

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

三峡库区农业小流域盐基离子排放特征研究

窦添元,龙娟,廖宇琴,木志坚,慈恩,魏世强

引用本文:

窦添元,龙娟,廖宇琴,等.三峡库区农业小流域盐基离子排放特征研究[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1321-1331.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1306

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区不同稻田分布格局下农业小流域径流磷排放特征

罗柏林, 尚二凤, 林晓, 史书, 刘园园, 倪九派, 谢德体, 木志坚 农业环境科学学报. 2017, 36(2): 338-344 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1077

普者黑流域土地利用及"源-汇"景观的氮磷输出响应研究

刘鹏,张紫霞,王妍,刘云根 农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1332-1341 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1334

增效复合肥减氮施用对稻田水氮素流失的影响

蒋东,章力干,齐永波,朱荣,程林,疏晴,张富源,郜红建 农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1342-1350 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1252

村域农田氮素排放特征研究——以新安村为例

陈帅,辛思颖,佟丙辛,吕敏娟,吉庆凯,马文奇,魏静 农业环境科学学报.2020,39(6):1351-1358 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1279

长三角地区蔬菜生产的活性氮损失和温室气体排放估算

赵明炯, 王孝忠, 刘彬, 邹春琴, 陈新平 农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1409-1419 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1205



关注微信公众号,获得更多资讯信息

2020年6月

窦添元, 龙 娟, 廖宇琴, 等. 三峡库区农业小流域盐基离子排放特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1321-1331. DOU Tian-yuan, LONG Juan, LIAO Yu-qin, et al. Characteristics of salt-based ion release from small agricultural watersheds in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1321-1331.



三峡库区农业小流域盐基离子排放特征研究

窦添元^{1,2},龙 娟^{1,2},廖宇琴^{1,2},木志坚^{1,2*},慈 恩^{1,2},魏世强^{1,2} (1.西南大学资源环境学院,重庆 400716; 2.重庆市农业资源与环境研究重点实验室,重庆 400716)

摘 要:为了解盐基离子的农业面源流失负荷与排放特征,对三峡库区涪陵段两个毗邻的集水域汇出口径流水质进行了持续两年的高频(每日)监测。两集水域气候、地貌和农耕方式相同,但其中一个集水域稻田分布零散,破碎度指数高(记为集水域A),另一集水域的稻田连片分布在集水域底部,破碎度指数低(记为集水域B)。结果表明,集水域A阴、阳离子年均输出通量分别为499kg·hm⁻²·a⁻¹和218kg·hm⁻²·a⁻¹,集水域B阴、阳离子年均输出通量分别为265kg·hm⁻²·a⁻¹和118kg·hm⁻²·a⁻¹。集水域A的盐基离子年均输出通量是集水域B的2倍左右,这种差异很可能是由两集水域稻田布局差异所导致。流域径流水体优势阴、阳离子分别为Cl⁻和Ca²⁺,各占阴、阳离子年均排放总量的58%和67%。不同作物季中,水稻/玉米季和榨菜季均贡献了全年盐基离子排放量的1/2左右;不同时期中,5月和11月的离子排放负荷最高,分别占全年的26%和24%。研究表明,5月和11月是控制该流域盐基离子流失的关键时间节点,稻田连片布设于集水域底部是降低农田盐基离子流失的重要空间布局。

关键词:三峡库区;面源污染;农业小流域;盐基离子

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)06-1321-11 doi:10.11654/jaes.2019-1306

Characteristics of salt-based ion release from small agricultural watersheds in the Three Gorges Reservoir area

DOU Tian-yuan^{1,2}, LONG Juan^{1,2}, LIAO Yu-qin^{1,2}, MU Zhi-jian^{1,2*}, CI En^{1,2}, WEI Shi-qiang^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to understand the agricultural non-point source load loss and discharge characteristics of salt-based ions, high-frequency(daily) monitoring of the runoff water quality of the two adjacent catchments in the Fuling section of the Three Gorges Reservoir area was conducted for 2 a. The climate and geomorphology of the two catchments were the same, but the paddy fields in one catchment were scattered and the fragmentation index was high (recorded as catchment area A). The fragmentation index was low. The results showed that the annual average output fluxes of anions and cations in catchment area A were 499 kg·hm⁻²·a⁻¹ and 218 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively, and the average annual output fluxes of anions and cations in catchment area B were 265 kg·hm⁻²·a⁻¹ and 118 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively. The saltbased ion output flux of catchment area A was approximately twice that of catchment area B. This difference was likely caused by the different distribution patterns of the paddy fields. Placing paddy fields on the bottom of the catchment area can reduce agricultural saltbased ion runoff. The dominant anions and cations in the runoff water body of the basin were Cl⁻ and Ca²⁺, which accounted for 58% and 67% of the total anion and cation emissions, respectively. In terms of different crop seasons, the rice/maize season and mustard season each contributed approximately 50% of the annual saltbased ion emissions. In terms of different periods, the ion load was highest in May and November, accounting for 26% and 24% of the ion discharge load of the entire year, respectively. Studies have shown that May and November are the key time nodes to control the loss of salt ions in the watershed. The continuous arrangement of paddy fields at the bottom of the catchment is an important spatial layout to reduce the loss of farmland salt ions.

