

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N₂O 间接排放特征 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 NO₃⁻ 浓度、释放通量与排放系数 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析, 以会仙湿地为例 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ¹⁸O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因素分析 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 (5740)
《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

流域氮素主要输出途径及变化特征

李文超¹, 雷秋良¹, 翟丽梅^{1*}, 刘宏斌¹, 胡万里², 刘申¹, 任天志³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 2. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 3. 中国农业科学院, 北京 100081)

摘要: 流域农业面源输出氮素是湖泊流域水体中氮的主要来源之一, 对水环境安全造成了极大威胁. 不同流域间地形、水文、植被覆盖等因子的差异及气象条件的变化, 造成氮的输出途径具有流域异质性及时间变化特征. 本研究以高原湖泊典型流域——凤羽河流域为例, 基于 2011-06 ~ 2013-05 期间径流量、水质高频监测数据, 应用基流分割的方法, 通过分析流域产流与氮素输出途径的季节性变化, 探讨了流域氮素输出的主要途径及变化特征. 结果表明, 基流是高原湖泊流域水量输出的主要形式和总氮输出的主要途径; 基流输出水量及总氮负荷分别占流域总输出水量的 80.0% 和流域总氮负荷的 71.1%; 降雨显著增加了流域水量和总氮负荷的输出量, 同时改变了总氮的输出途径; 降雨导致地表径流量增加, 进而使流域输出水量和总氮输出负荷中地表径流途径的比重升高; 当地表径流占流域输出水量的比重约达 40% 以上时, 流域总氮输出的主要途径由基流转变为地表径流; 监测周期内, 地表径流输出的总氮负荷占流域总输出负荷的比重最高达 65.6%.

关键词: 面源污染; 输出途径; 基流分割; 氮素; 变化特征

中图分类号: X143; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5375-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201805008

Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China

LI Wen-chao¹, LEI Qiu-liang¹, ZHAI Li-mei^{1*}, LIU Hong-bin¹, HU Wan-li², LIU Shen¹, REN Tian-zhi³

(1. Key Laboratory of Nonpoint Pollution Control, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Nonpoint source pollution has become a major factor influencing the water quality. Identifying the pathway of nitrogen (N) transport from the source to the watershed mouth is a critical step in taking measures to control this pollution. However, it is difficult to identify the pathway of N transport because the transport pathway varies among different watersheds depending on the difference in the terrain, hydrology, and land cover etc and changes over time. Additionally, there is little knowledge about the major pathway of N transport through agricultural watersheds in the Yunnan Plateau lake area. The pathways of N export and their temporal variations over time were investigated in this study based on a typical agriculture-dominated watershed in a plateau lake area, Yunnan Province, and two-year monitoring data (June 2011-May 2013) in combination with a base flow separation program. The results show that the base flow accounts for most of the streamflow discharge (80.0%) and N export (71.1%). The proportion of the stream flow discharge via storm flow increases significantly with increasing rainfall. Therefore, the percentage of total N (TN) export via storm flow increases with increasing storm flow, which is closely related to rainfall. The major pathway of N export shifts toward storm flow when the storm flow proportion of the stream flow discharge increases up to 40%. During the monitoring period, the proportion of the TN export via storm flow increases up to 65.6% in the rainy season. This study provides important information for the improvement of the management of nonpoint source pollution at the watershed scale.

Key words: nonpoint source pollution; transport pathway; base flow separation; nitrogen; change patterns

农业面源输出的氮素是湖泊流域地表水体中氮的主要来源之一^[1]. 氮素向水体的流失途径一般包括径流和淋溶^[2~5], 其中径流是氮素进入地表水体的主要途径^[1,6]. 流域氮素的径流输出途径一般又分为地表径流与基流^[7]. 识别流域氮素主要输出途径及变化特征, 对于加强农业面源污染针对性防控具有促进作用.

流域间地形、水文、植被覆盖、降雨、生产方式等因素的差异, 导致不同流域氮素输出主要途径存在差异. Owens 等^[8,9]的研究得出, 50% ~ 75% 的

总氮和 41% ~ 69% 的硝态氮负荷来自地表径流; McKee 等^[10]的研究发现, 地表径流贡献了 96% 的总氮输出负荷. 在其他研究结果中, 基流却是流域氮素输出的主要途径. 例如, 基流分别贡献了美国

收稿日期: 2018-05-01; 修订日期: 2018-05-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303089); 中英牛顿基金项目(BB/N013484/1); 国家自然科学基金项目(31572208); 国家留学基金创新人才培养项目(2015-7169)

作者简介: 李文超(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域养分管理及农业面源污染模拟, E-mail: dachao279@126.com

* 通信作者, E-mail: zhailimei@caas.cn

Raccoon River 流域和 WE-38 流域 66.7% 和 56.0% 的硝态氮输出负荷^[11,12]. 对于以基流为主要输出途径的流域, 硝态氮的贡献比例一般较高^[13,14]. 此外, 同一流域内, 不同输出途径的占比, 随降雨、生产活动等因素的变动呈现出一定的季节性变化^[15]. Zhu 等^[13]的研究发现, 由于作物利用, 基流对种植季流域氮素输出的贡献低于非种植季. Wang 等^[14]的研究指出, 种植季流域氮素输出的延迟, 造成了非种植季基流中氮素输出的增加. Janke 等^[16]的研究发现, 在美国 Phalen Creek 流域, 夏季(5~10月)基流对总氮输出负荷的贡献最大(68%). 氮素输出途径在不同流域间的差异及在同一流域内随时间的变化特征, 增加了流域氮素输出途径识别的难度.

