

雨季喀斯特小流域氮输出特征及其受降雨的影响

曾杰^{1,2}, 吴起鑫^{1,2}, 李思亮², 岳甫均³

(1. 贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室, 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081; 3. School of Geographical and Earth Sciences University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom)

摘要: 以黔中典型喀斯特农业小流域后寨河流域为研究区域, 探讨喀斯特小流域氮素输出形态特征及降雨对氮素输出的影响。通过对流域内落水洞、地表水和地下水水样各形态氮素的浓度进行监测, 估算雨季氮素输出量, 结合降雨量数据分析氮输出受降雨的影响。结果表明: (1) 后寨河喀斯特小流域水体氮含量明显高于我国主要河流, 流域地下水出口溶解性总氮(TDN)浓度均值为 6.5 mg/L; 地表水出口 TDN 浓度均值为 7.3 mg/L。 (2) 氮素输出的主要形态为硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)以及有机态氮(DON)输出占比极低。 (3) 流域内 TDN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, DON 雨季输出量估算值分别为 55.13, 52.12, 0.40, 0.01, 2.61 t。 (4) 持续性的多日降雨加速了水体氮素流失强度, 流域上游水体硝态氮浓度在降雨事件发生后呈上升趋势, 随着降雨事件的停止而呈下降趋势; 流域总出口因降雨而产生的硝态氮浓度变化具有一定的滞后性。

关键词: 喀斯特; 后寨河流域; 氮输出; 降雨

中图分类号: X142; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0073-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.013

Characteristics of Nitrogen Export and the Effects of Rainfall during the Rainy Season in a Karst Small Catchment

ZENG Jie^{1,2}, WU Qixin^{1,2}, LI Siliang², YUE Fujun³

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; 3. School of Geographical and Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom)

Abstract: In order to reveal the effects of rainfall on nitrogen export and the characteristics of nitrogen export in a Karst small catchment, this paper studied a typical small agricultural catchment in the Karst area, Houzhai catchment in Guizhou Province. This study monitored and tested concentrations of various forms of nitrogen in samples from sinkhole, surface water, and groundwater to estimate the annual flux of nitrogen during the rainy season, and investigated the effects of rainfall on nitrogen export with regional precipitation data. The results indicated that: (1) Nitrogen concentration in the Houzhai catchment was considerably higher than those in the large rivers in China; The average concentration of TDN was 6.5 mg/L in the groundwater system and 7.3 mg/L in the surface water system. (2) The main nitrogen form was $\text{NO}_3^- - \text{N}$, with a small amount of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, and DON export in the Houzhai small catchment. (3) The estimated flux of the TDN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, and DON output was 55.13, 52.12, 0.40, 0.01, and 2.61 t, respectively, in the Houzhai catchment during the rainy season. (4) The continuous precipitation over a couple of days accelerated nitrogen loss in the Karst area. The $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in the upstream increased after the beginning of rainfall events and decreased after the termination of precipitation. Moreover, there was an observable hysteresis between the change in $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration with the occurrence of rainfall at the outlet of the catchment.

Keywords: Karst; Houzhai catchment; nitrogen export; rainfall

小流域是河流、水库水体来源的重要贡献单元, 其地表水系统、地下水系统水体和泥沙中所包含的营

养物质会以各种形式输出到大江大河、大型湖泊中, 导致水体富营养化倾向和水质退化^[1], 即非点源污

收稿日期: 2016-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(41173021, 41403105); 国家自然科学基金中英重大国际合作项目(41571130072)

第一作者: 曾杰(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水环境地球化学研究。E-mail: zengjie94@163.com

通信作者: 吴起鑫(1984—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水环境地球化学研究。E-mail: wuqixin03@163.com

