

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

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

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李磊,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征

华玲玲¹, 李文超¹, 翟丽梅^{1*}, 崔超¹, 刘宏斌¹, 任天志², 张富林³, 雷秋良¹

(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. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064)

摘要: 本文以三峡库区古夫河小流域为研究对象, 在自然降雨条件下, 自 2014 年 1 月至 2014 年 12 月对古夫河小流域出水口断面水质水量进行了连续监测, 分析了流域出水口断面污染物氮磷输出浓度、排放负荷随降雨的季节变化特征及其形态组成。结果表明, 古夫河小流域年度水流量为 $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 7~9 月丰水期径流量占全年的 63.9%, 流域出口径流流量与年降雨量间存在极显著 ($P < 0.01$) 的线性相关关系。小流域总氮的年排放负荷为 $1432 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 溶解态氮是氮的主要排放形态, 各月份溶解态氮排放负荷占总氮比例的变化范围为 55.4%~91.3%, 7~9 月丰水期总氮排放负荷达 $853 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占全年的 59.6%; 硝态氮输出浓度与降雨量间存在显著 ($P < 0.05$) 线性相关关系, 其他形态氮浓度与降雨量、泥沙量间线性相关关系均不显著。总磷的年排放负荷为 $563.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 颗粒态是磷的主要排放形态, 各月份颗粒态磷排放负荷占总磷比例的变化范围为 41.9%~79.5%, 丰水期总磷的排放负荷占全年的 71.2%, 总磷、可溶性总磷和颗粒态磷与降雨量和泥沙流失量之间均存在显著 ($P < 0.05$) 线性相关关系。

关键词: 三峡库区; 小流域; 面源污染; 氮; 磷

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0138-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201606210

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area

HUA Ling-ling¹, LI Wen-chao¹, ZHAI Li-mei^{1*}, CUI Chao¹, LIU Hong-bin¹, REN Tian-zhi², ZHANG Fu-lin³, LEI Qiu-liang¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3. Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: To study the seasonal change characteristics and form composition of nitrogen and phosphorus output concentration and pollutant discharge load with rainfall characteristics at the outlet of Gufu river small watershed, the quality and quantity of water combined with natural rainfall events were monitored from January to December 2014. The results showed that the annual runoff volume of the Gufu river small watershed was $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$. The runoff was concentrated in raining season (from July to September), accounting for 63.9%. There was significant ($P < 0.01$) positive correlation between the runoff flow and the annual rainfall. The annual emission of total nitrogen (TN) was $1432 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, and the emission was $853 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ during the raining season, accounting for 59.6% of annual TN emission content. The dissolved nitrogen was the main form of nitrogen emission, and the emission load of each month accounted for 55.4% - 91.3% of TN. The positive correlation between the nitrate nitrogen concentration and rainfall was significant ($P < 0.05$). The annual emission of total phosphorus (TP) was $563.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, and the content during the raining season accounted for 78.6% of TP annual emission content. The particle phosphorus (PP) was the main form of phosphorus emission, and the emission load of each month accounted for 41.9% - 79.5% of TP. There was significant ($P < 0.01$) positive correlation between the annual rainfall, sediment and TP, PP. The correlation between the total dissolved phosphorus concentration and rainfall was significant ($P < 0.05$).

Key words: Three Georges Reservoir Area; small watershed; non-point pollution; nitrogen; phosphorus

三峡库区是长江流域水质、水量保障的关键区域, 对于保障流域水环境安全具有不可替代的作用^[1,2]。自蓄水后, 水环境问题备受关注^[3,4], 部分支流富营养化问题严重, 水华现象频繁暴发^[5]。香溪河位于湖北省境内, 是三峡大坝库首的第一大支流, 蓄水后库湾水体 TN 年均值 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 年均值 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处于重度富营养化状态, 面源污染物氮磷的输入是引起香溪河流域水体污染的主要

原因之一^[6]。古夫河作为香溪河三大水系之一, 其所在的古夫河流域是香溪河流域面源污染控制的重点支流之一^[7]。

相对于点源污染而言, 面源污染负荷的量化

收稿日期: 2016-06-30; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303089)

作者简介: 华玲玲(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田面源污染防控, E-mail: hualing0329@163.com

* 通信作者, E-mail: zhailimei@caas.cn

研究存在较大难度,其主要原因在于降雨径流发生的不确定性^[8]。目前,针对流域尺度面源污染负荷的产生量及流失规律的研究多采用模型模拟的方法^[9,10]。相关研究已运用输出系数模型^[11]、分布式水文模型 SDSM^[12] 和 SWAT 模型^[7] 等对三峡库区氮磷排放负荷、污染负荷对不同降水量变化的响应情况和氮磷负荷分布规律进行了研究,研究结果表明,库区总氮和总磷负荷均与降水量呈正相关,且降水主要对三峡库区 4~8 月的污染负荷量影响较大,4~9 月丰水期, TN 和 TP 贡献率均占到 80% 以上。

模型模拟虽然可以从大的时空尺度上预测面源污染物负荷的产生量,但由于各种条件的差异,计算结果与流域出口实际监测结果还存在一定差异^[13]。因此,在不同的时空尺度下进行大量的实际监测研究是十分必要的^[14],其监测结果可用于模型的校准验证,从而提高模型在流域使用的精确性。本文选择三峡库区香溪河流域一个地形相对封闭的古夫河小流域为研究对象,对流域断面出水口水质进行连续定位监测,明确流域氮磷污染物浓度随降雨径流的季节变化特征,量化流域氮磷污染物的流失负荷,以期对三峡库区流域面源污染的防控提供基础性支撑资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

香溪河是长江三峡库区坝首第一大支流,古夫河小流域位于香溪河流域北部,流域面积 1 178 km²,地形为典型山地丘陵区。气候属于亚热带季风性湿润气候,春季冷暖交替多变,雨水颇丰;夏季炎