基流分割作为研究水文变化特征的成熟方法, 得到了国内外学者的广泛应用^[17~21]. 该方法依据河流流量的波动特征, 将总径流分割为基流和地表径流, 为研究流域氮素的输出途径奠定了基础. 基于水文基流分割方法, 以高频率的水质监测数据为基础, 通过引入水质分割^[11], 可以为流域氮素输出途径的识别提供一种可供借鉴的方法.

受区域气候、农业生产方式及社会经济发展等综合因素的影响, 农业面源氮素是云南第二大高原湖泊(洱海)水质恶化、富营养化程度加重的主要原因^[22~24]. 本文选取洱海典型流域——凤羽河流域为研究区, 综合运用水文、水质基流分割方法, 基于 2011-06~2013-05 的日尺度监测数据, 分析了流域氮素的输出途径及变化特征, 以期为加强农业面源污染防治提供有力支撑, 并为其他流域开展氮素主要输出途径及其变化特征的识别研究提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

凤羽河流域(99°57'0.3"E, 26°4'6.7"N)位于云南省大理州洱源县城西南, 属高原湖泊洱海流域西北部的一个典型农业子流域(图 1). 地形为山地丘陵, 最高海拔 3 615 m, 最低海拔 2 082 m, 平均海拔 2 634 m, 流域面积 219 km². 气候属亚热带高原季风气候, 年平均温度 13.9℃; 多年年平均降雨量 745.0 mm, 雨旱两季分明. 凤羽河属澜沧江水系, 由流域内的多条山涧水溪及泉流汇集而成, 水资源十分丰富, 多年年均水流量达 1 亿 m³, 是洱海的重要水源之一. 土地利用方式主要为荒草地(45.9%)、林地(29.6%)、水田(11.9%)和旱地

(8.9%)^[25]. 流域内以种植业和畜禽养殖业为主, 主要种植模式为水旱轮作和旱作, 种植作物分别为水稻-蚕豆/油菜, 玉米-蚕豆/油菜; 畜禽养殖分布于农村生活区, 养殖方式主要为农户分散养殖, 畜禽种类有奶牛、猪、羊及鸡等.

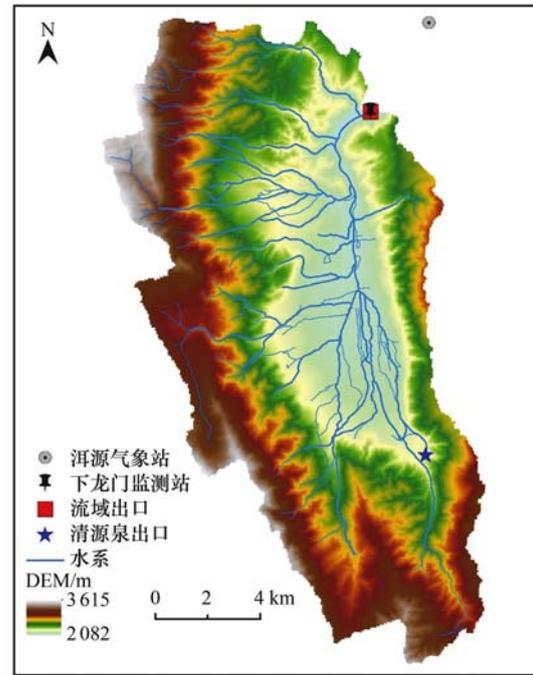


图 1 凤羽河流域位置示意

Fig. 1 Location of the Fengyu River watershed

1.2 研究方法 with 数据

1.2.1 水文监测

为获取流域水量输出数据, 本研究选取流域出口作为水文监测点(99°57'0.3"E, 26°4'6.7"N), 于 2011-06~2013-05 期间开展了流量、降雨监测; 监测点位于凤羽镇下龙门村(图 1). 流量监测选用两种水文监测方法如下.

(1)2011-06~2012-05 期间, 采用人工监测, 监测项目包括流速、河宽、水位等; 监测设备主要包括手持涡轮流速仪或电波流速仪、卷尺等, 其中手持涡轮流速仪或电波流速仪用于断面流速测量, 卷尺用于测量水深和河宽; 监测分为日常监测和暴雨监测, 日常监测频率为 1 次·d⁻¹, 暴雨监测指有降雨发生时的监测, 主要时段为 6~10 月, 频率 1 次·h⁻¹; 瞬时流量由流速、河宽与水位相乘得到.

(2)2012-06~2013-05 期间, 采用自动监测. 选用美国 Waterlog H-3553 气泡水位计自动连续监测河流水位; 流量数据根据河流处于不同水位时气泡水位计记录水位与同时刻人工监测的流量换算关系计算得到. 水位-流量换算关系如下:

$$Q = (4.09H - 81.54)^{2.20}$$

式中, H 为水位 (m), Q 为与 H 对应的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

此外, 采用电波流速仪人工监测方法, 对流域主要泉水(清源泉)出口断面进行了流量监测, 监测频率为 $4 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别为春、夏、秋、冬各 1 次.