染。因此控制小流域非点源污染输出意义重大。非点源污染不仅受坡度^[2-3]、坡长等地形地貌^[4]、土壤水分^[5]、基质条件^[6]、降雨变化^[7]、雨量^[8]、雨强^[3]等自然地理因素的影响,还主要受人类农业活动的影响^[9]。氮素作为一种典型农业活动输出的非点源污染物,受到了广泛的关注。目前我国氮素非点源污染的相关研究涉及了上述各类自然因素,同时许多学者针对农业活动对流域氮素非点源污染的影响及其机制开展了相关研究^[10-13],但对我国西南喀斯特石漠化生态脆弱区的相关研究较少,已有研究主要针对于石漠化地区土壤中的氮素迁移转化^[14-16]。刘丛强等^[17-18]在西南喀斯特地区开展了流域侵蚀过程中的氮素循环及土壤—植被系统氮循环的系统研究。在喀斯特小流域尺度上的月度采样研究发现,雨季硝酸盐浓度很高,但对其具体原因的认识,月度采样可能存在不足^[19]。因此,本研究以中国长江与珠江分水岭地区的贵州省普定县典型喀斯特农业小流域——后寨河流域为对象,探讨降雨较为集中且农业施肥活动强烈的 6—7 月份流域氮素输出形态和通量特征以及其受降雨的影响,为西南喀斯特流域氮素非点源污染的防范提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区后寨河喀斯特小流域位于贵州省安顺市普定县县城以南。流域内地层出露主要是二叠系及三叠系的灰岩、云岩。气候类型属北亚热带季风湿润气候,年平均气温 15.1℃,年均降雨量 1 400 mm,年均蒸发量 920 mm,约 80% 以上降雨集中在 5—10 月份^[20-21]。流域总面积约 81 km²,海拔 1 218~1 585 m,由东南到西北逐渐降低。流域区内土壤薄瘠,地表出露大量碳酸盐岩,上游地貌主要为漏斗、峰丛、洼地等组合类型,中游则是槽谷、峰林类型,下游为谷地、盆地、丘陵类型^[22]。后寨河流域是普定县主要产粮区之一,流域土地利用类型主要有耕地、灌丛、草地以及裸岩 4 种,其中耕地面积约为流域面积的 20.4%,2/3 的耕地为水稻田,大多分布在地表河流经的中下游地区^[23],上游零星分布有水田、旱地 320 多 hm²,粮食作物主要播种水稻、玉米,经济作物主要种植花生、油菜,农作物施肥主要集中于 5—7 月份。流域内水域分布也集中在中下游,上游主要发育垂直渗流的落水洞,分布比率达 4.47 个/km²,其降水通过落水洞渗流至地下,并迅速转化为地下水,无地表河发育,是流域地下水系源头区^[24],且落水洞发育点周边的村庄、水田相对集中。流域起源于东部,其地下水在地下系统中汇聚流到东偏南部的母猪洞水库附近后,一部分继续在地下水系统中流动,流经流域西南区域

后,于西北部再次出露到地表(⑥);另一部分出露到地表,在流域中部与来自东北部的地表支流相汇流经青山水库后以地表河流的形式流至西北部(④)后与再次出露到地表的地下水系统相汇,再由总出口(⑤)流出流域^[25]。流域西北部的总出口的流量占到了流域总水量的 95% 以上,仅在西南流域边界处有部分地下水流出流域^[19](图 1)。

