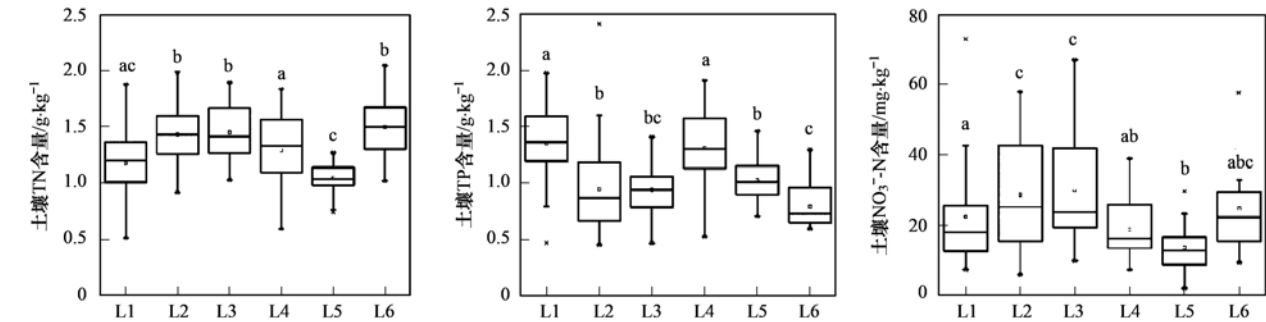


图3 6种土地利用类型土壤TN、TP和NO₃⁻-N含量分布箱式图

Fig. 3 Distribution of TN, TP, and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ contents in soils of different land use types

2.2 浅层地下水氮磷浓度时空变化特征分析

2.2.1 坡面土地利用类型对浅层地下水影响

从 TN 浓度均值比较来看(图 4), W1 为 $17.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 最高, W5 只有 $7.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 最低, W2、W3、W4 平均浓度依次为 15.41 、 14.33 、 $11.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 除 W2 和 W3 外, 其它井 TN 平均浓度差异均显著性差异 ($P < 0.05$); 就其极值变化范围来看, W1 和 W2 极值范围(除离群值之外的最大值和最小值, 下同) 分别为 $5.86 \sim 27.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.59 \sim 31.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值和最小值相差均在 $22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; W5 极值范围为 $3.58 \sim 12.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值和最小值相差只有 $8.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浮动最小. 5 口井的浅层地下水 NO_3^- -N 浓度变化特征与 TN 大致相同, 但 NO_3^- -N 的极值范围和四分位数区间明显缩小, 浅层

地下水中 NO_3^- -N 浓度相对集中. 除 W4 外, 4 口井浅层地下水 TP 平均浓度相差较小, 其极值范围多在 $0 \sim 0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间; W4 受附近农村居民点生活污水影响, TP 平均浓度高达 $0.125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是其它井浅层地下水平均浓度的 2~3 倍.

总体来看, 浅层地下水 TN 和 NO_3^- -N 浓度受下渗坡面土地利用类型影响较为显著, 但其对 TP 浓度影响作用并不明显. 许多学者认为, 土地利用类型显著影响土壤水分迁移, 进而影响地表径流和淋溶氮素流失水平^[14,15]; 而由于磷素与土壤发生反应形成土壤矿物, 加之不同土层对磷素吸持固定, 使其在土壤中难以向下迁移渗漏^[16], 土壤中的磷素流失主要途径为土壤侵蚀和地表径流, 淋溶损失量较小^[17~19].