降雨监测: ① 2011-6 ~ 2012-5 期间采用洱源气象站(图 1)数据; ② 2012-6 ~ 2013-5 期间采用翻斗式雨量计自动测量(雨量站位置与流量监测点相同).

1.2.2 水质监测方法

水质监测通过取样、水质分析进行. 取样点与流量监测点相同. 视降雨水位变化, 取样分为降雨过程采样和常规采样.

(1) 降雨过程采样 从降雨开始到水位回复到雨前状态, 选用 ISO3700 便携式自动采样仪采集河流水样. 降雨开始至水位达到峰值过程, 采样频率为 $1 \text{次} \cdot \text{h}^{-1}$; 水位开始下降到回落至雨前状态, 采样频率为 $1 \text{次} \cdot (2 \text{h})^{-1}$; 采样量每次 1 000 mL.

(2) 常规采样 降雨过程外, 其他时段进行 $1 \text{次} \cdot \text{d}^{-1}$ 、每次 1 000 mL 的人工采样.

水样采集后 4°C 下低温冷藏, 1 周以内进行实验室测试. 测试指标包括总氮和溶解态总氮.

1.2.3 水文水质基流分割

(1) 水量分割

国际上普遍将总径流划分为地表径流和基流, 其中, 地表径流为地表表层产生的直接径流, 基流为除地表径流外剩余的部分. 其中, 基流包括地下水回归流和壤中流(或侧向流). 本文按照这种划分概念选用基流分割程序(base flow index, BFI)^[26,27], 对流域 2011 ~ 2012 水文年和 2012 ~

2013 水文年总径流进行了分割.

(2) 水质分割

参照 Schilling 等^[11]的方法, 将总径流中基流流量比例大于 90% 时的水质监测数据视为基流中氮的浓度. 某月基流中氮的流量平均浓度根据以下公式计算:

$$c_m = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{base-}i} \times c_{\text{base-}i}}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{base-}i}}$$

式中, c_m 为某月基流中氮的流量平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $Q_{\text{base-}i}$ 为某月内第 i 次基流流量比例大于 90% 时基流的流量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), $c_{\text{base-}i}$ 为某月内第 i 次基流流量比例大于 90% 时基流中氮的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), n 表示该月内基流流量比例大于 90% 的次数.

某月基流氮的输出负荷为基流分割出的该月基流流量与该月基流中氮流量平均浓度的乘积. 某月总径流氮的输出负荷为各采样时段氮的浓度与对应总径流量乘积的和. 某月地表径流氮的输出负荷为该月总径流与基流氮输出负荷的差. 某月地表径流中氮的流量平均浓度为该月地表径流氮的输出负荷与该月地表径流流量的比值.

2 结果与分析

2.1 降雨与产流的周年变化特征

本研究流域 2011 ~ 2012 水文年降雨量与多年平均降水量持平 (745.0 mm), 为平水年; 2012 ~ 2013 水文年降雨量较多年平均降雨量高出 46.0%, 为丰水年, 径流深分别为 241.2 mm 和 419.2 mm, 径流系数分别为 31.7% 和 40.6% (表 1).

表 1 凤羽河流域降雨-径流(总径流、地表径流和基流)总体特征¹⁾

Table 1 Rainfall, total stream flow, storm flow, and base flow in the Fengyu River watershed

时间(年-月)	降雨量 /mm	总径流 /mm	地表径流		基流	
			径流深/mm	占比/%	径流深/mm	占比/%
2011-06 ~ 2012-05	761.4	241.2	39.9	16.5	201.3	83.5
2012-06 ~ 2013-05	1 031.6	419.2	92.2	22.0	327.0	78.0
总和	1 793.0	660.4	132.1	20.0	528.3	80.0

1) 总径流 = 地表径流 + 基流

降雨、径流呈现出较明显的季节性变化, 6 ~ 9 月为雨季, 雨量占全年总降雨量的 85.5%, 其中, 仅 7 ~ 9 月, 占到全年降雨量的 75.4%, 个别月份, 雨量最高可达 360.5 mm, 占全年降雨量的 34.9% [图 2 (a)]. 与降雨分布特征相似, 径流量峰值与降雨峰

值同期, 基流虽然随降雨呈现波动, 但峰值出现时间较降雨时期延后 1 个月左右; 在最大降雨量条件下, 总径流和地表径流最大值分别为 83.9 mm 和 35.1 mm, 基流达 49.3 mm. 非雨季(6 ~ 9 月以外的其他月份), 降雨量极小, 地表径流几乎为零, 基流是该时

期流域水量输出的主要形式[图2(a)]. 总体来看, 降雨量与地表径流、基流及总径流均呈显著正相关

关系, 降雨量的增加显著($P < 0.05$)增加了流域内地表径流和基流的输出水量[图2(b)].