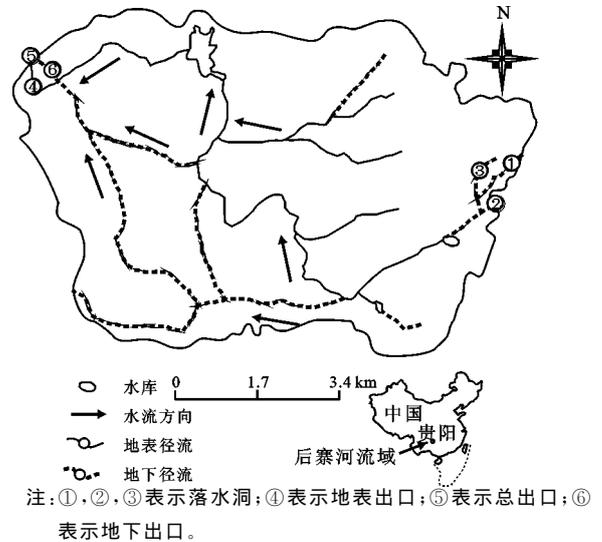


图 1 后寨河流域水系及采样点示意

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与测试 本研究的采样主要集中于 2 个区域(图 1)。一是流域东部的上游,采集了流域源头的 3 个落水洞(①,②,③)的水样;二是流域西北部,分别采集了地表水与地下水相汇点上游 50 m 处(④,地表出口)、地表水与地下水相汇并充分混合处(⑤,总出口)、地下水出露点(⑥,地下出口)的水样。2014 年 6—7 月份,视降雨情况(包括无雨、雨前、雨中、雨后)在 6 个采样点分别采样 8 次,共采集了 48 个水样,每次取样 120 mL,装入经预处理后的聚乙烯瓶,密封。现场测定水温、pH 值、电导率、溶解氧等参数。样品带回实验室后用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤,随后测定溶解性总氮(TDN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)。样品测定在中科院地球化学研究所进行,使用荷兰 Skalar SAN++ 连续流动营养盐分析仪测定。

1.2.2 数据处理 采用 Excel 2010、Origin 8.1、CorelDRAW X6 软件对数据进行处理及作图。本研究所采用的降雨量数据来源于普定县气象局 2014 年全年的日降雨量数据。

2 结果与分析

2.1 后寨河流域 TDN 浓度

溶解性总氮(TDN)是衡量水质的重要指标之一^[26],可作为流域氮素输出的表征指标。以 TDN 质量浓度值表征后寨河流域的整体氮素含量水平。图

2 为流域上游 3 个分散的落水洞(①,②,③)水样的 TDN 浓度值柱状图,其中①号点浓度范围在 9.1~19.7 mg/L,均值 12.5 mg/L;③号点范围与①号浓度相近 9.0~19.0 mg/L,均值 14.3 mg/L;②号点范围较①号和③号点浓度要低,范围为 3.1~9.8 mg/L,均值 6.9 mg/L。图 3 为流域地表出口④,总出口⑤、地下水出口⑥水样的 TDN 浓度值柱状图。流域地表出口的浓度范围为 6.1~10.0 mg/L,均值 7.3 mg/L;总出口浓度范围为 5.5~9.5 mg/L,均值 7.2 mg/L;地下水出口浓度范围为 4.9~7.6 mg/L,均值 6.5 mg/L,总体来看,地下水出口 TDN 浓度略低于地表水出口。

由图 2、图 3 可知,流域上游落水洞水体的 TDN 浓度普遍高于地下出口水体 TDN 浓度,这可能与上游农业活动相关,氮肥的施用及流失造成了 TDN 浓度值的增高。地表出口水体与出露的地下水混合之后到流域总出口时,水体 TDN 的浓度有一定的降低,其原因主要是由于前两者 TDN 浓度一高一低混合后所致。此外,降雨等因素对氮素流失的影响,后文将具体讨论。