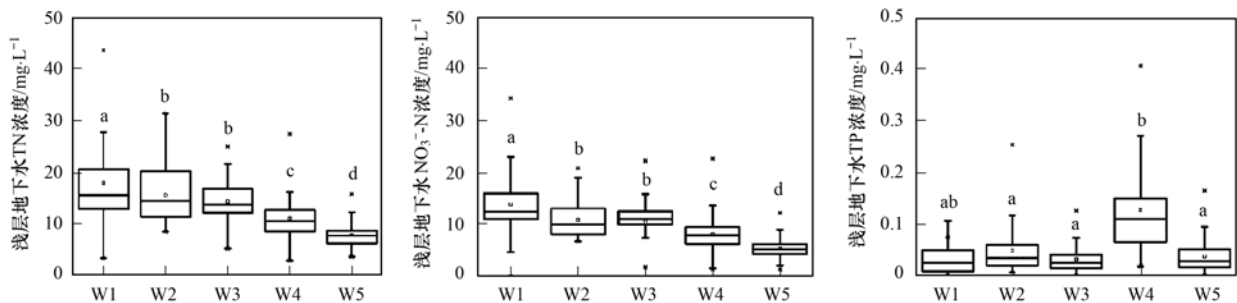


图 4 浅层地下水 TN、 NO_3^- -N 和 TP 浓度分布箱式图

Fig. 4 Box charts of concentration distributions of TN, NO_3^- -N, and TP in shallow groundwater

2.2.2 浅层地下水氮磷浓度时间变化特征

从图 5 可见, 浅层地下水 TN 和 NO_3^- -N 月平均浓度变化规律基本一致: 3 月受降雨量增多和春季作物玉米播种期间(3 月下旬)施少量种肥影响开始升高; 4 月玉米追肥基本结束, TN 平均浓度升至 $15.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为全年各月最高值, 而 NO_3^- -N 月平均浓度则在 5 月份呈现最高值, 此时, 浅层地下水中 NO_3^- -N 对 TN 的贡献率为全年最高 79.83%; 2012~2015 年 6 月和 7 月平均降雨量分别为 182 mm 和 61.2 mm, 与研究区域近 20 年月均降雨量相比, 6 月基本持平而 7 月不到多年同期水平的一半. 受降雨淋洗、作物吸收以及地下水位抬升等影响, 6 月 TN、 NO_3^- -N 平均浓度迅速下降, 且 NO_3^- -N 对 TN 的贡献率降至最低 67.28%; 而由于 7 月降雨量减少, 加之温度升高地面蒸散能力增强, 导致地下水位下降, 浅层地下水中氮磷浓度升高. 8、9 月 TN、 NO_3^- -N 平均浓度变化较小; 10 月受秋季作物榨菜施肥影响, 两者开始逐渐上升, 11 月再次出现新的峰值后, 一直到次年 2 月呈缓慢下降趋势, 此期间, NO_3^- -N 对 TN 的贡献率均在 75% 左右.

浅层地下水 TP 平均浓度 2 月最低, 约 $0.029 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 月受耕作、施肥、降雨因素的共同影响浓度迅速升高; 与 TN、 NO_3^- -N 不同, 3~7 月 TP 浓度一直呈现升高趋势, 这可能是因为磷素的渗漏流失机制与氮素不同, 磷素通过“表土层积累-渗漏-再积累-再渗漏”的方式向更深层次的土壤中淋失^[20], 其淋失速度较氮素滞缓. 6 月研究区域降水量大, 表层土中大量累积的磷素在水分的作用下淋失量增加, 而 7 月地下水水位下降又进一步抬升了 TP 浓度. 之后, TP 浓度开始迅速降低, 11 月呈小幅升高后又开始缓慢下降.

依据研究区域农作物种植制度, 从时间尺度上大致可分为冬季空闲(2~3 月)、春季作物(4~7 月)、夏季空闲(8~9 月)和秋季作物(10 月~次年 1 月)4 个时期. 选取下渗坡面主要为耕作坡面的 W1、W2、W3 这 3 口井, 对比不同时期浅层地下水 TN、TP 和 NO_3^- -N 平均浓度差异.

从图 6 来看, 春、秋两季作物时期 TN 和 NO_3^- -N 平均浓度均高于空闲时期, 春季作物时期最高, 分别为 $17.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是冬季空闲时期

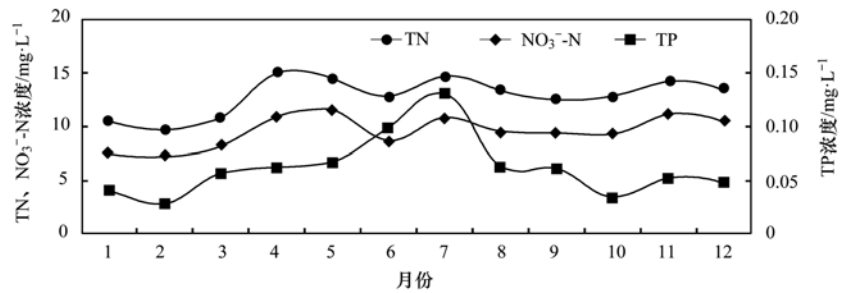


图5 2012~2015年研究区域浅层地下水TN、NO₃⁻-N、TP月平均浓度变化

Fig. 5 Variations of TN, NO₃⁻-N, and TP monthly average concentrations of shallow groundwater from 2012 to 2015