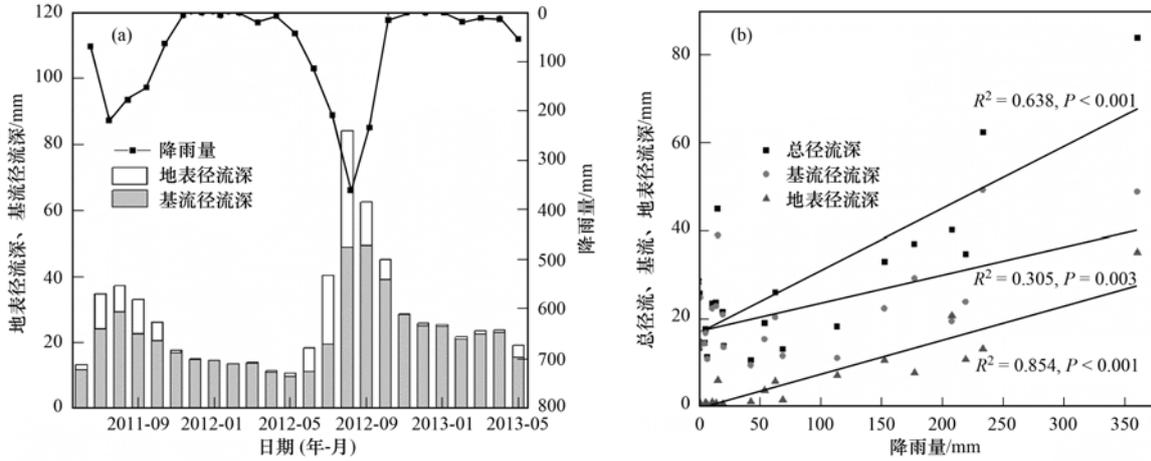


图2 降雨量、地表径流深和基流深随时间的变化及总径流、基流、地表径流深与降雨量的关系

Fig. 2 Changes of rainfall, base flow, and storm flow over time and the relationship between total flow, base flow, storm flow, and rainfall

2.2 流域地表径流与基流的比例变化特征

监测周期内, 总基流量占流域总径流流量 80.0%, 地表径流量仅占 20.0% (表 1). 雨季(6~9月)地表径流在流域水量输出中所占比重随降雨量增加而增加 [图3(b)], 地表径流所占比例为

12.0%~51.6%, 基流比例为 48.4%~88.0% [图3(a)]. 非雨季(6~9月以外的其他月份), 水量输出以基流为主. 该时期, 基流水量占流域总输出水量的 78.1%~99.9%, 地表径流仅占 0.1%~21.9% [图3(a)].

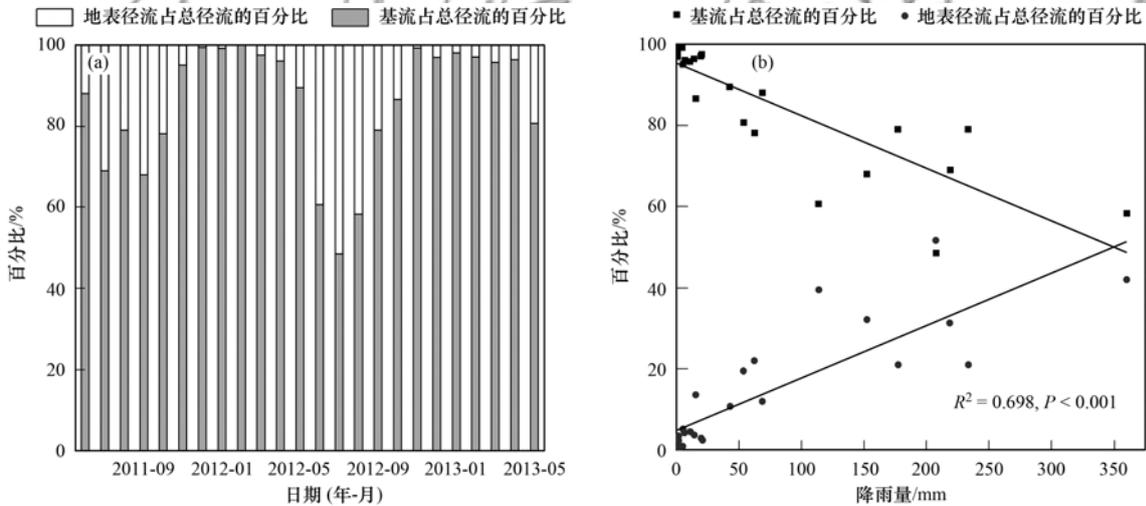


图3 流域输出水量中基流与地表径流比例变化及流域输出水量中地表径流、基流的比例与降雨量的关系

Fig. 3 Ratio of storm flow and base flow discharge to total flow discharge varies over time and the relationship between the ratio of storm flow/base flow discharge to total flow discharge and rainfall

2.3 流域氮输出特征

监测周期内, 流域单位面积总氮输出量为 709.0 kg·km⁻² (表 2), 基流输出的总氮负荷占流域总输出负荷的 71.1%, 为流域总氮输出的主要途径, 且平水年基流对总氮输出的贡献略高于丰水年 (表 2). 总氮输出的形态以溶解态为主, 比例达 75.9%.

[图4(b)], 单位面积流域总氮输出负荷最高达 119.3 kg·km⁻² [图4(a)]. 非雨季, 基流是流域总氮输出的主要途径, 输出的总氮负荷占流域总输出负荷的 71.8%~99.9% [图4(a)]. 雨季, 地表径流在流域总氮输出中的比重明显升高. 随着地表径流量增加, 地表径流对流域总氮输出负荷的贡献显著 ($P < 0.05$) 增加, 贡献比例最高达 65.6% (2012-07) [图4(b)].