热多伏旱,雨量集中;秋季多阴雨;冬季多雨雪、早霜。山峦起伏,气候垂直变化明显,多年平均气温 15.3℃。降雨季节分布不均,年均降水量为 800~1 200 mm。流域土壤类型繁多,有黄壤、黄棕壤、棕色石灰土、紫色土、水稻土和潮土等,其中黄壤和棕色石灰土在整个流域内占 78.6%。

古夫河小流域是香溪河流域内典型的农林复合小流域,其土地利用模式和小流域农业结构极具代表性,土地利用类型多样,主要有林地、耕地和园地,主要作物有水稻、玉米、油菜和柑橘等。该流域三面环山,集水区径流汇聚于唯一出口,具有较好的封闭性。

1.2 样品采集及测试

1.2.1 降雨、流量数据采集

监测期间,降雨量和流域出口日流量均来自兴山水文站自动监测数据,流域断面监测位置如图 1 所示。

1.2.2 断面水样采集

2014 年 1~12 月进行水质采样,采样点位于古夫河小流域出口断面(图 1),采样频率为 5~9 月每天采集 1 次,其他月份每 6 d 采集一次。每次采集时间为上午 10:00,分别在河流断面的左、中、右取样并混合,取混合样 500 mL,分装在两个干净矿泉水瓶中。水样在 4℃ 条件下保存,8~24 h 内进行测定,测定指标为总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、颗粒态氮(PN),总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、颗粒态磷(PP)和泥沙含量。TN 使用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定(GB 11894-89),NO₃⁻-N 使用酚二磺酸分光光度法测定(GB

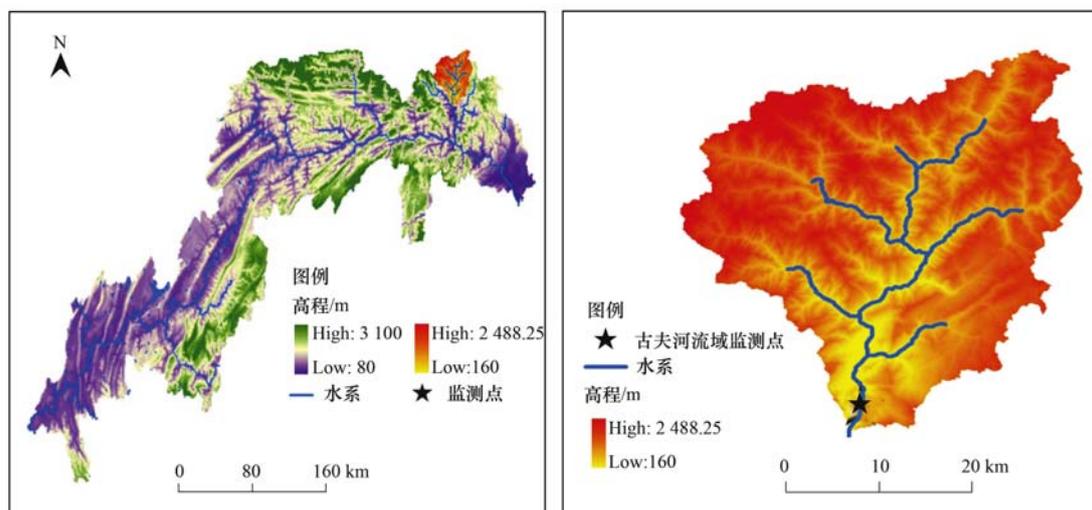


图 1 古夫河小流域地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of Gufu Basin

7480-87), NH_4^+ -N 使用纳氏试剂分光光度法测定 (GB 7479-87), TN 与溶解态氮 (NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N) 的差值为 PN; TP、TDP 使用钼酸铵分光光度法测定 (GB 11893-89), TP 与 TDP 的差值为 PP^[15], 泥沙含量采用传统的烘干法测量, 即通过采取一定量的水样, 经烘干、称量出泥沙的质量, 该质量与所取的水样的体积的比值, 即为水样中泥沙的含量^[16].

1.3 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2013 软件进行作图分析. 运用 SAS 9.0 对数据进行相关性分析. 其中, 污染物年均排放浓度为流域出口污染物年监测浓度的平均值; 月均排放浓度为流域出口污染物月监测浓度的平均值; 污染物浓度峰值即为浓度最高值; 污染物年排放负荷 = \sum 年监测浓度 \times 流量.