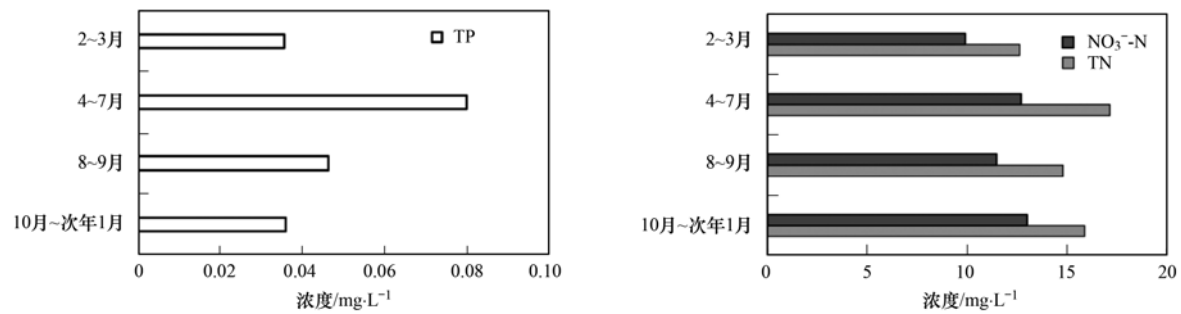


图6 不同作物时期浅层地下水TN、NO₃⁻-N和TP平均浓度

Fig. 6 Average concentrations of TN, NO₃⁻-N, and TP in shallow groundwater during different crop periods

的1.36倍和1.28倍; NO₃⁻-N对TN贡献率秋季作物时期最高,平均为81.82%,春季作物时期最低,平均为74.09%。受施肥和降雨因素的共同影响,春季作物时期浅层地下水TP平均浓度0.079 mg·L⁻¹最高,是夏季空闲时期的1.72倍,是秋季作物时期和冬季空闲时期的2.2倍左右。

2.2.3 浅层地下水TN与NO₃⁻-N浓度关系

利用SPSS 21软件,对所采集浅层地下水样品TN浓度和NO₃⁻-N浓度关系分析发现(图7),两者极显著正相关($P < 0.001$)。氮肥施入土壤后,在土壤微生物等因素的作用下转化为铵态氮(NH₄⁺-N)、

NO₃⁻-N等不同形态供农作物吸收利用^[21],NH₄⁺-N呈球形扩散,被土壤胶体吸附,不易被淋溶流失^[22,23],NO₃⁻-N则主要以质流方式迁移,易受土壤水分运动影响。因此,浅层地下水氮素来源主要为土壤中的NO₃⁻-N,而长期施肥又加剧了土壤NO₃⁻-N积累,进而使NO₃⁻-N成为浅层地下水中氮素最主要存在形态。根据Yan等^[24]的研究显示,2000~2010年我国氮肥当年利用率不到35%,而大量未被农作物吸收利用的氮肥多以NO₃⁻-N的形式存在于土壤中^[25,26],极易伴随降雨或灌溉淋溶进入浅层地下水,给水环境造成越来越严重的污染问题^[27,28]。

从5个井口浅层地下水NO₃⁻-N对TN贡献率比较来看(图8),W1平均贡献率78.51%最高,W5平均贡献率67.82%最低。W5坡面主要以林地为主,

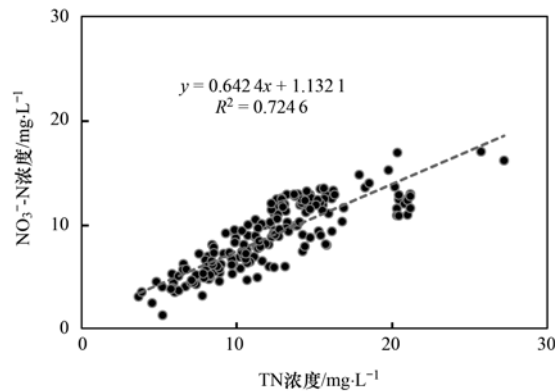


图7 浅层地下水TN浓度与NO₃⁻-N浓度关系

Fig. 7 Relationship between TN concentration and NO₃⁻-N concentration in shallow groundwater