雨季, 随着地表径流量的增加, 流域总氮输出负荷、地表径流及基流总氮输出负荷均呈增加趋势

表 2 凤羽河流域总氮输出特征¹⁾
Table 2 Total nitrogen export from Fengyu River watershed

时间(年-月)	总氮输出				
	输出总量/t	单位面积输出量 /kg·km ⁻²	浓度/mg·L ⁻¹	基流输出比例/%	溶解态比例/%
2011-6 ~ 2012-5	41.1	187.6	0.78 (Ⅲ)	80.6	77.8
2012-6 ~ 2013-5	114.2	521.4	1.24 (Ⅳ)	67.7	75.3
总和	155.3	709.0	1.07 (Ⅳ)	71.1	75.9

1) Ⅲ与Ⅳ分别代表地表水环境质量标准Ⅲ和Ⅳ类

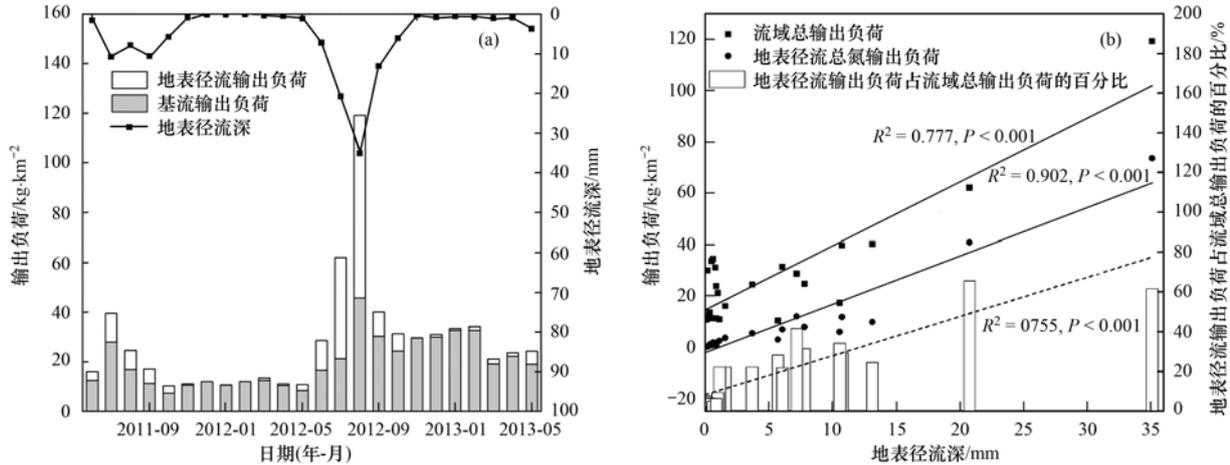


图 4 地表径流总氮输出负荷、基流总氮输出负荷和地表径流深的变化特征及输出负荷、地表径流占比与地表径流的关系

Fig. 4 Changes of the nitrogen export via base flow and storm flow, storm flow discharge over time, and the relationship between the total nitrogen export from different pathways, ratio of storm flow flux to total flux, and storm flow

地表径流对流域总氮输出的贡献与其在总径流流量中比重显著相关 ($P < 0.001$)，随着地表径流在流域总径流流量中的占比增加，其对流域总氮输出的贡献逐渐增大 [图 5(b)]。当地表径流在流域总径流流量中的占比达到 40.0% 以上时，地表径流

对流域总氮输出的贡献高于 50% [图 5(b)]，成为流域总氮输出的主要途径。

当地表径流深较低时，地表径流中总氮浓度较高；随着地表径流深的增加，地表径流中总氮的浓度有所降低，在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上下 (地表水环

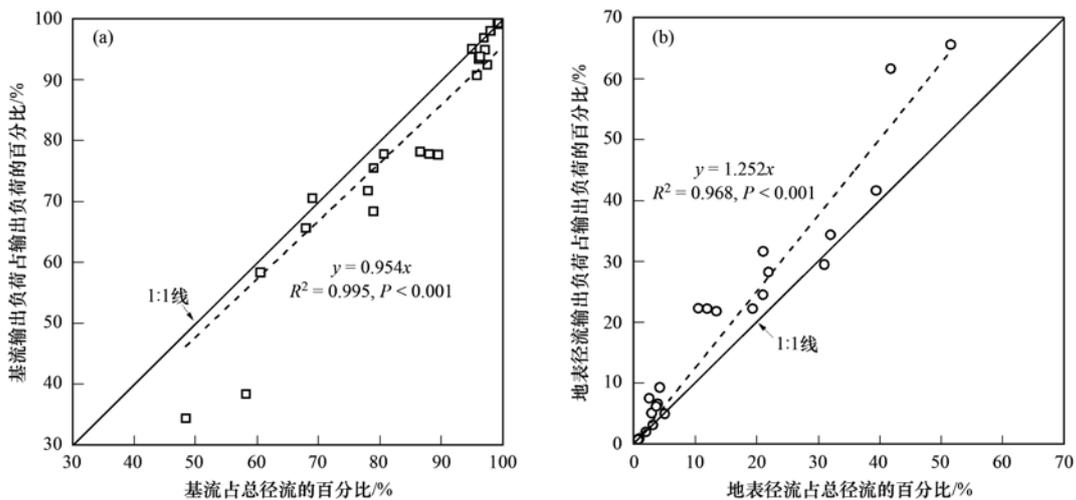


图 5 基流、地表径流在流域总氮输出负荷中的占比与其在流域总输出水量中的占比关系

Fig. 5 Comparison of the ratio of total nitrogen export via base flow to total nitrogen export and the ratio of base flow discharge to total flow discharge and comparison of the ratio of total nitrogen export via surface runoff to total nitrogen export and the ratio of surface runoff discharge to total flow discharge