2 结果与分析

2.1 降雨-流量变化特征

2014 年 1 ~ 12 月古夫河小流域降雨量为

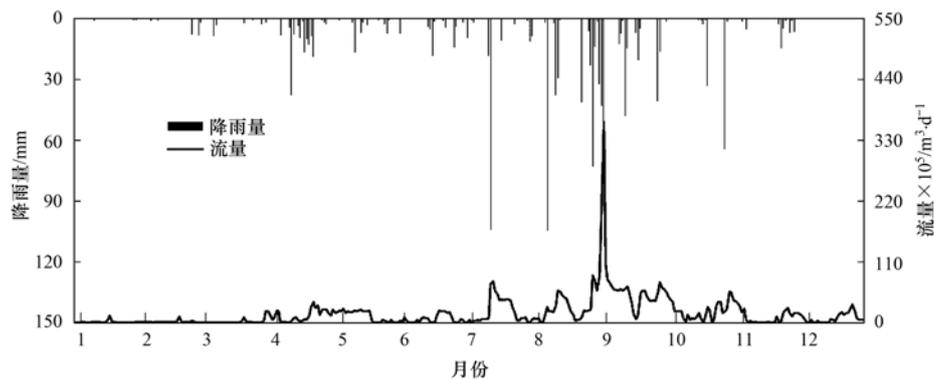


图2 古夫河小流域年度降雨量、流域出口流量变化

Fig. 2 Variation of rainfall and runoff in Gufu River watershed

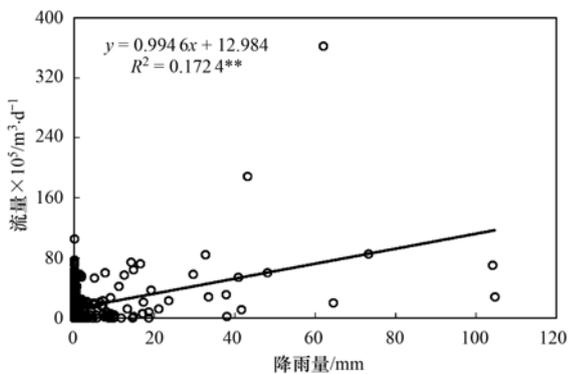


图3 古夫河小流域降雨量与流域出口流量之间的相关性

Fig. 3 Correlation between annual rainfall and runoff in Gufu River watershed

态氮和总氮, 集中出现在 6 月, 月均排放浓度为

1 289.5 mm, 降雨天数 170 d, 7 ~ 9 月降雨量 824.1 mm, 占全年降雨量的 63.9%, 为该流域的丰水期 (在这期间发生了两次大的降雨事件, 分别发生在 7 月 12 日和 8 月 7 日, 降雨量分别为 104.2 mm 和 104.7 mm) (图 2); 1 ~ 3 月、11 月、12 月降雨量较小, 仅占全年降雨量的 7.4%, 为该流域的枯水期. 流域出水口断面日平均流量为 $16.5 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 全年总流量达 $6.02 \times 10^8 \text{ m}^3$; 9 月日平均流量最大, 1 月最小, 其值分别为 $68.1 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.34 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 7 ~ 9 月监测断面出口流量达 $3.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全年流量的 59.3%; 11 月开始, 降雨持续减少, 流量缓慢降低. 流域出口流量与降雨量之间的相关性分析表明, 流域出口流量与降雨量之间存在极显著 ($P < 0.01$) 的线性正相关关系 (图 3).

2.2 氮污染物的排放特征

2014 年 1 ~ 12 月流域出口监测断面总氮、硝态氮和氨氮的年均排放浓度分别为 2.34、1.90 和 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 4). 氨氮浓度峰值的出现早于硝

$0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比年均排放浓度高出 33.3%, 最大排放浓度达 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 最低月均排放浓度出现在 3 月和 4 月, 其值为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅为年均排放浓度的 55.6%. 硝态氮排放浓度峰值出现在 7 月 13 日, 比 7 月最大降雨日期 (7 月 12 日) 延后 1 d, 浓度为 $3.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 8 月 28 日硝态氮排放浓度再次出现一个小峰值, 当日的降雨量达 73.2 mm, 是本月的第二个降雨高峰. 7 ~ 9 月丰水期, 总氮排放浓度峰值随降雨量的变化而上下波动, 7 ~ 9 月浓度均值分别为 2.20、2.49 和 $2.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 根据《地表水环境质量标准 GB 3838-2002》, 以总氮浓度为水质评判指标, 属于地表水水质劣 V 类.