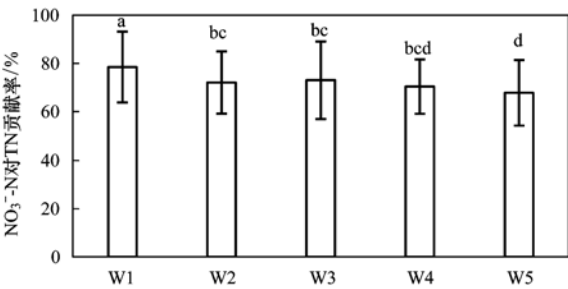


图8 5口井浅层地下水中NO₃⁻-N对TN贡献率

Fig. 8 Contribution rate of NO₃⁻-N to TN in shallow groundwater in five wells

坡面受人为施肥影响相对较小,而林地长期积累和腐殖化过程又会产生大量的有机氮,使林地淋失氮素中有机氮比重升高^[29];与 W2、W3 相比,W1 为等高耕作梯田,降雨径流对土壤侵蚀程度较 W2、W3 弱,土壤 NO_3^- -N 含量高(图 3),水分下渗过程中携带 NO_3^- -N 量高于 W2、W3;W4 坡面既有部分林地构成,同时也受周边居民点影响,其浅层地下水中 NO_3^- -N 对 TN 贡献率也较低,平均为 70.41%。许多针对紫色土区浅层地下水研究也表明,浅层地下水中 NO_3^- -N 对 TN 的贡献率最大,多在 62%~97%之间,且 NO_3^- -N 对 TN 贡献率的差异与坡面的土地利用方式关系密切^[30~32]。

2.3 土壤氮磷含量与浅层地下水氮磷浓度关系

由于 W4 坡面土地利用类型较为复杂,且井口旁边农户日常生活用水未能进行有效收集和处理,会对浅层地下水产生一定影响,而 W5 坡面主要为林地,受人为耕作影响较小。W1、W2、W3 这 3 个坡面土地利用类型单一,且均为耕地,

因此,本研究利用 2014~2015 年期间所采集的这 3 个坡面土壤样品和浅层地下水样品,分析坡面土壤氮磷养分平均含量与浅层地下水氮磷浓度关系。

利用 SPSS 21 软件对下渗坡面土壤与浅层地下水 TN、 NO_3^- -N 相关性分析发现,下渗坡面土壤 TN 含量与浅层地下水 TN 浓度存在极显著正相关关系($r=0.649, P<0.01, N=27$),土壤 NO_3^- -N 含量也与浅层地下水 NO_3^- -N 浓度呈极显著正相关关系($r=0.835, P<0.001, N=27$)。相比而言, NO_3^- -N 相关系数 r 值更高,这主要是因为淋溶氮的形态主要以 NO_3^- -N 为主,长期过量施肥造成土壤中的 NO_3^- -N 大量累积,易伴随降雨淋失^[33,34],而紫色土土层浅、入渗能力强,土壤中的 NO_3^- -N 含量与浅层地下水 NO_3^- -N 浓度关系更为密切。通过回归分析,土壤 TN 含量与浅层地下水 TN 浓度更符合指数关系,而土壤 NO_3^- -N 含量与浅层地下水 NO_3^- -N 浓度则更趋近于对数关系(图 9)。