境质量标准Ⅲ类)波动 [图 6(a)]. 雨季, 随着降雨的发生, 基流输出水量增加(图 2), 基流中总氮浓度有所降低 [图 6(a)]. 总体而言, 地表

径流中总氮的浓度高于基流中总氮的浓度, 河流中的总氮浓度略高于基流, 略低于地表径流 [图 6(b)].

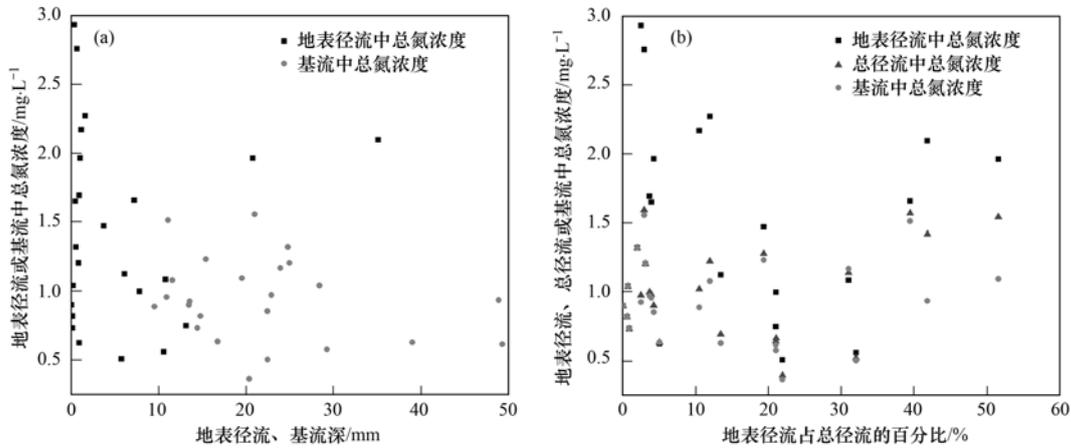


图 6 地表径流和基流中总氮浓度变化特征

Fig. 6 Comparison of the total nitrogen concentrations between base flow and storm flow

河流中颗粒态氮呈现出一定的季节性变化特征. 与非雨季相比, 河流中颗粒态的浓度及其占总氮的比例均在雨季出现明显波动, 且在丰水年, 该波动幅度更大(图 7). 2011~2012 水文年, 颗粒态氮浓度在 2011 年 6 月达峰值, 但总氮中颗粒态氮的比例在 2011 年 9 月最高. 2012~2013 水文年, 颗粒态氮浓度及其在总氮中的比例均在 2012 年 8 月达到峰值. 监测周期内, 总氮中颗粒态氮的比例最高达 46.2% (图 7).

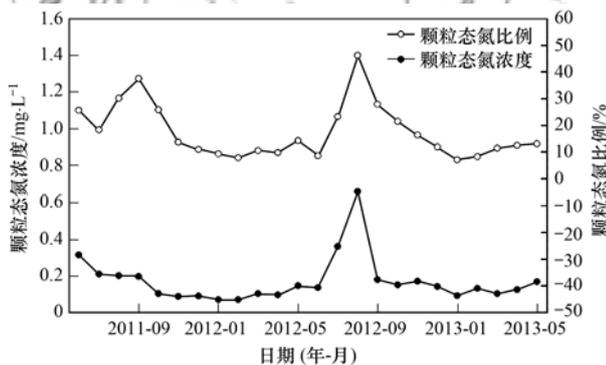


图 7 颗粒态氮的浓度变化

Fig. 7 Changes of particle nitrogen over time

3 讨论

3.1 基流是高原湖泊流域水量与总氮输出的主要形式

研究表明, 基流是高原湖泊流域水量输出的主要形式. 监测周期内, 基流输出的水量占流域总输出水量的 80.0% (表 1), 这与 FD-36 (63.9%)^[11]、WE-38 (56.0%)^[12]、Raccoon River (54.2%)^[13] 等流域的研究结果相似. 但在本研究

中, 基流所占比例高于以上流域, 这可能与研究流域的地形地貌有关. 研究流域属岩溶地貌, 溶洞及泉溪较多, 受到岩溶结构及泉溪的影响, 降雨从地表下渗至浅层地下水后易通过泉溪等输出, 成为基流的一部分, 进而增加了基流在流域水量输出中的比例. 以往的监测结果显示, 流域内最大泉(清源泉)输出水量占流域总输出水量的 1/5 左右. 此外, 本研究表明, 流域内基流总氮输出负荷占流域总输出负荷的比重与流域总输出水量中基流的占比密切相关 [图 6(a)]. 由于流域水量的输出方式以基流为主, 监测周期内, 基流输出的总氮负荷占流域总输出负荷的 71.1% (表 2), 因此, 基流是该流域总氮输出的主要途径.