对流域出口不同形态氮浓度与降雨量、泥沙含量之间的线性相关分析结果表明 (表 1), 降雨量与

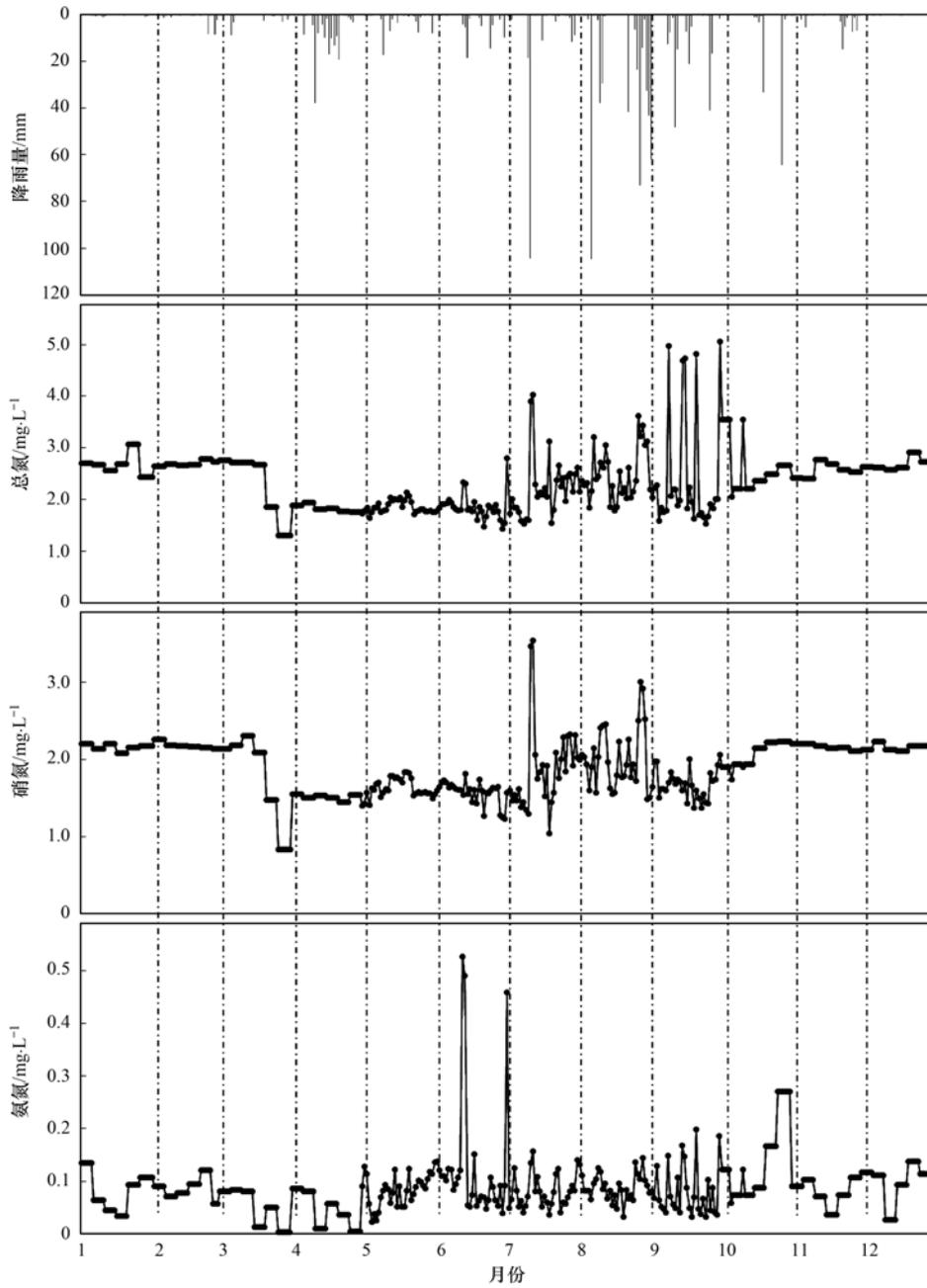


图4 流域出口不同形态氮污染物浓度的变化特征

Fig. 4 Change of different forms of nitrogen concentrations in Gufu River watershed

泥沙含量之间存在极显著 ($P < 0.01$) 线性相关关系,降雨量与硝态氮浓度存在显著 ($P < 0.05$) 线性相关关系,与总氮、氨氮浓度相关性不显著;泥沙含量和不同形态氮浓度间相关关系均不显著 ($P < 0.05$).

小流域监测断面出口总氮、硝态氮、颗粒态氮和氨氮的年排放负荷分别为1 432、1 126、251 和 55 $t \cdot a^{-1}$ (图 5),7~9 月丰水期排放负荷分别达 853、666、157 和 30 t,分别占其年排放负荷的 59.6%、59.1%、62.5% 和 54.5%;枯水期总氮、硝态氮、

表1 流域出口不同形态氮浓度与降雨、泥沙之间的相关性

Table 1 Correlation between different forms of nitrogen concentrations and rainfall and sediment in Gufu River watershed

相关系数	降雨量	泥沙量	总氮浓度	硝氮浓度	氨氮浓度
降雨量	1				
泥沙量	0.2116**	1			
总氮浓度	0.0044	0.0029	1		
硝氮浓度	0.0163*	0.0001	0.4684**	1	
氨氮浓度	0.0014	0.00004	0.1183**	0.0593**	1

颗粒态氮和氨氮的排放负荷分别占其年排放负荷的

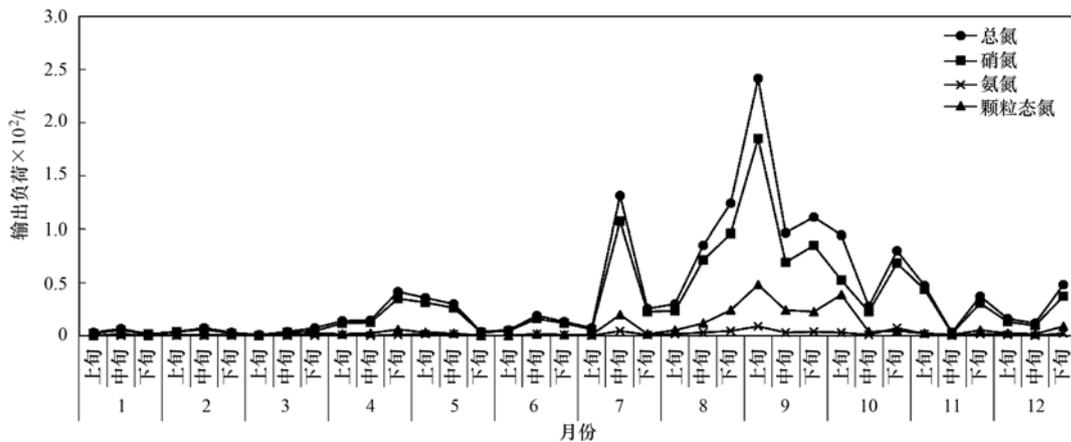


图 5 流域出口不同形态氮负荷输出变化

Fig. 5 Change of different forms of nitrogen discharge in Gufu River watershed

14.0%、14.7%、11.2%和12.7%，其中1~3月总排放负荷最小，不同形态氮的排放负荷分别仅占其年排放负荷的2.6%、2.5%、2.8%和1.5%。不同形态氮排放峰值均出现在9月上旬，排放负荷分别达241.8、185.3、47.8和8.7 t。4月下旬、7月中旬和10月下旬不同形态氮污染物排放负荷出现小的峰值，可能与这几个时期的降雨量增加有关。硝态氮是6~9月流域氮的主要排放形态(图6)，月排放负荷占总氮排放负荷的55.4%~91.3%，颗粒态氮和氨氮月排放负荷占总氮排放的比例分别为4.8%~41.2%和0.6%~9.1%，且随着雨季的延长，颗粒态氮流失比例增加，9月颗粒态氮流失比例