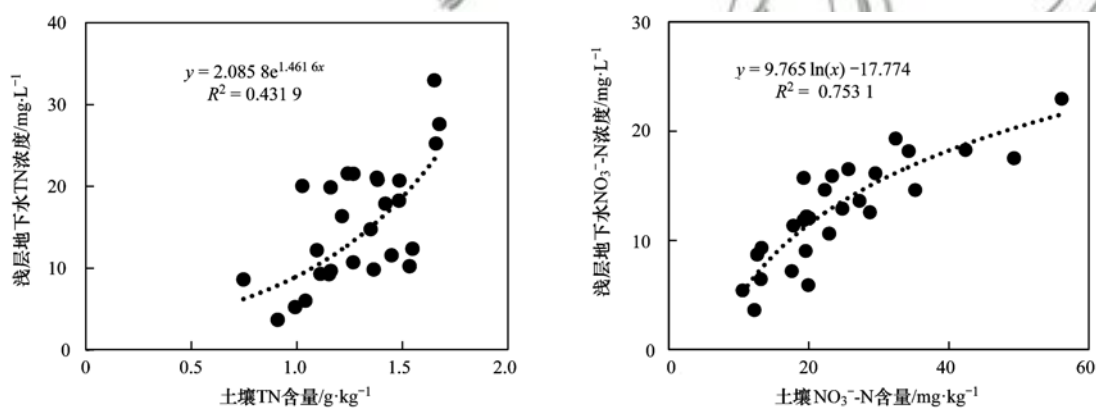


图 9 土壤 TN、 NO_3^- -N 含量与浅层地下水 TN、 NO_3^- -N 浓度的关系

Fig. 9 Relationship between TN and NO_3^- -N contents in soil and TN and NO_3^- -N concentrations in shallow groundwater

土壤 TP 含量与浅层地下水 TP 浓度不具有显著相关性($r=0.108, P>0.05, N=26$),这可能是由于土壤吸持固定磷素的容量很大,磷素在土壤很难迁移,淋溶损失量较少。由图 4 也可以看出,所选 4 口井浅层地下水 TP 浓度差异并不显著。

2.4 土壤氮磷含量与坡面地表径流氮磷浓度关系

利用 SPSS 21 软件分析表明,坡面土壤 TN、 NO_3^- -N 平均含量与降雨径流水样中 TN、 NO_3^- -N 浓度均无显著相关性($P>0.05$)。这可能是因为降雨径流过程中 TN、 NO_3^- -N 流失浓度除了受土壤自身含量影响外,更易受降雨类型、地表覆盖、土地利用、施肥等外部因素影响^[35~37]。

坡面土壤 TP 平均含量与降雨地表径流 TP 浓

度也不具有显著相关性(图 10),但当坡面地表径流 TP 浓度大于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,两者呈显著线性相关($r=0.496, P<0.05, N=47$);当坡面地表径流水样 TP 浓度 $>0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,两者呈极显著线性相关($r=0.815, P<0.01, N=31$)。从所采集的坡面地表径流样品 TP 形态构成分析发现,不同地类地表径流中溶解态磷平均含量随着 TP 流失浓度增加而减少。当坡面地表径流 TP 流失浓度在 $0 \sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,不同地类溶解态磷的平均含量分别占 TP 的 58%~69%;当 TP 流失浓度大于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,地表径流中的 TP 则以颗粒态磷为主,并随着 TP 流失浓度的升高颗粒态磷的比重逐渐增加。一般认为地表径流的溶解和搬运是土壤磷流失的主要途