Keywords: Three Gorges Reservoir; non-point source pollution; agricultural watershed; salt-based ions

收稿日期:2019-11-27 录用日期:2020-02-19

作者简介:窦添元(1996—),女,吉林四平人,硕士研究生,从事农业面源污染和农田温室气体排放研究。E-mail:1508649523@qq.com

^{*}通信作者:木志坚 E-mail:muzj@swu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800606)

Project supported : National Key R&D Program of China (2018YFD0800606)

农业面源污染因具有持续时间长、影响范围广和 治理难度大等特点,而受到管理部门和专业人士的广 泛关注,面源污染现已成为水体污染的重要污染 源[1-4]。大量的营养元素、农药、重金属和盐基离子等 随降雨径流进入水体,使水域生态系统功能弱化。目 前国内关于农业面源污染的研究常侧重于估算氮磷 的面源污染负荷[5-11],而针对盐基离子面源污染的报 道甚少。大量研究表明,水体中离子含量逐增对流域 水环境有严重影响,Ca²⁺、Mg²⁺的大量流入增加了水体 硬度,CI⁻的持续增加影响了水生生物的生命活动,SO²⁻ 含量的不断升高加剧了混凝土基建的腐蚀[12-14];作为 饮用水源,水中离子含量过高影响饮用口感,如果Cl⁻ 和NO3含量过高将不适于人类饮用[13,15-16]。然而离子 流失带来的负面影响不仅是水质的恶化,还会导致 土壤质地改变和养分枯竭,进而影响农作物生长, Ca²⁺的大量流失会导致土壤酸化;植物体内的必需元 素主要通过根部从土壤中吸收,土壤养分枯竭会严 重抑制植株生长[17-20]。

三峡工程位于长江西陵峡中段秭归县三斗坪,是 具防洪、发电、供水等巨大综合利用效益的大型工程, 蓄水运行以来库区流域水环境问题备受瞩目^[21-22]。 本研究选择三峡库区典型农业小流域——王家沟小 流域两个具有相同气候、土壤耕作环境的集水域为 研究对象,开展自2012年3月21日至2014年3月20 日两年每日出水水质阴阳离子检测分析试验,以探 究水域盐基离子排放规律,为我国农业小流域盐基 离子流失特征提供依据,为三峡库区农业面源污染 治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究流域概况

王家沟小流域地处重庆市涪陵区珍溪镇,位于长 江北岸,三峡库区腹心。流域年均气温22.1℃,属亚 热带季风性气候。年均降雨量1101.0 mm,雨水充 沛,降雨主要集中在4-10月。流域内地势较为平 坦,大部分区域坡度在20°以内,其余少数在20°~40°。 地貌类型以低山丘陵为主,海拔高度在153~330 m。 流域土壤为侏罗系蓬莱镇组棕紫色砂泥岩相发育的 棕紫泥,盐基丰富,pH 5.60~8.50,有机质 8.2~32.4g. kg⁻¹, 总氮 0.7~2.3 g·kg⁻¹, 总磷 0.3~1.7 g·kg⁻¹, 总钾 6.8~22.7 g·kg⁻¹,碱解氮、有效磷、有效钾含量丰富^[21]。 流域内无工矿企业,土地利用以农业耕地为主。农作 物种植模式较为单一,春季种植水稻、玉米,秋季种植 榨菜。其中水稻、玉米氮肥施用量分别为117 kg· hm⁻²和230 kg·hm⁻²(复合肥,N:P₂O₅:K₂O=11:9:5),榨 菜氮肥施用量约390 kg·hm⁻²(复合肥,N:P₂O₅:K₂O= $12:6:7)_{\odot}$

利用1m数字高程模型结合ArcGIS-Hydrology tools对流域内水文信息进行分析,可将该流域分为两 个子集水域,标记为集水域A和集水域B(图1)。两



图1 王家沟流域采样点位置及土地利用分类

Figure 1 Distribution of sampling sites and classifications of land use in the Wangjiagou watershed

集水域土地利用面积及比例如表1所示,其中集水域 A稻田零散分布,而集水域B稻田集中成片分布于集 水域底部。计算两集水域稻田破碎度指数(PD)以便 更直观地了解稻田破碎化程度,以单位面积上的斑块 数为度量^[23],集水域A的稻田破碎度指数(1.74)远高 于集水域B(0.19)。