基流输出的总氮负荷占到了流域总输出负荷的 70% 以上, 除与基流流量高有关外, 也与基流中总氮浓度较高有关. 监测周期内, 基流中总氮浓度基本高于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 6(a)], 高于林地源头水中总氮的浓度^[28], 一方面, 与点源直排有关, 另一方面, 与存在于土壤中的历史遗留氮素的缓慢输出有关(如通过壤中流输出)^[29]. 虽然, 河流水样中并未检测出铵态氮(点源直排的指示指标), 但流域内, 由于养殖业广泛分散于村庄生活区, 加之村庄沟渠有水流经过, 部分养殖污水会直排进入下游水体. 河流水样中未检测出铵态氮, 可能与氮在河流迁移过程中发生了硝化过程有关^[30].

3.2 降雨是高原湖泊流域水量及总氮输出途径变化的主要原因

降雨是导致不同途径输出水量发生变化的主要

原因之一^[31,32]。本研究发现,地表径流、基流及河流流量(总径流)均随降雨增加而增加[图2(b)],但由于地表径流增加幅度高于基流,因此,降雨导致了流域水量输出途径的改变。随着降雨增加,地表径流在流域水量输出中的比重增大,基流比重降低[图3(b)]。部分月份(如2012-10),虽然降雨量很小,但基流流量仍较高[图2(a)],这可能来源于壤中流的延迟输出。

降雨也导致了流域总氮输出负荷及输出途径的变化(图3、5)。雨季(6~9月),流域总氮的主要输出途径逐渐由基流转变为地表径流,地表径流输出的总氮负荷占流域总输出负荷的比例升高,最高达到65.6%(图4)。地表径流总氮输出负荷占流域总输出负荷的比重与流域输出水量中地表径流的比重密切相关[图6(b)]。随着流域输出水量中地表径流比重的增加,流域总氮输出的途径也发生相应地变化。当地表径流占流域输出水量的比重高于40%时,流域总氮输出的主要途径由基流转变为地表径流。

3.3 总径流、基流与地表径流中氮浓度的差异

本研究流域内,地表径流中总氮的浓度高于基流中总氮的浓度[图6(b)],虽然基流、地表径流在总氮输出负荷中的占比与其总输出水量中的比重显著相关,但基流的总氮输出占比略低于其在水量输出中的占比,而地表径流总氮输出中占比高于水量输出占比(图5)。这主要与两种径流方式中总氮浓度差异及随流量的变化特征不一致有关^[13]。在一定范围内,地表径流及基流中总氮浓度均随流量的增加而降低[图6(a)],这一过程,径流量的增加主要起到稀释作用^[33]。当地表径流深增加到一定程度时[如图6(a),径流深达20mm时],地表径流中的总氮浓度反而升高,而基流中总氮的浓度则随径流深的增加而降低,直至保持平稳。这主要由于低径流条件下,径流驱动力较小,地表径流中氮素的形态以溶解态为主,当径流升高到一定条件时,径流驱动力增大,会伴随土壤流失的发生,地表径流输出的氮素中颗粒态的比重增加^[34]。然而,基流过程往往没有土壤流失过程的伴随发生,因此,随着基流水量的增加,没有颗粒态氮的补充。地表径流和基流中浓度变化特征的差异,导致地表径流中总氮浓度高于河流浓度,而基流中总氮的浓度低于河流浓度[图6(b)]。这也是流域总氮输出中基流的占比略低于其在水量输出中的占比,而地表径流在流域总氮输出中占比高于其在水量输出中

的占比的主要原因。

雨季,河流中颗粒态氮的浓度及其在总氮中的比例升高,这与在该时期地表径流在流域水量及总氮输出中的比重增加重合,因此,佐证了本研究对流域水量及总氮输出途径的分析结果。

4 结论

(1)基流是高原湖泊流域水量输出的主要形式和总氮输出的主要途径,输出水量占流域总输出水量的80.0%,输出的总氮负荷占流域总输出负荷的71.1%。

(2)总氮输出中不同途径的比重与其在流域输出水量中的比例密切相关。降雨导致地表径流增加,进而导致其在流域输出水量和总氮输出负荷中的比重升高。当地表径流占流域输出水量的比重达40%以上时,流域总氮输出的主要途径由基流转变为地表径流;雨季(6~9月)流域内地表径流是水量和氮负荷输出的主要途径,最高比例可达65.6%,其他时期总氮和水量的主要输出途径均为基流。

(3)流域总氮输出途径及其变化特征的识别为开展流域总氮输出负荷评估及面源污染防控提供了理论依据,也可为其他流域开展类似研究提供借鉴。

参考文献:

- [1] Murphy T, Dougall C, Burger P, *et al.* Runoff water quality from dryland cropping on Vertisols in central Queensland, Australia [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **180**: 21-28.
- [2] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system; a review [J]. *Annals of Applied Biology*, 2013, **162**(2): 145-173.
- [3] Cui F, Zheng X, Liu C, *et al.* Assessing biogeochemical effects and best management practice for a wheat - maize cropping system using the DNDC model [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(1): 91-107.
- [4] Ju X T. Direct pathway of nitrate produced from surplus nitrogen inputs to the hydrosphere [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(4): E416.
- [5] 张亦涛,刘宏斌,王洪媛,等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(20): 6664-6676.
Zhang Y T, Liu H B, Wang H Y, *et al.* A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 6664-6676.
- [6] 朱兆良,张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [7] Nippgen F, Ross M R V, Bernhardt E S, *et al.* Creating a more