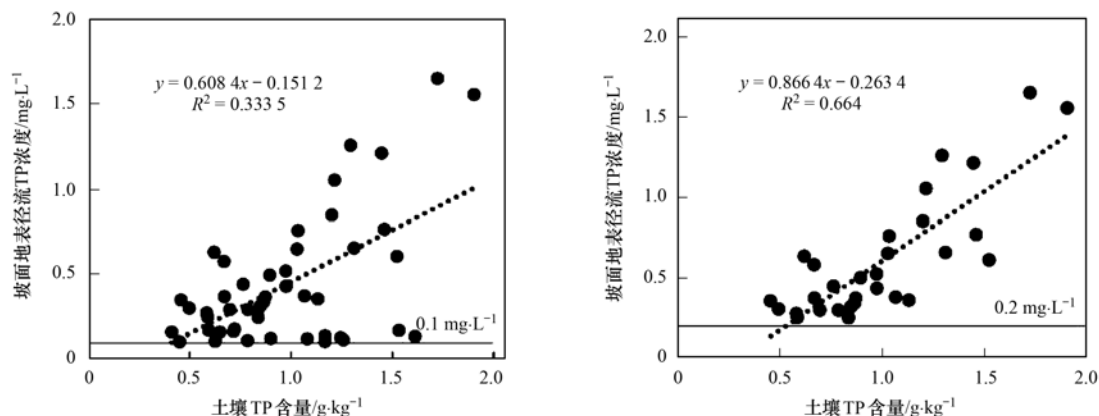


图 10 土壤 TP 含量与坡面地表径流 TP 浓度的关系

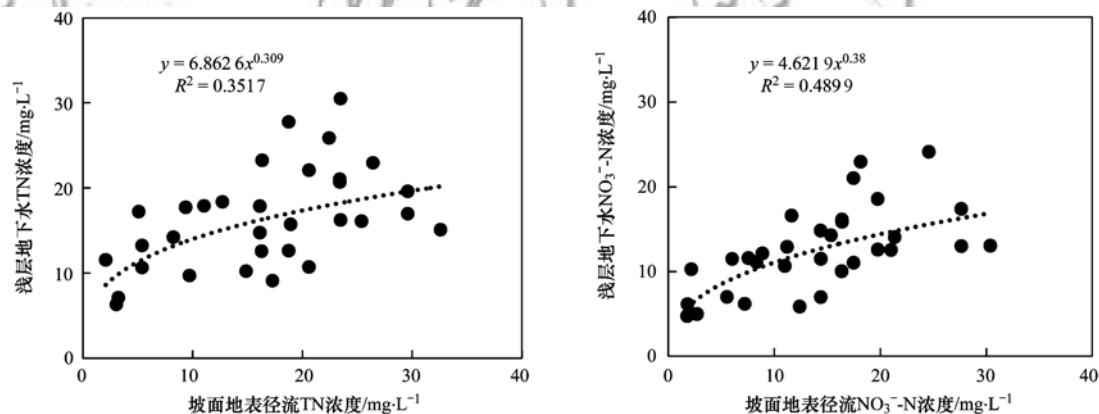
Fig. 10 Relationship between soil TP content and TP concentration in surface runoff

径^[38],而地表径流中的磷以颗粒态流失为主^[39],雨强较大时,雨滴冲击土壤表层,使土壤中颗粒态磷析出并随地表径流流失.一些研究也证实,地表径流 TP 浓度主要是受表层土磷素含量影响,在一定条件下两者具有显著正相关关系^[40,41].

2.5 坡面地表径流与浅层地下水氮磷浓度关系

从坡面地表径流与浅层地下水 TN、NO₃⁻-N、TP 浓度相关性分析结果来看(图 11):坡面地表径流与浅层地下水 TN 浓度呈显著正相关($r = 0.409$, $P < 0.05$, $N = 32$),而 NO₃⁻-N 呈极显著正相关($r = 0.583$, $P < 0.01$, $N = 32$);坡面地表径流和浅层地下水 TP 浓度无显著相关性.降雨是地表径流和下

渗水分的主要来源,土壤在雨滴打击以及径流冲刷作用下形成一定厚度的扰动层^[42],扰动层内雨水与土壤水完全混合,被解析、浸提的养分和颗粒吸附的养分一部分随地表径流迁移,另一部分通过下渗进入浅层地下水.虽然降雨、地表覆盖等外部因素会对地表径流氮素浓度产生一定的影响,但其仍与土壤水和入渗水呈一定比例关系^[43].浅层地下水和坡面地表径流中的氮素均以 NO₃⁻-N 形态为主,两者 NO₃⁻-N 的相关性较 TN 更显著.土壤中的磷素主要通过地表径流流失,淋溶损失量小,因此,降雨径流与浅层地下水中 TP 浓度无显著相关性.

图 11 坡面地表径流与浅层地下水 TN、NO₃⁻-N 浓度的关系Fig. 11 Relationships between TN and NO₃⁻-N concentrations in surface runoff and shallow groundwater

3 结论

(1)从不同土地利用类型土壤氮磷含量比较来看,水田梯田 TN 平均含量 1.49 g·kg⁻¹最高,TP 平均含量 0.76 g·kg⁻¹最低;旱地梯田 TN、NO₃⁻-N 平均含量显著高于旱地坡耕地,而 TP 平均含量却显著低于旱地坡耕地;旱地梯田 NO₃⁻-N 离散程度最

大,密植桑园土壤 TN、NO₃⁻-N 平均含量最低,离散程度最小.