1.2 样品采集及测定

分别在集水域A和集水域B的径流汇出口(图1) 安装超声波水位流量计(LC-50型,中国)和自动采水 仪(ISCO6712型,美国),测定汇出口径流量并采集径 流水样。设置自动采水仪程序,使其在2012年3月 21日至2014年3月20日期间每日4时、12时及20时 采集等量径流水并混合作为一个时间混合水样。自 动采水仪的储水基座内置有冰袋并定期更换,使水样 在低温环境下储存。定期将水样带回实验室并在24 h内完成测定。阴(阳)离子测定仪器为Dionex公司 的DX-120型离子色谱仪。降水量数据来源于设置 在流域内的自动气象观测站。

1.3 数据分析处理

使用 SPSS 23.0 和 Sigma Plot 10.0 进行数据分析 处理和作图。每季作物栽种期为一个作物季,为方便 统计,将休田期计入对应作物季,每年3月21日至9 月20日为水稻/玉米季,9月21日至次年3月20日为 榨菜季。离子平均浓度采用加权平均法计算,具体公 式如下:

$$\overline{C} = \frac{\sum C_i \times Q_i}{\sum Q_i}$$

式中: \overline{C} 为离子加权平均浓度,mg·L⁻¹, C_i 为第i日径流水样离子浓度,mg·L⁻¹; Q_i 为第i日径流水样的净流量,m³。

离子累积输出通量计算公式: $\nabla C_i \times O_i$

$$L = \sum \frac{C_i \land Q_i}{S}$$

式中:L为集水域单位面积离子累积输出通量,g·hm⁻²; C_i 为第i日径流水样离子浓度,mg·L⁻¹; Q_i 为第i日径流水样的净流量,m³;S为集水域面积,hm²。

2 结果与讨论

2.1 降雨量及流域汇出口径流量

王家沟小流域2012年3月21日至2013年3月20 日(后称第一年)降雨量为970 mm,其中水稻/玉米季 降雨量占79%,降雨天数80d;榨菜季降雨量占21%, 降雨天数68 d。2013年3月21日至2014年3月20日 (后称第二年)降雨量相比于第一年降低了16%,其中 水稻/玉米季降雨量占全年的73%,降雨天数66 d;榨 菜季降雨量占全年的27%,降雨天数64 d。日降雨量 超过50 mm的强降雨都出现在第一年的水稻/玉米季, 分别是2012年5月7日和2012年9月10日(图2)。

集水域A汇出口径流模数为0~38.7 m³·hm⁻²·d⁻¹, 平均日径流模数4.0 m³·hm⁻²。每年4—6月和10—12 月径流量大,约占全年72%;7—8月和1—2月径流量 小,约占全年4%。集水域B汇出口径流量远小于集 水域A,径流模数为0~18.7 m³·hm⁻²·d⁻¹,平均日径流 模数2.5 m³·hm⁻²,径流模数随季节变化特征与集水域 A相同,每年4—6月和10—12月径流量大,约占全年 81%;7—8月和1—2月径流量小,约占全年8%。利 用SPSS进行相关性分析,结果显示流域汇出口径流 模数与降雨量存在极显著正相关关系(P<0.01)。

2.2 流域汇出口径流盐基离子浓度动态变化

集水域A汇出口径流水体Ca²⁺浓度为50.6~240.3 mg·L⁻¹;Na⁺浓度为4.4~200.1 mg·L⁻¹;K⁺浓度为0.01~ 79.3 mg·L⁻¹;Mg²⁺浓度为5.0~37.0 mg·L⁻¹;Cl⁻浓度为 11.7~647.2 mg·L⁻¹;NO⁻3浓度为0.04~116.0 mg·L⁻¹; SO²-浓度为2.1~219.4 mg·L⁻¹。除NO⁻3外其他6种离子 第一年水稻/玉米季排放浓度随时间先降低后升高,

表 1 土家沟流域土地村用面枳及比例

Table 1 Land use area and proportion in the Wangjiagou watershed

土地利用方式	全流域Wangjiagou watershed		集水域AC	atchment A	集水域 B Catchment B		
Land use	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	
旱地 Dry land	47.9	66.3	14.1	62.7	33.8	67.9	
稻田Paddy	17.7	24.5	6.9	30.7	10.8	21.7	
林地 Woodland	2.5	3.5	0.2	0.8	2.3	4.6	
坑塘Pond	0.7	0.9	0.5	2.3	0.2	0.4	
居民点 Living area	2.8	3.9	0.7	3.1	2.1	4.2	
未利用地 Unused	0.7	0.9	0.1	0.4	0.6	1.2	
总和Sum	72.3	—	22.5	—	49.8	—	