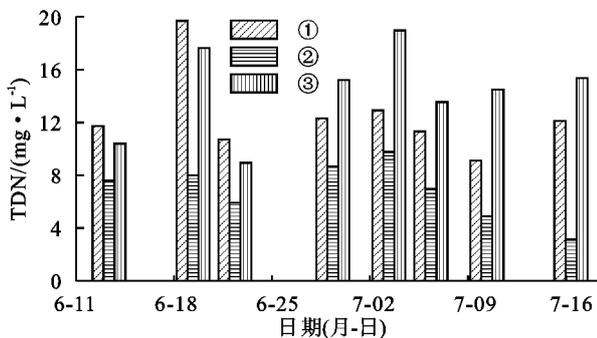


图 2 流域上游落水洞水样 TDN 浓度

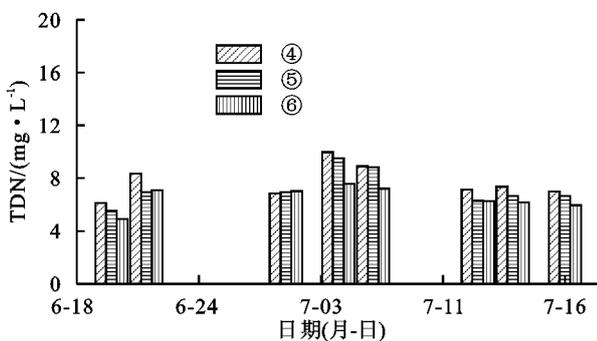


图 3 流域地表出口、总出口、地下水出口水样 TDN 浓度

就整个流域氮素的浓度水平而言,TDN 浓度值大大超出了总氮的国家地表水环境质量 V 级标准(≤ 2.0 mg/L),全流域水体均为劣 V 类水(GB 3838—2002),表明喀斯特农业小流域水体氮污染严重。流域总出口 TDN 浓度值(5.5~9.5 mg/L)相较于长江干流 TDN 浓度值(0.88~1.44 mg/L)^[27]、黄河干流(1.13~5.25 mg/L)等^[28]我国主要河流以及秦淮河(均值 3.46 mg/L)等^[29]城市河流总氮浓度值都高。

因此,小流域氮素的非点源污染控制,对大型水系的非点源污染控制具有重要的现实意义。

2.2 后寨河流域水体氮素形态特征

水体氮素的主要形态包括硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)以及有机态氮(DON),但多数情况下主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 这 2 种形态存在于水体中^[30-31]。本研究对采集水样的 TDN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 以及 DON(TDN 减去 3 种无机形态的氮)的输出浓度进行分析。结果表明,后寨河流域,地表水系统和地下水系统氮素输出的形态以硝态氮为主。由图 4 可知, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是水体氮素最主要的存在形态,仅有 2 个样品 DON 比例略高(24.3%和 18.7%)。在流域总出口水样中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均占比为 95.2%,而 DON、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仅占 4.0%和 0.8%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不足 0.02%;在流域上游落水洞水样中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均占比为 96.0%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 DON 平均占比则为 0.4%和 3.5%。造成这一现象的主要原因可能与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可经硝化作用转化成中间体 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 易氧化不稳定,在酶作用下形成易溶于水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

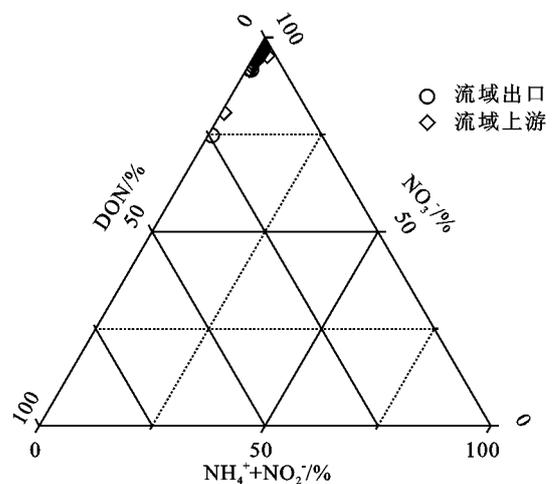


图 4 流域出口及流域上游水体各形态氮素占比

由表 1 可知,在地下出口水样中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在 TDN 中的占比较于流域总出口更高。地下出口水样中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占比全部达到了 96% 以上,最高为 99.4%,其平均占比为 97.9%。相应的其他形态 N 的输出强度相对较弱,地下水系统中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均占比仅为 0.8%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 所占比值均远远小于 0.1%。这是由于地下水系统的水体补给主要来源于地下河上方的土壤形成的壤中流,而土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在水中的溶解度很大,但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 带有正电荷,易被带负电的土壤胶体表面所吸附, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 却带负电,不易为土壤所固持,从而最易被降雨淋滤形成的壤中流带入到地下水系统中^[32]。