比6月高出13.9%。

2.3 磷污染物的排放特征

2014年1~12月小流域监测断面出口总磷、可溶性总磷和颗粒态磷的年均排放浓度分别为0.056、0.021和0.035 mg·L⁻¹(图7)。颗粒态磷月均排放浓度最高出现在9月，为0.086 mg·L⁻¹，比年均排放浓度高出2.5倍，排放浓度峰值出现在8月31日，最大排放浓度达0.353 mg·L⁻¹。最低月平均排放浓度出现在3月，其值为0.019 mg·L⁻¹，仅为年均排放浓度的54.3%。可溶性总磷排放浓度在5~9月波动较大，峰值出现在9月2日，最大排放浓度为0.09 mg·L⁻¹。最高月平均排放浓度出现在7月和8月，月均排放浓度为0.031 mg·L⁻¹，比年均排放浓度高出47.6%。7~9月丰水期，总磷月均排放浓度分别为0.068、0.079和0.108 mg·L⁻¹，按《地表水环境质量标准 GB 3838-2002》，7~8月水质属于地表水水质Ⅱ类，9月达到地表水水质Ⅲ类，最大排放浓度峰值出现在8月31日，为0.4 mg·L⁻¹。

对流域出口不同形态磷浓度与降雨量、泥沙含量之间的线性相关分析结果表明(表2)，降雨量与可溶性总磷浓度存在显著($P < 0.05$)线性相关关系，与总磷、颗粒态磷浓度极显著($P < 0.01$)线性相关；泥沙含量和不同形态磷浓度间相关关系均达极显著水平($P < 0.01$)。

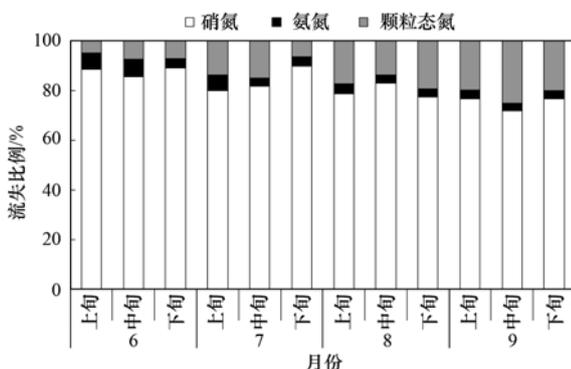


图 6 6~9月流域出口不同形态氮负荷输出比例

Fig. 6 Percentage change of different forms of nitrogen discharge in Gufu River watershed

表 2 流域出口不同形态磷浓度与降雨、泥沙之间的相关性

Table 2 Correlation between different forms of phosphorus concentrations and rainfall and sediment in Gufu River watershed

相关系数	降雨量	泥沙量	总磷	可溶性总磷	颗粒态磷
降雨量	1				
泥沙量	0.2116**	1			
总磷	0.1086**	0.4720**	1		
可溶性总磷	0.0110*	0.0369**	0.2643**	1	
颗粒态磷	0.1122**	0.5028**	0.8753**	0.0318**	1

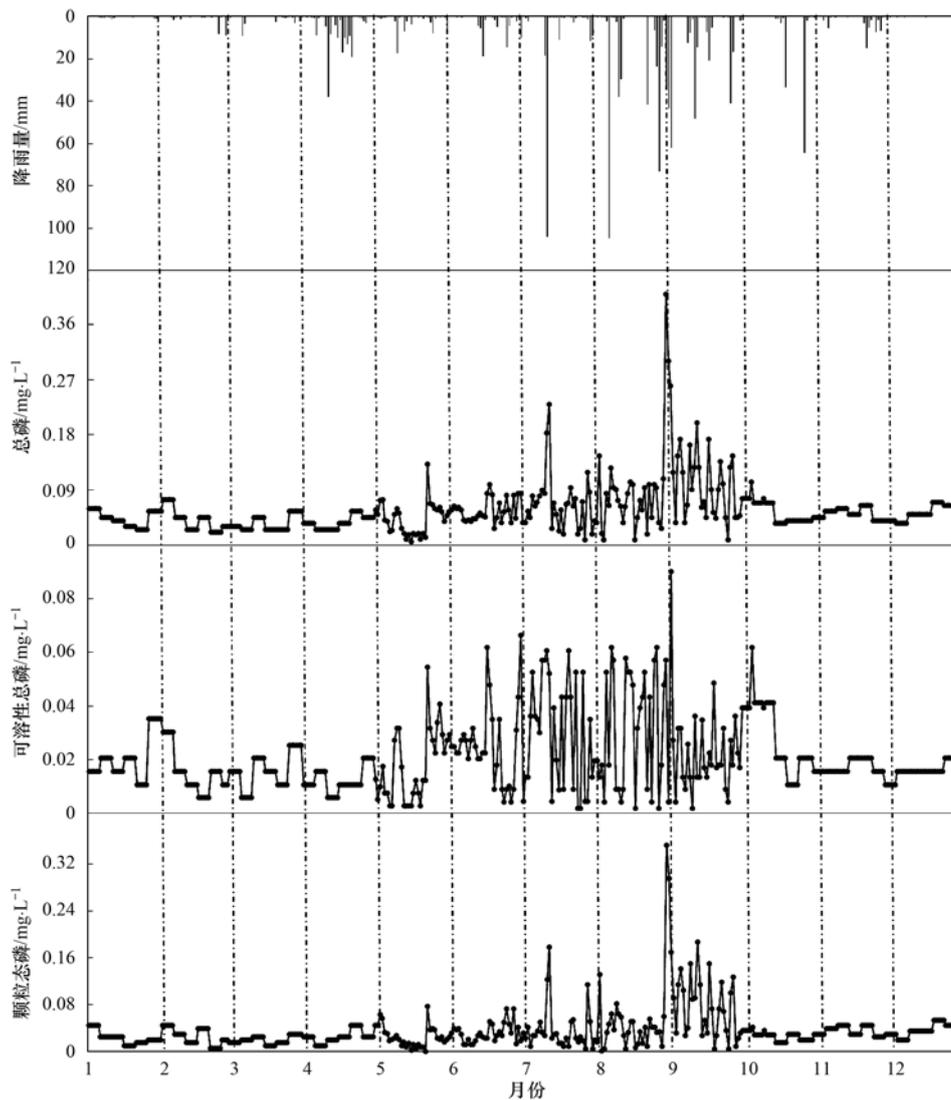


图7 流域出口不同形态磷浓度的变化特征

Fig. 7 Change of different forms of phosphorus concentrations in Gufu River watershed