Figure 2 Variation of precipitation and runoff modulus at outlets

增至浓度峰值后再次降低(图3)。两个浓度最高值 产生时间的径流模数很低,分别为3月底和8月底。 NO₅第一年水稻/玉米季排放浓度随时间先增高后降 低,而后再升高后降低,有两个排放浓度峰值,分别在 5月初和9月中。大量研究表明,田间施肥量、施肥时 间和肥料种类对农田NO3输出影响显著[24-26]。流域 水稻/玉米季施肥活动从3月底持续到4月底,因此该 作物季NO;浓度在5月前一直缓慢上升,施肥活动结 束后才开始下降,浓度随时间变化规律与其他几种离 子相差较大。榨菜季7种离子浓度随时间先升高,在 11月中旬达到浓度排放峰值后降低。其中Ca²⁺、Cl⁻两 种离子浓度峰值较大;其他5种离子浓度峰值较小, 排放随时间变化相对平缓。与水稻/玉米季相反,榨 菜季浓度排放峰值对应时期的径流模数很大。土壤 的盐基离子淋失是一个复杂的地球化学过程。在长 期淋溶下,径流水体盐基离子会在某一时刻出现浓度 峰值,而后由于稀释作用增强会使离子浓度显著降 低[27-30]。此外,图2结果表明径流模数与降雨量呈极 显著正相关,降雨量最大时其径流模数通常也达到峰 值。因此在雨水充沛的水稻/玉米季,径流量大时通 常意味着稀释作用很强,径流水体离子浓度排放峰值 的出现会早于径流模数峰值。而榨菜季降雨强度较 小,稀释作用较弱,几种离子浓度排放峰值与径流模 数峰值产生时间更为接近。第二年水稻/玉米季 Na⁺、 K⁺、Cl⁻浓度排放峰值远低于第一年,离子浓度相关性 分析显示, Cl⁻与 Na⁺和 K⁺分别呈极显著正相关(P< 0.01)和显著正相关(P<0.05),这表示 NaCl、KCl的迁 移对流域水体离子组成影响深刻。结合图2推测第 一年3种离子排放浓度峰值较高是由于第一年3月 20日前人类活动导致流域NaCl、KCl施入过多。

集水域B汇出口径流水体Ca²⁺浓度为22.4~184.6

mg·L⁻¹; Na⁺浓度为 3.37~66.3 mg·L⁻¹; K⁺浓度为 0.01~28.1 mg·L⁻¹; Mg²⁺浓度为 3.4~38.2 mg·L⁻¹; Cl⁻浓度为 67.5~399.2 mg·L⁻¹; NO₃ 浓度为 0.04~87.8 mg·L⁻¹; SO₄²⁻浓度为 32.8~299.5 mg·L⁻¹。离子浓度随时间变化规 律与集水域 A 相同,各离子输出浓度变化更为平缓。

表2分别计算了监测期间两集水域汇出口径流 水体各离子的加权平均浓度,并与同样位于三峡库区 段的张家冲小流域和沋河流域下游农田灌溉区离子 含量进行了比较。集水域A的Ca²⁺、K⁺、Cl⁻、NO₃⁻浓度 为集水域B的1.2~2倍,Na⁺、SO²-浓度与集水域B相 近,Mg²⁺浓度略低于集水域B。流域(农田>90%)各盐 基离子浓度远高于同样位于三峡库区段但土地利用 以林地为主(林地>60%)的张家冲小流域,其中CI-是 张家冲小流域的20倍,除此之外的其他离子是张家 冲小流域对应离子浓度的2~8倍。与同样受农业影 响较大的沋河流域下游李家堡-张南村段相比,王家 沟小流域Na⁺和K⁺浓度低于该流域农灌区70% 左右, Mg2+约为沋河流域农灌区的50%, NO3和SO4-与沋河 流域农灌区相近,Ca²⁺和Cl⁻高于沋河流域农灌区。推 测其原因是王家沟小流域的土质侏罗系遂宁组紫色 土富含碳酸钙^[33],土壤酸化后Ca²⁺淋失量较大,而当 地广泛的榨菜种植可能是较多CIT的来源之一。

2.3 流域盐基离子累积输出通量

流域单位面积盐基离子累积输出通量如表3所示。集水域A第一年K⁺输出通量为11.4 kg·hm⁻²,是 第二年的2倍;第二年的NO₃输出通量(67.1 kg·hm⁻²) 相比第一年增加了31%,推测其原因是两年气候条件 (温度、降水强度等)不同或两年田间管理(施肥种类 及方式等)发生变化导致,具体原因有待深入研究;其 他5种离子第一年和第二年的输出通量相差不大。 集水域B各离子输出通量皆小于集水域A,两年的输



Figure 3 Change of ions concentrations at outlets

表2 本研究与其他水域离子浓度比较

Table 2 Comparison of ion concentration in this study with other waters

研究区域	浓度 Concentration/mg·L ⁻¹							
Study area	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg^{2+}	Cl-	NO_3^-	SO_4^{2-}	
集水域A	102.9	27.8	6.1	11.8	200.0	40.1	98.9	
集水域B	80.8	27.5	4.0	15.8	166.2	20.4	101.0	
王家沟小流域	91.9	27.7	5.1	13.8	183.1	30.3	100.0	
张家冲小流域[31]	31.2	4.1	0.9	8.1	8.8	4.1	39.1	
沋河流域下游农溉区[32]	50.4	103.0	18.8	28.8	82.5	34.9	95.6	