(2)坡面土地利用类型对浅层地下水 TN、NO₃⁻-N 浓度影响显著,旱地梯田浅层地下水最高,分别为 17.91 mg·L⁻¹、14.06 mg·L⁻¹,但对 TP 浓度影响较小;流域浅层地下水 TN 浓度与 NO₃⁻-N 浓度呈极显著正相关,不同土地类型坡面浅层地下水

NO_3^- -N对 TN 平均贡献率在 67.82% ~ 78.51% 之间,旱地梯田最高,林地为主的坡面最低;春、秋两季作物时期流域内浅层地下水 TN、 NO_3^- -N平均浓度略高于夏、冬两季空闲时期,而 TP 平均浓度春季作物时期高达 $0.079 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是其它 3 个时期的 2 倍左右。

(3)坡面土壤氮磷含量对浅层地下水和地表径流氮磷浓度影响作用不一。坡面土壤 TN、 NO_3^- -N平均含量分别与浅层地下水 TN、 NO_3^- -N浓度显著正相关,但与坡面地表径流 TN、 NO_3^- -N浓度无显著相关性;而坡面土壤 TP 平均含量与浅层地下水 TP 浓度无显著相关性,但与地表径流 TP 浓度在一定条件下(当坡面地表径流 TP 浓度 $> 0.1 \text{ mg}$ 时)显著正相关。

(4)坡面地表径流与浅层地下水 TN 浓度显著正相关, NO_3^- -N浓度极显著正相关,但 TP 浓度无显著相关性。

参考文献:

- [1] 邵明安, 张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23(2): 7-12.
Shao M A, Zhang X C. The interacting models and mechanisms of soil nutrient with rainfall and runoff[J]. World Sci-Tech R & D, 2001, 23(2): 7-12.
- [2] Daverede I C, Kravchenko A N, Hoefl R G, et al. Phosphorus runoff: effect of tillage and soil phosphorus levels[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(4): 1436-1444.
- [3] 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.
- [4] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1707-1716.
Chen C L, Gao M, Ni J P, et al. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1707-1716.
- [5] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 565-575.
Wu J, Guo X S, Lu J W, et al. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 565-575.
- [6] 赵业婷. 基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] 张国平, 郭澎涛, 王正银, 等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 113-120.
- [8] Zhang G P, Guo P T, Wang Z Y, et al. Prediction of spatial distribution of hilly farmland with purple soil nutrient[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 113-120.
- [9] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2940-2946.
Wu D, Huang Z L, Xiao W F, et al. Land use structure change and its control effect of nitrogen output in a small watershed of three gorges reservoir area: a case study of Lanlingxi watershed[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2940-2946.
- [10] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 降雨-径流-土壤混合层深度研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 283-290.
Zhang Y L, Li H E, Zhang X C, et al. Review on the mixing zone depth of rainfall-runoff-soil interaction[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 283-290.
- [11] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 962-970.
Wang T, Zhu B, Luo Z X, et al. Nitrate loss from sloping cropland of purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 962-970.
- [12] 黄绍敏, 皇甫湘荣, 宝德俊, 等. 土壤中硝态氮含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(5): 351-354.
Huang S M, Huangpu X R, Bao D J, et al. Factors affecting content of nitrate-nitrogen in soil[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(5): 351-354.
- [13] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 525-533.
Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 525-533.
- [14] 汪涛. 紫色土坡地硝态氮淋失过程研究[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2007.
- [15] Zhu J G, Han Y, Liu G, et al. Nitrogen in percolation water in paddy fields with a rice/wheat rotation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(1): 75-82.
- [16] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 种植玉米与休闲对土壤水分和矿质态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1179-1185.
Wang X N, Wang Z H, Li S X. Influence of planting maize and fallowing on soil moisture and mineral nitrogen[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(6): 1179-1185.
- [17] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 409-415.
Chu J, Xue J H, Jin M J, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non point source pollution[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(4): 409-415.
- [18] 陈欣, 范兴海, 李东. 丘陵坡地地表径流中磷的形态及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2000, 20(3): 284-288.
Chen X, Fan X H, Li D. Phosphorus forms in surface runoff and its affecting factors in hilly upland[J]. China Environmental Science, 2000, 20(3): 284-288.
- [19] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 838-