小流域监测断面出口总磷、可溶性总磷和颗粒态磷的年排放负荷分别为 563.1、162.1 和 401 $t \cdot a^{-1}$ (图 8), 7~9 月丰水期排放负荷分别达 442.4、115.0 和 327.4 t, 分别占其年排放负荷的 78.6%、70.9% 和 81.6%; 枯水期总磷、可溶性总磷和颗粒态磷的排放负荷分别占其年排放负荷的 7.1%、8.3% 和 6.7%, 其中 1~3 月总排放负荷最小, 分别仅占其年排放负荷的 1.2%、1.9% 和 0.97%。不同形态磷负荷排放峰值与氮相同均出现在 9 月上旬, 排放负荷分别达 210.7、44.6 和 166.1 t。4 月下旬和 7 月中旬不同形态磷排放负荷出现小的峰值, 可能与这几个时期的降雨量增加有关, 且据调研, 4 月底和 7 月中旬是流域的主要施肥期。颗粒态是 6~9 月流域磷的主要排放形态 (图 9), 月排放负荷占总磷的 41.9%~79.5%, 可溶性总磷月排放负荷占总

磷的 20.5%~58.1%, 随着雨季的延长, 9 月颗粒态磷的日流失比例高达 74.1%~79.5%。

3 讨论

古夫河小流域年内降雨分配极度不均, 7~9 月降雨量占全年降雨量 63.9%, 且日降雨量超过 60 mm 的降雨发生 4 次, 流域出口流量占全年流量的 59.3%, 贡献了全年总氮、总磷负荷的 59.6% 和 78.6%, 是古夫河小流域氮磷流失的关键期, 降雨较少的 10 月至次年 6 月, 总氮和总磷的贡献比例不足 50%。宋林旭等^[7]应用 SWAT 模型对整个香溪河流域不同时空尺度非点源氮磷分布式模拟和分析结果也表明, 在 4~9 月丰水期, TN 和 TP 贡献率分别为 84.1% 和 89.4%, 且径流和营养盐负荷受降雨影响并呈正相关关系。由此得出, 降雨是面源污染发生

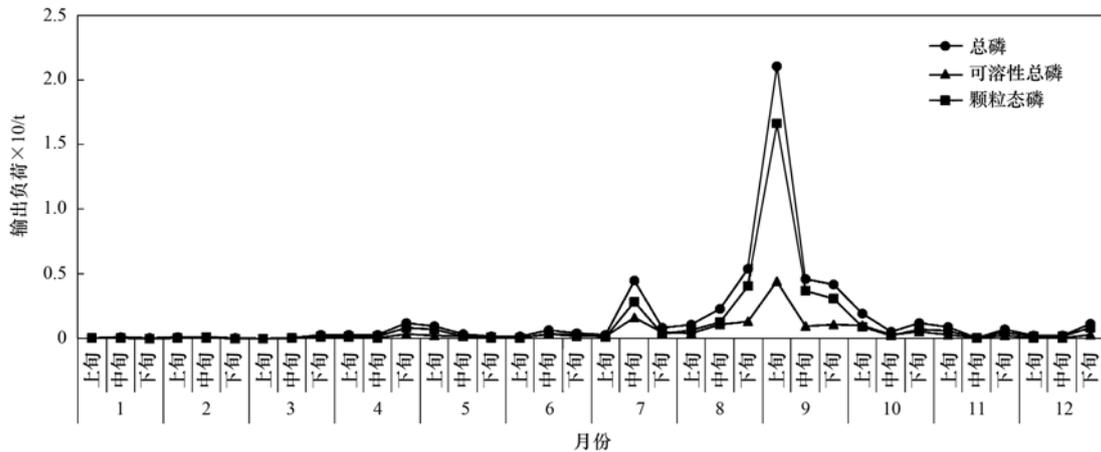


图8 流域出口不同形态磷负荷输出变化

Fig. 8 Change of different forms of phosphorus discharge in Gufu River watershed

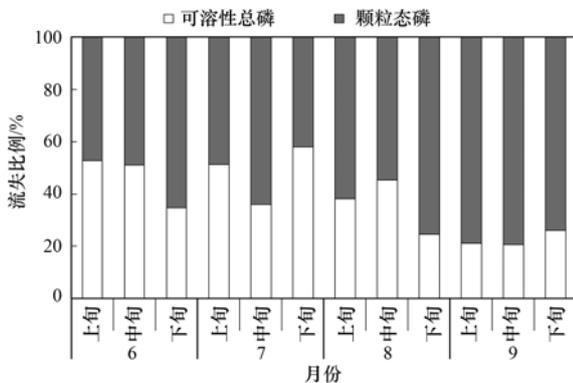


图9 6~9月流域出口不同形态磷负荷输出比例

Fig. 9 Percentage change of different forms of phosphorus discharge in Gufu River watershed from June to September