出通量相差不大。计算两年各离子输出通量平均值, 集水域A的Ca²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO²44种离子输出通量平均 值是集水域B的1.5~2倍,K⁺、NO³是集水域B的2.5~3 倍。集水域A阴、阳离子年均输出通量分别为499 kg·hm⁻²·a⁻¹和218 kg·hm⁻²·a⁻¹,其中水稻/玉米季和榨 菜季阴(阳)离子分别占全年输出通量的51%(50%) 和49%(50%)。集水域B阴、阳离子年均输出通量分 别为265 kg·hm⁻²·a⁻¹和118 kg·hm⁻²·a⁻¹,其中水稻/玉 米季和榨菜季阴(阳)离子分别占全年输出通量的 53%(54%)和47%(46%)。流域Ca²⁺年均输出通量占 阳离子年均输出通量的67%,为流域优势阳离子;Cl⁻ 年均输出通量占阴离子的58%,为流域优势阴离子。

大量研究表明,景观类型面积指数、破碎度和分 离度对生态敏感性的影响很大,径流水体水质与景观 1326

农业环境科学学报 第39卷第6期

Table 3 Comparison of ion output fluxes of different crop seasons in two waters										
研究区域 Study area	时间	作物季	离子累积输出通量Cumulative ion output flux/kg·hm ⁻²							
	Time	Crop season	Ca ²⁺	Na^{*}	\mathbf{K}^{\star}	Mg^{2+}	Cl⁻	NO_3^-	SO_4^{2-}	
集水域 A	第一年	水稻/玉米季	74.6	23.0	6.5	8.0	142.3	28.6	68.2	
		榨菜季	68.9	21.7	4.9	9.1	147.4	22.6	66.0	
	第二年	水稻/玉米季	79.6	17.9	3.5	8.5	143.3	38.6	77.1	
		榨菜季	79.8	18.7	2.8	9.2	155.1	28.5	80.0	
集水域 B	第一年	水稻/玉米季	33.4	11.5	2.3	6.2	78.6	9.3	39.8	
		榨菜季	31.6	12.3	1.5	6.5	64.9	6.7	41.7	
	第二年	水稻/玉米季	48.0	13.3	2.1	8.6	96.4	14.0	52.2	
		榨菜季	36.5	13.5	1.3	8.0	66.0	7.9	53.2	

表 3 两集水域不同作物季离子输出通量比较 able 3 Comparison of ion output fluxes of different crop seasons in two water

破碎度呈显著负相关(P<0.01)^[23,34-36]。李洪庆等^[37]在 对水环境质量控制的高集约化农业景观格局优化研 究中发现,农田破碎度(PD)能够反映出景观完整性 和均匀度,一般田区越破碎、类型越复杂、斑块分布越 零散,污染物输出越多。大量研究表明,稻田作为一 种人工湿地,蓄水量和水体滞留时间相对较长,可以 充分发挥植物对污染物的吸收作用,其向环境输出的 污染物少,而固定、汇集的污染物多[5,10,24]。罗柏林 等[25]在对本研究区域稻田景观格局对流域磷素输出 的相关研究中发现,稻田空间分布格局对径流磷浓度 和输出强度有重要影响,稻田常可作为磷素的汇,对 地表径流起到一定的拦截作用。本研究中,两集水域 地理位置毗邻,气候环境条件相同,农耕方式相近,土 地利用中农田占比接近,但集水域A稻田零散分布, 破碎度指数为1.74,而集水域B田区连片分布于集水 域底部,破碎度指数(0.19)远低干集水域A。推测两 集水域不同的稻田景观格局是集水域A离子累积排 放负荷高于集水域B约2倍左右的原因。由此可见, 在规划农耕区土地利用时,应设计稻田位置尽量贴近 出水口且成片连接,以减少农田径流营养盐流失。

流域盐基离子每月排放负荷占全年比如图4所示。流域1—3月和8月为低排放负荷期,占全年排放 负荷10%以内。其中集水域A各离子该时期排放负 荷仅占全年的1%~2%,远低于集水域B(5%~10%), 其原因是集水域A汇出口沟渠在该时期常干枯无流 量。流域盐基离子月排放峰值为每年的5月和11月, 分别占全年的26%和24%。其中NO3的5月排放负 荷占全年比要高出11月15%左右,推测其原因是5月 雨水丰足,并且此时仍处于水稻/玉米季的施肥期,稻 田内富集的氮素易随田内水体溢过田埂径流。