表 1 后寨河地下水水样各形态 N 与 TDN 浓度比
单位: %

日期(月-日)	NO ₃ ⁻ -N/TDN	NH ₄ ⁺ -N/TDN	NO ₂ ⁻ -N/TDN
6-20	99.0	1.2	0.05
6-21	96.8	0.7	0.02
6-30	96.7	0.7	0.01
7-04	97.4	0.6	0.03
7-05	99.4	0.9	0.02
7-13	97.0	0.9	0.03
7-14	99.1	0.8	0.03
7-16	97.8	1.0	0.04

2.3 后寨河流域雨季氮素输出量估算

根据流域 2014 年降雨量为 1 345.4 mm, 历年均蒸发量为 920 mm, 后寨河全流域的径流排泄区面积^[33]约 21.80 km²。估算得后寨河流域 2014 年径流总量近 927 万 m³。流域多年水文资料^[21]表明, 6—7 月份的径流量占全年径流量的 82.5%, 结合流域总出口 6—7 月份水体各形态氮素的平均浓度, 雨季流域各形态氮素输出量估算公式为:

$$T = c \times (P - e) \times S \times 10^{-3} \times 82.5\%$$

式中: T 为雨季氮素输出量(t); c 为流域地表水各形态氮的平均浓度(mg/L); P 为流域年降雨量(mm); e 为流域年蒸发量(mm); S 为流域径流排泄区面积(km²)。

由图 5 可知, 后寨河流域 2014 年雨季 TDN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 以及 DON 输出量分别为 55.13, 52.12, 0.40, 0.01, 2.61 t。其中 NO₃⁻-N 输出量占比最多, 高达 95%, NO₂⁻-N 输出量占比最少, 不足 0.02%。相较于非雨季的枯水期, 相关的研究^[19]表明后寨河流域的 NO₃⁻-N 浓度仅为 1.83 mg/L, 由此可估算出非雨季流域 NO₃⁻-N 输出量为 16.96 t, 流域全年 NO₃⁻-N 输出量为 69.08 t, 雨季占比为 75.4%。

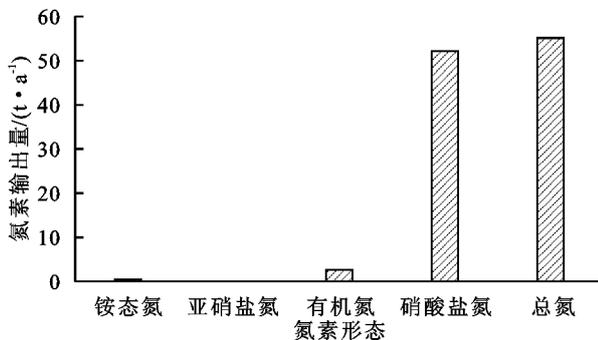
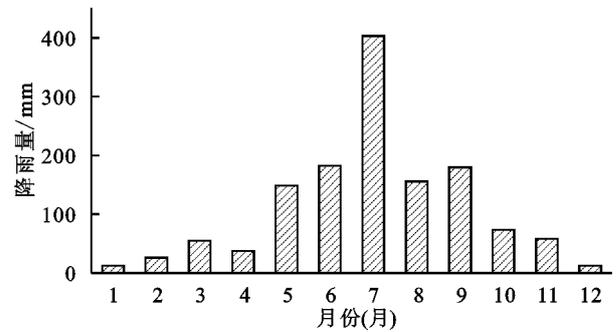


图 5 2014 年后寨河流域总出口各形态氮素输出量

2.4 雨季降雨对流域氮素输出的影响

2.4.1 流域氮输出的时空差异 由图 6 可知, 2014 年后寨河流域全年降雨量为 1 345.4 mm, 降雨最多月份为 7 月份, 降雨量为 403.1 mm, 最低为 12 月份, 降雨量为 12.3 mm。雨季(5—10 月份)降雨总量为 1 143.5 mm, 占全年降雨量 85%。其中采样期间降雨量为 428.1 mm(6 月 9 日—7 月 17 日)占全年降雨量的 32%。