- perennial problem? Mountaintop removal coal mining enhances and sustains saline baseflows of Appalachian Watersheds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (15): 8324-8334.
- [8] Owens L B, Shipitalo M J, Bonta J V. Water quality response times to pasture management changes in small and large watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **63**(5): 292-299.
- [9] Owens L B, Edwards W M, Keuren R W. Baseflow and stormflow transport of nutrients from mixed agricultural watersheds [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, **20** (2): 407-414.
- [10] McKee L, Eyre B, Hossain S. Intra-and interannual export of nitrogen and phosphorus in the subtropical Richmond River catchment, Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2000, **14** (10): 1787-1809.
- [11] Schilling K, Zhang Y K. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, **295**(1-4): 305-316.
- [12] Pionke H B, Gburek W J, Schnabel R R, *et al.* Seasonal flow, nutrient concentrations and loading patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, **220**(1-2): 62-73.
- [13] Zhu Q, Schmidt J P, Buda A R, *et al.* Nitrogen loss from a mixed land use watershed as influenced by hydrology and seasons [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **405**(3-4): 307-315.
- [14] Wang Y, Liu X L, Li Y, *et al.* Rice agriculture increases base flow contribution to catchment nitrate loading in subtropical central China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **214**, 86-95.
- [15] 马秋, 李玮, 王毅, 等. 基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1371-1378.
Ma Q, Li W, Wang Y, *et al.* Contribution of base flow to total nitrogen loading in subtropical agricultural catchments [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1371-1378.
- [16] Janke B D, Finlay J C, Hobbie S E, *et al.* Contrasting influences of stormflow and baseflow pathways on nitrogen and phosphorus export from an urban watershed [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **121**(1): 209-228.
- [17] Huyck A A O, Pauwels V R N, Verhoest N E C. A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes[J]. *Water Resources Research*, 2005, **41** (8): W08415.
- [18] Peters E, Van Lanen H A J. Separation of base flow from streamflow using groundwater levels-illustrated for the Pang catchment (UK) [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19** (4): 921-936.
- [19] Gonzales A L, Nonner J, Heijkers J, *et al.* Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13** (11): 2055-2068.
- [20] Schwartz S S. Automated algorithms for heuristic base-flow separation [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43**(6): 1583-1594.
- [21] Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**(1-2): 168-173.
- [22] 翟玥, 尚晓, 沈剑, 等. SWAT 模型在洱海流域面源污染评价中的应用[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(6): 666-671.
Zhai Y, Shang X, Shen J, *et al.* Application of SWAT model in agricultural non-point source pollution investigation in Lake Erhai Watershed[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25** (6): 666-671.
- [23] 庞燕, 项颂, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4005-4012.
Pang Y, Xiang S, Chu Z S, *et al.* Relationship between agricultural land and water quality of inflow river in Erhai Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4005-4012.
- [24] Shang X, Wang X Z, Zhang D L, *et al.* An improved SWAT-based computational framework for identifying critical source areas for agricultural pollution at the lake basin scale[J]. *Ecological Modelling*, 2012, **226**: 1-10.
- [25] 李文超, 翟丽梅, 刘宏斌, 等. 流域磷素面源污染产生与转移空间分异特征 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37** (2): 711-719.
Li W C, Zhai L M, Liu H B, *et al.* Contrasting spatial distribution of the emission and export of phosphorus loss from a typical watershed in Yunnan Plateau Lakes Area [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 711-719.
- [26] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, **35** (2): 411-424.
- [27] Tzoraki O, Cooper D, Dörflinger G, *et al.* A new MONERIS in-stream retention module to account nutrient budget of a temporary river in Cyprus [J]. *Water Resources Management*, 2014, **28** (10): 2917-2935.
- [28] Xu Z W, Zhang X Y, Xie J, *et al.* Total nitrogen concentrations in surface water of typical agro-and forest ecosystems in China, 2004-2009 [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(3): e92850.
- [29] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**: 18185-18189.
- [30] Koenig L E, Song C, Wollheim W M, *et al.* Nitrification increases nitrogen export from a tropical river network [J]. *Freshwater Science*, 2017, **36**(4): 698-712.
- [31] Ahiablame L, Sheshukov A Y, Rahmani V, *et al.* Annual baseflow variations as influenced by climate variability and agricultural land use change in the Missouri River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **551**: 188-202.
- [32] Bosch D D, Arnold J G, Allen P G, *et al.* Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, **10**: 110-121.
- [33] Wollheim W M, Mulukutla G K, Cook C, *et al.* Aquatic nitrate retention at river network scales across flow conditions determined using nested in situ sensors [J]. *Water Resources Research*, 2017, **53**(11): 9740-9756.
- [34] Gao Y, Zhu B, Yu G R, *et al.* Coupled effects of biogeochemical and hydrological processes on C, N, and P export during extreme rainfall events in a purple soil watershed in southwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **511**: 692-702.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta .....	..... HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer .....	..... SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and δ ¹⁸ O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir .....	..... ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding .....	..... YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region .....	..... LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field .....	..... BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region .....	..... QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios .....	..... TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)