Rao等[38]在对赣江离子径流效应和控制机制研究

中指出,径流水体中离子主要来源为面源污染时离子 排放通量与河水流量间呈线性关系且相关系数较高; Ding等^[39]在对辽河流域水化学特征及控制因素的研 究中发现,径流是影响化学风化的主要参数之一,控 制辽河盆地碳酸盐岩风化速率的主导参数是径流。 为探究径流对王家沟小流域离子排放负荷的影响,建 立流域离子排放通量-流量一元线性回归模型*L=aQ+* yo^[40]。其中*a*为回归系数,反映了单位流量变化对离 子排放通量的影响程度,将其命名为流量影响因子。 影响因子越大,流量对离子排放通量的影响越大,反 之则越小。*R*²为拟合度,反映了回归方程的拟合效 果。

7种离子中Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO²⁻5种离子的拟 合度较高(R²>0.8),表示流量对这几种离子排放的影 响较大;K*、NO3两种离子拟合度稍低,其中集水域A 的 K^{+} 在榨菜季拟合度(R^{2})仅为0.32,表明除流量外两 种离子排放受其他因素影响较大(图5)。流域以农 田为主,肥料中含有大量的N、K,施肥时间、施肥种 类、施肥量对两种离子的排放有直接影响。流域 Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO²⁻5种离子榨菜季流量影响因子 高于水稻/玉米季,表示榨菜季径流对这些离子排放 通量的影响要大于水稻/玉米季。这是因为5种离子 在榨菜季浓度与径流模数呈正相关,离子浓度峰值与 水量峰值同期,而水稻/玉米季则相反,离子浓度与径 流模数呈负相关,根据公式 $\Delta L=\Delta c \times \Delta Q$,可知榨菜季 的单位流量变化对负荷的影响大于水稻/玉米季。 NO3、K⁺水稻/玉米季流量影响因子大于榨菜季,推测 其原因是流量的增加通常由晒田期稻田排水和降雨 量增加引起,因施肥田内水体中常含有较多的氮素和 钾素,稻田排水时将其部分带入径流水体。而降雨量 的增加意味着当田埂较低或者年久失修时,大雨可能



Figure 4 Monthly discharge of salt-based ions in the river basin as a percentage of the whole year

会使田面水层溢出田埂。因此水稻/玉米季流量对 NO₃、K⁺两种离子排放的影响大于榨菜季。这表明在 规划流域稻田分布的同时应注意加护田埂,特别是在 施肥期,以降低稻田内水溢出发生频次和强度。若所 处地区降雨强度大且经常有特大暴雨发生时,应注意 考虑稻田对河流水体环境存在的潜在威胁,此时应通 过更改施肥方式,采用叶色卡指导施用氮肥技术、水 田复合氮肥增效技术等水肥高效利用技术来代替传 统施肥^[9,21],以提高化肥利用率,减少化肥施用,从而 降低面源污染输出。

3 结论

(1)集水域A 阴、阳离子年均输出通量分别为 499 kg·hm⁻²·a⁻¹和218 kg·hm⁻²·a⁻¹,集水域B 阴、阳离 子年均输出通量分别为265 kg·hm⁻²·a⁻¹和118 kg· hm⁻²·a⁻¹。水稻/玉米季和榨菜季分别贡献了全年盐 基离子输出负荷的一半左右;月排放峰值为5月和11 月,分别占全年排放负荷的26%和24%。

(2)两集水域地理位置毗邻、气候环境相同、农田 管理方式相似,但集水域B稻田破碎度低且田区成片 分布于集水域底部,其盐基离子输出通量仅为集水域 A的一半,说明这种景观分布格局对径流水体起到一 定的拦截净化作用。

参考文献:

- [1] 龚世飞, 丁武汉, 肖能武, 等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业 面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12):2816-2825. GONG Shi-fei, DING Wu-han, XIAO Neng-wu, et al. Characteristics of surface runoff and agricultural non-point source pollution in the core water source area of the Danjiangkou Reservoir[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(12):2816-2825.
- [2] 徐长春, 熊 炜, 郑 戈, 等. "农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发"专项组织实施进展分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1242-1246.
 XU Chang-chun, XIONG Wei, ZHENG Ge, et al. Progress of the program for research and development on comprehensive prevention and remediation techniques for agricultural non-point source and heavy
 - metal polluted croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1242–1246.
- [3] Wang W, Wu X H, Yin C M, et al. Nutrition loss through surface run off from slope lands and its implications for agricultural management [J]. Agricultural Water Management, 2019, 212:226-231.
- [4] 郑云虹, 刘思雨, 艾春英, 等. 基于政府补贴的农业面源污染治理机 理研究:从市场结构的视角[J]. 生态经济, 2019, 35(9):199-205.
 ZHENG Yun-hong, LIU Si-yu, AI Chun-ying, et al. Study on the





mechanism of agricultural non-point source pollution control based on government subsidy: From the perspective of market structure[J]. Ecological Economy, 2019, 35(9):199-205.