的主要驱动力,降雨的季节特征、降雨量和降雨强度等均对土壤养分的流失及流失形态均产生影响^[17~19]. 小流域氮磷的输出规律除了受降雨影响,还与流域氮磷的来源有关. 已有研究表明,畜禽养殖业源和种植业源对流域氮磷排放贡献最大^[20]. 据本研究流域内农村统计年鉴统计显示,流域内的养殖畜禽主要为猪、牛、鸡,但以生猪养殖为主,已有研究指出猪粪中氮磷养分含量明显高于牛粪和鸡粪^[21],研究流域内生猪养殖多以农户散养为主,粪便无处理设施临时堆放较常见,遇降雨天气粪便极易被冲刷造成大量氮磷流失. 尹琴等^[22]通过人工降雨和模拟降雨相结合方式分析发现,降雨冲刷可导致畜禽粪便中65%的氮和55%的磷流失. 整个三峡库区山地丘陵面积占97.3%,耕地大部分分布在坡地,属于中度侵蚀以上流失区^[23]. 根据已有研究表明,不同土地利用类型中坡耕地氮磷流失负荷最大,其次是坡地园地^[24~26],6月初到7月中旬,古夫小流域内主要种植作物玉米和柑橘追施大量氮磷

肥,且两种作物主要分布在沿河道两侧的低山、半高山区坡地上,加上降雨集中,水土流失严重,流域内氮磷的流失潜力增加. 朱波等^[3]在石盘丘小流域的研究也表明,坡地园地和坡耕地是三峡库区农村非点源氮磷污染的主要来源,两者累积贡献了51%以上的小流域氮磷污染负荷. 由此可以看出,在丘陵小流域中的分散养殖和坡地种植是流域面源污染的两个主要来源.

本研究小流域溶解态氮和颗粒态磷是氮、磷流失的主要形态. 其中,溶解态氮中硝态氮的比例占到了90%以上(图6),这与吴东等^[27]的研究结果一致,分析原因可能与氮素的存在形态及输出迁移驱动力有关,土壤胶体带负电荷,与铵态氮结合稳定,在没有降雨径流驱动作用下很难流失,硝态氮带负电,且易溶于水,迁移能力强,即使在没有降雨地表径流作用下,同样会随浅层地下水进入河道^[7]. 据调查流域内畜禽粪便最终全部以有机肥形式还田,但在非施肥期产生的粪便大量随意露天堆置,在降雨的冲刷下养分直接进入河道,这部分氮主要溶解于径流中或吸附于泥沙中流失;以有机肥形式进入农田的这部分畜禽粪便主要以硝态氮形态随农田渗漏和径流流失^[20,24],因此,流域氮主要输出形态为溶解态氮^[28]. 流域内磷的流失主要以颗粒态为主,占到了流失总磷的41.9%~79.5%(图9),颗粒态磷的损失载体主要是泥沙^[29~31],流域内8月降雨径流集中,降雨强度大,对土壤的侵蚀增加,泥沙含量与降雨量呈极显著正相关,因此,从8月开始,颗粒态磷逐渐成为流域磷输出的主要形态,6、7月可溶态和颗粒态磷输出比例各占总磷输出的50%左右. 这主要由于种植业源是流域内磷流失的主要来

源^[20],流域内以坡耕地为主,坡耕地农田总磷流失负荷大,并且主要是以颗粒态磷流失^[32]。由此可见,为减少流域内面源污染流失负荷,建议流域内粪便集中处理或堆腐后及时还田,且在降雨集中的7~9月,尽量避免畜禽粪便的露天放置。为减少流域内坡耕地面源污染流失,尽量选择横坡垄作的种植方式^[32],免中耕^[33]或辅助等高植物篱^[4]、秸秆覆盖^[34]等不同耕作和覆盖方式来降低坡地土壤侵蚀和肥料流失引起的面源污染风险。

4 结论

(1)7~9月是古夫河小流域面源污染的主要发生时期,降雨量占全年降雨量63.9%,总氮、总磷的排放负荷分别占年排放负荷的59.6%和78.6%,平均排放浓度分别为总氮 $2.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和总磷 $0.085 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,溶解态氮和颗粒态磷成为流域氮磷主要流失形态,水质为劣V类水,对三峡库区水体富营养化存在一定风险,建议将7~9月作为流域面源污染防控关键期。

(2)坡耕地和分散养殖是流域面源污染两大主要贡献源,为降低流域种植业面源污染流失应在流失关键期尽量减少翻耕、肥料表施等农业措施,并且采取流域坡耕地横坡垄作、等高植物篱等措施加强面源污染防控;山地丘陵小流域散养为主的畜禽粪便全部以有机肥形式还田,因此,在避免雨季表施还田的同时,应建设畜禽粪便储存设施,避免由于畜禽粪便随意露天堆放而遭降雨冲刷带来的面源污染流失负荷增加。