- 844.
- Liu F, Huang C Y, He T B, *et al.* The environmental impact of phosphorus on water by a long-term applying fertilizer P in the upland fields of yellow soil areas and its risks evaluation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(6): 838-844.
- [19] 晏维金, 章申, 唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(3): 332-337.
- Yan W J, Zhang S, Tang Y J. Sediment enrichment mechanisms of phosphorus under simulated rainfall conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(3): 332-337.
- [20] 宋科. 太湖水网地区农田土壤氮磷累积对氮磷养分渗漏流失的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [21] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(12): 83-89.
- [22] Ellis S, Yamulki S, Dixon E, *et al.* Denitrification and N₂O emissions from a UK pasture soil following the early spring application of cattle slurry and mineral fertiliser [J]. *Plant and Soil*, 1998, **202**(1): 15-25.
- [23] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. 1-73.
- [24] Yan X Y, Ti C P, Vitousek P, *et al.* Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(9): 095002.
- [25] 张福锁. 我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. 37.
- [26] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(4): 808-814.
- Guo S L, Gao H Y, Dang T H. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, **15**(4): 808-814.
- [27] 刘晓晨, 汪仁, 孙占祥. 辽宁省三种类型作物产区饮用水硝酸盐氮污染状况研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, **27**(5): 9-13.
- Liu X C, Wang R, Sun Z X. Nitrate contamination of drinking-water in three types of crop-producing areas in Liaoning province [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, **27**(5): 9-13.
- [28] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1996, **59**(3): 223-231.
- [29] Hedin L O, Armesto J J, Johnson A H. Patterns of nutrient loss from unpolluted, old-growth temperate forests: evaluation of biogeochemical theory [J]. *Ecology*, 1995, **76**(2): 493-509.
- [30] 孙益军. 三峡库区紫色土氮磷淋溶试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [31] 袁玲, 王容萍, 黄建国. 三峡库区典型农耕地的氮素淋溶与评价[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(4): 674-683.
- Yuan L, Wang R P, Huang J G. Nitrogen leaching from farmlands typical of the Three-Gorges Reservoir region and its evaluation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(4): 674-683.
- [32] 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.
- [33] 吴希媛. 红壤坡地菜园地表径流中氮磷流失模拟试验及建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [34] Yin F, Fu B J, Mao R Z. Effects of nitrogen fertilizer application rates on nitrate nitrogen distribution in saline soil in the Hai River Basin, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, **7**(3): 136-142.
- [35] Shigaki F, Sharpley A, Prochnow L I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **373**(1): 334-343.
- [36] 王超, 赵培, 高美荣. 紫色土丘陵区典型生态-水文单元径流与氮磷输移特征[J]. *水利学报*, 2013, **44**(6): 748-755.
- Wang C, Zhao P, Gao M R. Characteristics of nitrogen and phosphorus transportation through runoff in a typical ecological-hydrological unit of hilly area of purple soil [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(6): 748-755.
- [37] Chen C L, Gao M, Xie D T, *et al.* Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small agricultural catchment in the Three Gorges Region [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**: 257.
- [38] Silva R G, Holub S M, Jorgensen E E, *et al.* Indicators of nitrate leaching loss under different land use of clayey and sandy soils in southeastern Oklahoma [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **109**(3-4): 346-359.
- [39] Biddocci M, Ferraris S, Opsi F, *et al.* Long-term monitoring of soil management effects on runoff and soil erosion in sloping vineyards in Alto Monferrato (North-West Italy) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 176-189.
- [40] Olness A, Smith S J, Rhoades E D, *et al.* Nutrient and sediment discharge from agricultural watersheds in Oklahoma [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1975, **4**(3): 331-336.
- [41] Daniel T C, Sharpley A N, Edwards D R, *et al.* Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, **49**(2): 30-38.
- [42] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [43] Snyder J K, Woolhiser D A. Effects of infiltration on chemical transport into overland flow [J]. *Transactions of the ASAE*, 1985, **28**(5): 1450-1457.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)