[5] 朱金格, 张晓姣, 刘 鑫, 等. 生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的 去除效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2):405-411. ZHU Jin-ge, ZHANG Xiao-jiao, LIU Xin, et al. Removal of nitrogen



续图5 流域流量与离子排放负荷关系



and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2):405-411.

- [6] Soper F M, Chamberlain S D, Crumsey J M, et al. Biological cycling of mineral nutrients in a temperate forested shale catchment[J]. Journal of Geophysical Reasearch-Biogeosciences, 2018, 123(10):3204-3215.
- [7] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1760-1769.

XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, et al. Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4):1760–1769.

[8] 王 萌, 王敬贤, 刘 云, 等. 湖北省三峡库区 1991—2014 年农业 非点源氮磷污染负荷分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 294-301.

WANG Meng, WANG Jing-xian, LIU Yun, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus pollution loads from agricultural non-point sources in the Three Gorges Reservoir of Hubei Province from 1991 to 2014[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):294-301.

- [9]梁增芳,肖新成,倪九派,等.水土流失和农业面源污染视角下三峡 库区农户施肥行为探讨[J].中国水土保持,2019(1):55-57.
- LIANG Zeng-fang, XIAO Xin-cheng, NI Jiu-pai, et al. Discussion on fertilization behavior of farmers in the Three Gorges Reservoir area from the perspective of soil erosion and agricultural non-point source pollution[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(1):55-57.
- [10] 陈成龙,高 明, 木志坚,等. 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[J]. 环境科学, 2017, 38 (8):3254-3263.

农业环境科学学报 第39卷第6期

CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, et al. 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[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8):3254–3263.

- [11] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(1):138-146.
 HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River small watershed of the Three Georges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1):138-146.
- [12] Ebrahim F S, Zohreh S A, Massoud B, et al. Assessing the hydrogeological conditions leading to the corrosion and deterioration of precast segmental concrete linings (case of Zagros Tunnel) [J]. *Geotechnical* and Geological Engineering, 2019, 37(5):3961–3983.
- [13] Zhang W Z, Yin C M, Chen C L, et al. Estimation of long-term Ca²⁺ loss through outlet flow from an agricultural watershed and the influencing factors[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(11):10911-10921.
- [14] Johnson U, Kitheka. Salinity and salt fluxes in a polluted tropical river: The case study of the Athi River in Kenya[J]. *Journal of Hydrolo*gy: *Regional Studies*, 2019, 24: 100614. doi: 10.1016/j.ejrh. 2019. 100614.
- [15] Rifat A W, Bhat M S, Aasimah T, et al. Drinking quality assessment of some groundwater sources along the stretch of Jhelum River in Kashmir Himalaya[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(18): 630-640.
- [16] David M B, Mitchell C A, Gentry L E, et al. Chloride sources and losses in two tile-drained agricultural watersheds[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1):341–348.
- [17] 吕明轩.钙、硅、镁和营养液浓度对无土栽培西甜瓜裂果、生长发育和品质的影响[D].海口:海南大学, 2018.
 LÜ Ming-xuan. Effects of chemical elements (Ca²⁺, Si²⁺, Mg²⁺) and concentration of nutrient on fruit cracking, growth and quality of watermelon and melon in soilless culture[D]. Haikou: Hainan University, 2018.
- [18] Heike T B, Jazmine K, Kristina S, et al. Experiences with prenatal and postpartum contraceptive services among women with a preterm birth[J]. Women's Health Issues, doi:10.1016/j.whi.2019.11.002.
- [19] 陈德伟, 汤寓涵, 石文波, 等. 钙调控植物生长发育的进展分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(11):3593-3601.
 CHEN De-wei, TANG Yu-han, SHI Wen-bo, et al. Progress in the

regulation of calcium growth and development[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(11):3593-3601.

- [20] 李学文, 游西龙, 王 艳. 钾离子转运载体 HAK/KUP/KT 家族参与 植物耐盐性的研究进展[J]. 植物科学学报, 2019, 37(1):101-108.
 LI Xue-wen, YOU Xi-long, WANG Yan. Research progress of HAK/ KUP/KT potassium transporter family in plant response to salt stress
 [J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(1):101-108.
- [21] 谢德体. 三峡库区农业面源污染防控技术研究[M]. 北京:科学出版社, 2014:24-30.

XIE De-ti. Research on agricultural non-point source pollution pre-

vention and control technology in Three Gorges Reservoir area[M]. Beijing :Science Press,2014:24-30.

- [22] 徐勤学,李春茂,李朝霞,等. 三峡库区紫色土坡地作物覆盖与管理因子C值估算[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2):175-179. XU Qin-xue, LI Chun-mao, LI Zhao-xia, et al. Calculation and analysis of C-value of crop cover management factor in purple soil of sloping land in Three Gorges Reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2):175-179.
- [23] 徐亚男, 刘学录, 李晓丹, 等. 祁连山东段生态敏感性对景观动态 变化的响应[J]. 生态科学, 2019, 38(5):160-167.
 XU Ya-nan, LIU Xue-lu, LI Xiao-dan, et al. Response of ecological sensitivity to landscape dynamic change in the eastern section of Qilian Mountain [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(5):160-167.
- [24] 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 Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, 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.