致谢:本研究在水质采样过程中,得到了湖北省农业科学院植保土肥研究所范先鹏老师课题组人员的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等. 三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3035-3042.
Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, et al. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3035-3042.
- [2] 蔡庆华,胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.
Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 7-11.
- [3] 朱波,汪涛,王建超,等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. 中国水土保持, 2010, (10): 34-36.
Zhu B, Wang T, Wang J C, et al. Source and load of non-point source nitrous and phosphorus pollution of typical small watersheds in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010, (10): 34-36.
- [4] 许峰,蔡强国,吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(1): 82-87.
- [5] Xu F, Cai Q G, Wu S A. Progress in research on nutrient processes of sloping agroforestry systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **14**(1): 82-87.
- [6] 李凤清,叶麟,刘瑞秋,等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. 生态学报, 2008, **28**(5): 2073-2079.
Li F Q, Ye L, Liu R Q, et al. Dynamics of the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorge Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(5): 2073-2079.
- [7] 陈玲,宋林旭,崔玉洁,等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(1): 49-55.
Chen L, Song L X, Cui Y J, et al. Characteristics of phosphorus loss in sloping arable land of yellow-brown soil under artificial rainfall Test [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(1): 49-55.
- [8] 宋林旭,刘德富,崔玉洁. 三峡库区香溪河流域非点源氮磷负荷分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 428-434.
Song L X, Liu D F, Cui Y J. Study on the distribution of non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 428-434.
- [9] Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C, et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management [J]. Hydrological Processes, 2005, **19**(3): 749-762.
- [10] Lee M, Park G, Park M, et al. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 826-833.
- [11] Azzellino A, Salvetti R, Vismara R, et al. Combined use of the EPA-QUAL2E simulation model and factor analysis to assess the source apportionment of point and non point loads of nutrients to surface waters [J]. Science of the Total Environment, 2006, **371**(1-3): 214-222.
- [12] Ma X, Li Y, Zhang M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2011, **412-413**: 154-161.
- [13] 丁相毅,周怀东,王宇晖,等. 基于分布式水文模型的三峡库区污染负荷对气候变化的响应研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 1991-1998.
Ding X Y, Zhou H D, Wang Y H, et al. Impacts of climate change on pollution load in the Three Gorges Reservoir based on a distributed hydrological model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(8): 1991-1998.
- [14] 付斌,刘宏斌,鲁耀,等. 高原湖泊典型农业小流域氮、磷排放特征研究——以凤羽河小流域为例[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2892-2899.
Fu B, Liu H B, Lu Y, et al. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus emission in typical small watershed of plateau lakes: a case study of the Fengyu River Watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2892-2899.
- [15] 宋林旭,刘德富,肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(8): 990-996.
Song L X, Liu D F, Xiao S B. Experimental study on nonpoint source nutrient output from Xiangxi Basin in Three Gorges

- Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(8): 990-996.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Ministry of Environmental Protection. Water and wastewater monitoring analysis method (4th ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [16] 水利部水文局. 江河泥沙测量文集[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
Ministry of Water Resources and Hydrology Bureau. The rivers sediment measurement corpus [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2000.
- [17] 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**(4): 257.
- [18] 王国重, 李中原, 田颖超, 等. 雨强和土地利用对豫西南山区氮磷流失的影响[J]. 人民长江, 2016, **47**(7): 18-22.
Wang G Z, Li Z Y, Tian Y C, *et al.* Effects of rainfall intensity and land use mode on loss of TN and TP in southwest hilly area of Henan Province[J]. Yangtze River, 2016, **47**(7): 18-22.
- [19] 高杨, 宋付朋, 马富亮, 等. 模拟降雨条件下3种类型土壤氮磷钾养分流失量的比较[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(2): 15-18.
Gao Y, Song F P, Ma F L, *et al.* Comparison of loss amount of nitrogen, phosphorus and potassium in three types of soil under Simulated Rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(2): 15-18.
- [20] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(5): 937-946.
Cui C, Liu S, Zhai L M, *et al.* Estimates and spatio-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus discharges from agricultural sources in Xiangxi River Basin, Xingshan County [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(5): 937-946.
- [21] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(1): 179-184.
Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(1): 179-184.
- [22] 尹琴, 瞿广飞, 黄凯, 等. 降雨冲刷造成的畜禽粪便氮磷流失规律及蚯蚓强化降解堆沤池氮磷流失控制作用研究[J]. 安徽农业科学, 2015, **43**(25): 265-268.
Yin Q, Qu G F, Huang K, *et al.* Loss rules of N&P of poultry and animal feces caused by rainfall and control effect of earthworm degradation to N&P loss in composting pool [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, **43**(25): 265-268.
- [23] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(4): 81-85.
Liang F F, Jiang X J, Yuan J J, *et al.* Main features of the loss of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in the slope farmland of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(4): 81-85.
- [24] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3390-3396.
Zeng L X, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3390-3396.
- [25] 宋林旭, 刘德富, 过寒超, 等. 三峡库区香溪河流域不同源类氮、磷流失特征研究[J]. 土壤通报, 2013, **44**(2): 465-471.
Song L X, Liu D F, Guo H C, *et al.* A study on nitrogen and phosphorus loss of different non-point sources in Xiangxi Basin of Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(2): 465-471.
- [26] 田太强, 何丙辉, 黄巍. 三峡库区坡耕地不同施肥水平与耕作模式径流泥沙流失规律[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(1): 61-65, 70.
Tian T Q, He B H, Huang W. Characteristics of runoff and sediment production under different fertilization and tillage patterns in Three Gorges Reservoir Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(1): 61-65, 70.
- [27] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3825-3831.
Wu D, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Control of soil nutrient loss of typical reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3825-3831.
- [28] 秦华, 李晔, 李波, 等. 人工模拟降雨条件下石灰土养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(1): 1-4, 53.
Qin H, Li Y, Li B, *et al.* Nutrient loss of limestone soil under artificial simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 1-4, 53.
- [29] Wu L, Long T Y, Liu X, *et al.* Modeling impacts of sediment delivery ratio and land management on adsorbed non-point source nitrogen and phosphorus load in a mountainous basin of the Three Gorges reservoir area, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(3): 1405-1422.
- [30] 孟庆华, 杨林章. 三峡库区不同土地利用方式的养分流失研究[J]. 生态学报, 2000, **20**(6): 1028-1033.
Meng Q H, Yang L Z. Nutrient losses in different land use types in the Three Gorge Reservoir Area (TGRA) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, **20**(6): 1028-1033.
- [31] Li Z W, Tang H W, Xiao Y, *et al.* Factors influencing phosphorus adsorption onto sediment in a dynamic environment [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, **10**: 1-11.
- [32] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(22): 6091-6101.
Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, *et al.* Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- [33] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 三峡库区黑沟小流域非点源污染物输出的动态变化[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 423-427.
Tian Y W, Huang Z L, Xiao W F. Dynamic change of non-point source pollution exported from Heigou watershed in Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 423-427.
- [34] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses [J]. Catena, 2010, **81**(2): 97-103.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172