6 月份和 7 月份是后寨河流域全年降雨量最大的月份, 大量的降雨导致地表、地下径流量的增加, 对水体中的污染物造成一个稀释的过程, 同时增加了水体的环境容量, 提高对污染物的降解作用, 降低了水体中的氮素的浓度。但流域水体的氮浓度还与流域的氮输入量的有关, 6 月份和 7 月份稻谷的插秧育苗等农事活动中施入的大量农家肥、氮肥、农药亦会进入地表及地下水体, 导致水体中的氮含量增加, 增大水体氮浓度。并且由于降雨较多, 某些形态的氮素如硝酸盐、铵等还可以通过大气降水的淋滤作用进入地表水系统。



注: 数据来源普定县气象局。

图 6 后寨河流域 2014 年降雨量分布

为探讨后寨河流域氮素输出变化受降雨的影响, 结合流域氮素输出以 NO₃⁻-N 为主的特征, 对样品 NO₃⁻-N 浓度变化与采样期降雨量的相互联系进行分析。由图 7 可知, 流域上游水体氮素输出浓度受降雨影响较为明显, 当有降雨事件发生时, 水体 NO₃⁻-N 浓度呈现出显著的上升趋势, 而随着降雨的停止, NO₃⁻-N 浓度呈现下降的趋势。表明了降雨加速了流域氮的流失, 当流域发生降雨后, 赋存于地表土壤中极易随水流失的 NO₃⁻-N 在雨水淋滤、坡地汇流的作用下大量的输入地表河水中, 并随着持续的降雨其输入量随之增大, 导致了流域地表水中氮素浓度的增高, 在持续性的多日降雨后期, 氮素浓度往往会达到最高值; 降雨结束后, 进入连续无雨时期, 土壤氮素输出量的减少, 以及地表径流携带氮素流向下游, 流域上游地表水氮浓度便出现了持续性的降低, 水质得到恢复, 在下一场持续性降雨来临之前, 氮素浓度出现最低值。

由图 8 可知, 在流域出口的地下径流和地表径流水体中, 降雨的发生, 使 NO₃⁻-N 浓度升高, 但在响应时间上出现了延迟, 相对于降雨的发生有一定的滞后性, 如 6 月 20 日的样品, 在降水时采集的样品浓度略低于降雨停止 1 d 后采集的样品。此外也有与流域上游水样类似的现象, 即降雨结束后水体氮素浓度低于降雨时水体氮素的浓度, 如在 7 月 4 日降水发生时所采集的样品的氮素浓度较 7 月 5 日降雨停止后

采集样品的浓度高。存在这种差异的原因可能是由于地表水径流量随着持续性的降雨在短时间内不断增加,加上氮素浓度相对较低的地下水的混合,到总出口处时,水体的环境容量得以增大,对其中的氮素起到了稀释作用,虽然在流域上游表现为降雨后,氮素浓度便不断增高,但在总出口处得以体现还需一个汇流的过程,因此产生了图中所示的浓度升高的滞后。而在地下水系统中,产生同样差异性的原因可能是由于降雨所产生的雨水淋滤地表之后,下渗汇聚到地下水系统中还需要一定的时间。这样的差异性一方面与降雨强度有关,也可能与研究施肥活动的强度等其他因素有关,还有待工作的进一步深入研究。