- [25]罗柏林,尚二凤,林 晓,等.三峡库区不同稻田分布格局下农业 小流域径流磷排放特征[J].农业环境科学学报,2017,36(2):338-344.
 - LUO Bai-lin, SHANG Er-feng, LIN Xiao, et al. Characterization of runoff phosphorus export from small agricultural catchments with different spatial distribution patterns of rice paddies in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 338-344.
- [26] 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):257-264.
- [27] Zhang W Z, Yin C M, Chen C L, et al. Estimation of long-term Ca²⁺ loss through outlet flow from an agricultural watershed and the influencing factors[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(11):10911-10921.
- [28] 刘 炜,周运超,张春来.石灰土盐基离子迁移对模拟酸雨的响应
 [J].中国岩溶, 2018, 37(3):336-342.
 LIU Wei, ZHOU Yun-chao, ZHANG Chun-lai. Response of base cations migration of lime soil to simulated acid rain[J]. Carsologica Sini-
- [29] Campbell J L, Yanai R D, Green M B. Uncertainty in the net hydrologic flux of calcium in a paired-watershed harvesting study[J]. *Eco-sphere*, 2016, 7(6):1299-1314.

ca, 2018, 37(3): 336–342.

- [30] 黄来明,张甘霖,杨金玲,等.亚热带典型花岗岩小流域径流化学特征与化学风化[J].环境化学,2012,31(7):973-980.
 HUANG Lai-ming, ZHANG Gan-lin, YANG Jin-ling, et al. Chemical characteristics and chemical weathering of surface runoff in typical granitic watersheds of subtropical China[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(7):973-980.
- [31] 李荣飞, 王志强. 张家冲小流域主要离子水文地球化学特征及成

2020年6月 窦添元,等:三峡库区农业小流域盐基离子排放特征研究

1331

因分析[J]. 水利科技, 2019(2):21-25, 28.

LI Rong-fei, WANG Zhi-qiang. Analysis of the main ion hydrogeochemical characteristics and causes of Zhangjiachong small watershed [J]. *Hydraulic Science and Technology*, 2019(2):21–25, 28.

[32] 部 毓, 崔国屹, 王康振, 等. 沈河流域下游水化学特征及影响因素分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(31):107-114.
 GAO Yu, CUI Guo-yi, WANG Kang-zhen, et al. Hydrochemical char-

acteristics and their influencing factors in the lower reaches of Youhe River Basin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(31): 107–114.

[33] 李忠章, 程永毅, 杨剑虹. 重庆地区中性紫色土酸化特征[J]. 水土 保持学报, 2012, 26(6):234-242.

LI Zhong-zhang, CHENG Yong-yi, YANG Jian-hong, et al. The acidification characteristics of neutral purple soil in Chongqing district[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):234–242.

- [34] 周俊菊,向 鹃,王兰英,等.祁连山东部冰沟河流域景观格局与河流水化学特征关系[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12):3779-3788.
 ZHOU Jun-ju, XIANG Juan, WANG Lan-ying, et al. Relationship between landscape pattern and hydrochemical characteristics: A study case from the Binggou River Basin in the eastern Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(12):3779-3788.
- [35] Doody D G, Withers P J, Dils R M, et al. Optimizing land use for the delivery of catchment ecosystem services[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(6):325-332.

[36] 原雅琼, 孙平安, 苏 钊, 等. 岩溶流域洪水过程水化学动态变化 及影响因素[J]. 环境科学, 2019, 40(11):4889-4899. YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, et al. Dynamic change of hydrochemical characteristics and influence factors in karst watershed flood process[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11):4889-4899.

[37] 李洪庆, 刘黎明, 郑 菲, 等. 基于水环境质量控制的高集约化农业景观格局优化研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1):44-52.
LI Hong-qing, LIU Li-ming, ZHENG Fei, et al. Agricultural land-scape pattern optimization of high intensive agricultural area based on water quality control[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1):44-52.

- [38] Rao W B, Zheng F W, Tan H B, et al. Major ion chemistry of a representative river in south-central China: Runoff effects and controlling mechanisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 378: 120755– 120765.
- [39] Ding H, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Geochemistry of the dissolved loads of the Liao River basin in northeast China under anthropogenic pressure; Chemical weathering and controlling factors[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 138:657–671.
- [40] 刘雨桐. 基于集成模拟的城市水污染负荷控制规划方法研究[D]. 北京:清华大学, 2017:58-62.

LIU Yu-tong. A study on integrated modeling based planning for urban water pollution control[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 58-62.