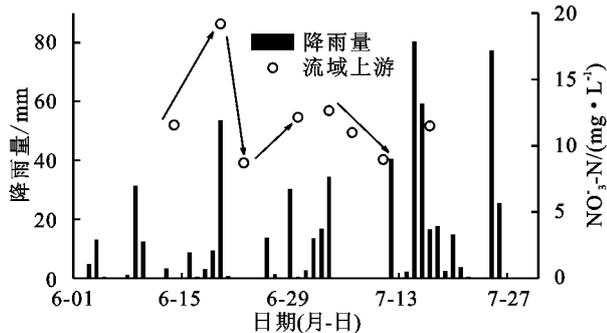


图7 后寨河流域上游落水洞硝态氮与降雨量关系

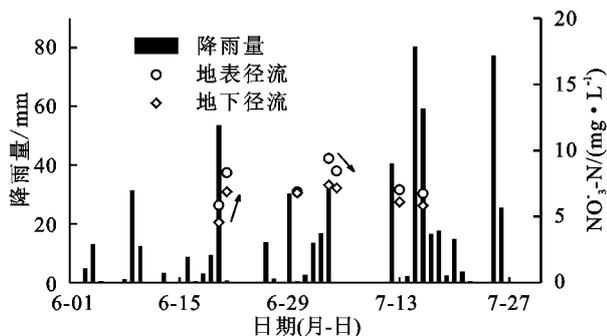


图8 后寨河地表径流及地下径流硝态氮与降雨量关系

2.4.2 流域氮流失的异质性 在持续性降雨的情况下,土壤含水量很快便会达到饱和,形成壤中流,进而形成地表径流,经流域地表河流及地下暗流流出流域,因此流域总出口氮素浓度应与流域上游样品的浓度相近。综合图7和图8来看,流域上游水体浓度较流域总出口氮素浓度高出近1倍,其原因一方面可能与流域内农业分布不均有关,上游地区水田分布零星,但村庄及水田都相对集中于落水洞发育点附近,农业退水及村民的生活排水所携带的氮素极易通过落水洞汇集渗流到地下径流中,同时地下径流流经的中下游,即流域西南部农事活动强度弱;另一方面还可能与地下径流水体所处的厌氧环境下发生的一些氮循环过程如反硝化作用存在一定关系;此外地质构造及地貌条件也可能是引起差异的重要因素。同时,在持续性降雨的过程中,大气中的硝酸盐、铵会伴随降水的淋滤作用进入地表水系统,普定县内降雨氮素

的相关研究^[19]表明,大气湿沉降的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 0.98 mg/L , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度为 0.43 mg/L ,对径流水体氮素也有一定的贡献。而在形成壤中流过程中,一部分携带高浓度的氮素的水体,经土壤下渗后沿着岩溶裂隙向更深层的地下水流失,而汇聚流向地表总出口的地下径流氮素仅是其中一部分。喀斯特地下水作为喀斯特地区饮用水的重要来源,如氮素大量的流失进入深层地下水将对地区的饮用水安全造成极大威胁。造成流域上游和流域总出口两者间氮素浓度显著差异的原因,还有待开展更加深入的研究。

3 结论

(1)后寨河喀斯特农业小流域水体含氮量高于我国主要河流,地下水出口TDN浓度范围为 $4.9 \sim 7.6 \text{ mg/L}$,均值 6.5 mg/L ;流域总出口浓度范围为 $5.5 \sim 9.5 \text{ mg/L}$,均值 7.2 mg/L 。表明喀斯特农业小流域水体氮污染严重且雨季氮流失严重。

(2)后寨河流域氮素输出主要形态为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,流域总出口水样 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均占比达95.2%。

(3)雨季后寨河流域TDN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 以及DON输出量估算值分别为55.13, 52.12, 0.40, 0.01, 2.61 t。

(4)持续性的多日降雨加速了水体氮素流失,呈现出流域上游水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度随降雨的出现而上升,随着降雨的停止而下降的关系,因此丰水期水体氮输出的控制对流域氮素污染的有效控制起到至关重要的作用。流域总出口氮素浓度与流域上游氮素浓度的差异性以及总出口 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对降雨的响应关系存在一定的滞后性与诸多因素有关,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 宋泽芬,王克勤,杨云华,等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 98-101, 158.
- [2] Singh V P, Liu Q Q. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2004, 9(5): 375-382.
- [3] 代数,蒋光毅,夏清,等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产生沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1-5.
- [4] 林军,倪伟,宋传松,等. 北方土石山区不同坡长径流小流域水土流失规律研究[J]. 水土保持应用技术, 2009(3): 7-9.
- [5] 张玉斌,郑粉莉,曹宁. 近地表土壤水分条件对坡面农业非点源污染物运移的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 376-383.
- [6] 王夏晖,尹澄清,颜晓,等. 流域土壤基质与非点源磷污

- 染物作用的 3 种模式及其环境意义[J]. 环境科学, 2004, 25(4): 123-128.
- [7] Xie H, Wang Y L, Zhang H W, et al. Effects of rainfall change on agricultural non-point source pollution in Liangping County[J]. Meteorological & Environmental Research, 2013, 4(10): 41-44.
- [8] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 927-934.
- [9] 李越. 渭河氮素非点源污染与流域人类活动的关系[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [10] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 西苕溪流域土地利用对氮素输出影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 3498-3502.
- [11] 徐幸仪, 王建群, 胡小丽. 镇江丘陵区农业流域土地利用对氮素输移的影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 112-115.
- [12] 许昌敏, 王震洪, 阴晓路, 等. 大冲流域不同土地利用类型土壤的氮素淋溶模拟研究[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(4): 146-150.
- [13] 杨金玲, 张甘霖, 张华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 16-23.
- [14] 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3411-3421.
- [15] 林昌虎, 涂成龙, 陆晓辉, 等. 贵州西部喀斯特石漠化地区退耕弃荒地土壤氮素变异特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 14-17, 88.
- [16] 罗绪强, 王世杰, 王程媛, 等. 喀斯特石漠化过程中土壤氮同位素组成及其空间分异特征[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1235-1243.
- [17] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 521-552.
- [18] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤—植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 308-353.
- [19] Yue F J, Li S L, Liu C Q, et al. Sources and transport of nitrate constrained by the isotopic technique in a karst catchment: an example from Southwest China[J]. Hydrological Processes, 2014, 29(8): 1883-1893.
- [20] Wu Q X, Han G L, Tao F X, et al. Chemical characterization of rainwater in a Karst rural site: a case study of puding, China[J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 26-32.
- [21] 陈洪元, 陈邦宇, 陈波. 贵州省普定后寨岩溶小流域水文特性研究[J]. 贵州地质, 2005, 22(4): 284-288.
- [22] 汪文富. 贵州普定后寨河流域土壤侵蚀模型与应用研究[J]. 贵州地质, 2001, 18(2): 99-106.
- [23] 蒙海花, 王腊春, 霍雨. 不同土地利用情景下岩溶水文资源的响应研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 17-21.
- [24] 李大军. 西南岩溶山区典型小流域水资源可利用量研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [25] 王腊春, 李道元, 左平, 等. 岩溶山区石漠化治理生态需水量初步研究: 以贵州普定后寨河流域为例[J]. 水资源保护, 2004, 20(5): 10-15, 69.
- [26] 许梅, 任瑞丽, 刘茂松. 太湖入湖河流水质指标的年变化规律[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(6): 121-124.
- [27] 沈志良, 刘群, 张淑美. 长江总氮和有机氮的分布变化与迁移[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(6): 577-585.
- [28] 夏星辉, 周劲松, 杨志峰, 等. 黄河流域河水氮污染分析[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 563-568.
- [29] 李跃飞, 夏永秋, 李晓波, 等. 秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 91-97.
- [30] 罗璇, 史志华, 尹炜, 等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 58-62.
- [31] 杨珊珊. 城郊区小流域水体氮磷输出特征及其影响因素[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [32] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 195-200.
- [33] 李大军, 杨先寿, 苏维词, 等. 西南岩溶山区生态用水及其分配协调性评价: 以贵州普定后寨地下河流域为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 285-290.

(上接第 72 页)

- [15] Fu S, Liu B, Liu H, et al. The effect of slope on interrill erosion at short slopes[J]. Catena, 2011, 84(1): 29-34.
- [16] 姜佰文, 赵赛东, 魏丹, 等. 坡度和耕作措施对土壤侵蚀及大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(2): 238-242.
- [17] Berger C, Schulze M, Riekezapp D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [18] Zhao L S, Huang C, Wu F Q. Effect of microrelief on water erosion and their changes during rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(5): 579-586.
- [19] Strudley M W, Green T R, Ascough J C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(1): 4-48.
- [20] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems[J]. Catena, 2014, 115(4): 11-18.