

典型山地丘陵区农业小流域氮素迁移特征

李红^{1,2}, 王晓艺¹, 刘雅倩¹, 马菁¹, 王勇¹

(1.四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625600; 2.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 为探讨山地丘陵区农业小流域氮素迁移特征, 对典型山地丘陵区农业小流域降雨—径流事件、水体氮素形态与浓度、时间变异特征及其迁移通量进行了全年观测研究。结果表明: (1) 小流域水体氮素浓度存在显著季节变异特征, 全年总氮(TN)平均浓度为 2.14 mg/L, 硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)平均浓度为 0.77 mg/L, 铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)平均浓度为 0.25 mg/L, 溶解性有机氮(DON)平均浓度为 0.51 mg/L, 其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是氮素迁移的主要形态; (2) 小流域春季(3—5月)对全年氮素迁移通量贡献最高(43.56%), 而秋季(9—11月)贡献率最低(3.70%); (3) 降雨—径流事件和施肥等农事活动是小流域氮素迁移及其通量的重要驱动因子。

关键词: 山地丘陵区; 农业小流域; 径流过程; 氮流失; 时间变异

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0072-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.011

A Study on the Nitrogen Transportation Process and Flux in a Small Agricultural Watershed of Hilly Landscape

LI Hong^{1,2}, WANG Xiaoyi¹, LIU Yaqian¹, MA Jing¹, WANG Yong¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan 625600; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041)

Abstract: To better explore the characteristics of nitrogen transportation in a small typical agricultural catchment, the water nitrogen form, concentration and loss fluxes were continuously monitored for one year. The results showed that: (1) During the observation period, the significant seasonal variations in water nitrogen concentrations were observed and the year-round average concentration of total nitrogen (TN), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), and dissolved organic nitrogen (DON) are 2.14 mg/L, 0.77 mg/L, 0.25 mg/L, and 0.51 mg/L, respectively; the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ is the main form of transported N in the small catchment. (2) In the spring (March to May), the N transport fluxes contributed for 43.56% of the annual total nitrogen fluxes, while in autumn (September to November), the N transportation fluxes only accounted for 3.70% of annual total N transportation fluxes. (3) The run-off and human activity are the major drivers of the nitrogen transportation in the small agricultural watershed of hilly landscape.

Keywords: hilly landscape; small agricultural watershed; hydrological process; nitrogen loss; temporal variation

随着农业施肥、工业污染物及人畜粪便等点源与非点源氮素污染物排放量的增加, 河流氮营养盐浓度呈现急剧升高态势, 并导致了严重地表水体富营养化和地下水质量下降等水环境问题^[1-2]。许多学者^[3-4]针对我国长江、黄河、滇池、巢湖等不同流域氮素污染特征开展了大量研究发现, 氮肥使用与生活污水排放是流域氮迁移负荷的主要贡献源。农业非点源氮素污染主要是由于耕地土壤氮素流失进入地表和地下水体, 但迁移过程与途径复杂、不确定性高^[5-6]。因

此, 探明农业小流域氮素迁移特征及其通量是农业流域非点源氮素污染防控与负荷削减的基础^[7]。

目前已经对小流域氮素污染过程及其负荷开展了大量研究^[8-9], 且已取得较好的认识^[10], 但针对山地丘陵区农业小流域的相关研究较少, 无法准确识别山地丘陵区农业小流域氮素迁移特征, 限制了发展小流域尺度的非点源氮素污染控制措施。这些研究普遍存在未在全年尺度对小流域氮素迁移特征与通量进行研究, 尚不足以对山地丘陵区农业小流域氮素迁

收稿日期: 2019-12-04

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001); 国家自然科学基金项目(41701324)

第一作者: 李红(1992—), 女, 四川广汉人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: RedHongLi@163.com

通信作者: 马菁(1986—), 女, 四川夹江人, 博士研究生, 讲师, 主要从事农业环境保护研究。E-mail: majing718@126.com

移及其水环境效应进行定量认识并制定相应管理措施。因此,本文选取长江上游山地丘陵区典型农业小流域为研究对象,对该流域降雨—径流事件及其全年径流、水体氮素形态与浓度和氮素迁移通量开展了周年连续观测研究,旨在明确山地丘陵区农业小流域氮素迁移特征,准确定量农业小流域氮素迁移通量,为防控长江上游农业氮素非点源污染、建设清洁农业小流域提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验小流域位于四川盆地中部的中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站内截流小流域($105^{\circ}27'E$, $31^{\circ}16'N$)(图1),是典型山地丘陵区的缩影,其小流域农业结构极具代表性。位于嘉陵江一级支流——涪江支流弥江分水岭上,海拔400~600 m,面积约34.64 hm^2 ^[11],其中林地12.14 hm^2 ,旱地15.64 hm^2 ,两季田2.39 hm^2 ,水田1.54 hm^2 ,居民地1.71 hm^2 ,其他用地1.22 hm^2 ^[12]。植被为桉木和柏木混交林,主要农作物以玉米、小麦、油菜、水稻、甘薯为主^[13]。该区具有四川盆地典型的亚热带湿润季风气候特征,属中亚热带湿润季风气候,年平均气温17.3℃,极端最高气温40℃,极端最低气温-5.1℃,无霜期294 d^[14]。多年平均降水量826 mm,降水分布不均,春季约占5.9%,夏季约占65.5%,秋季约占19.7%,冬季约占8.9%。汛期暴涨暴落,四周支沟属雨水补给性溪流,三面环山,以自然分水岭为界,径流通过各种支沟汇聚于小流域最低处的唯一出口,具有较好的封闭性,并在流域出口建有径流观测控制站^[15]。

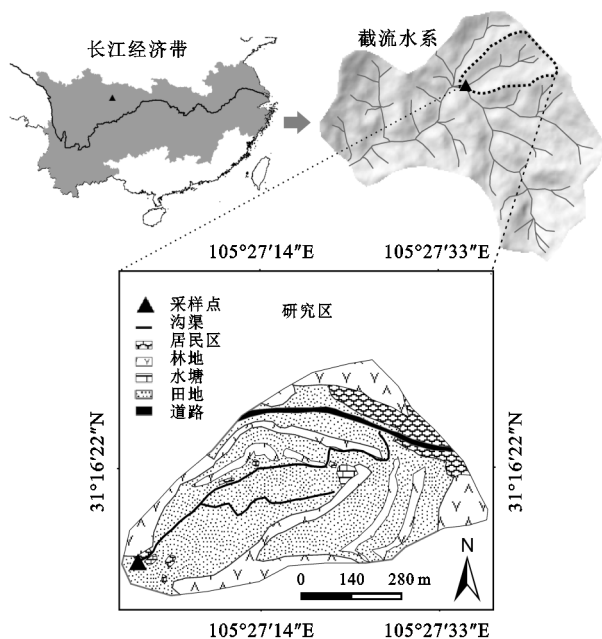


图1 截流小流域土地利用现状与采样点布置

1.2 采样分析方法

本研究对截流小流域径流量、水体氮素形态、浓度及迁移通量开展了连续1年的原位观测研究(2018年7月至2019年6月)。针对降雨—径流事件,由ISCO径流泥沙自动采样仪(Teledyne ISCO, Inc, USA)采集径流泥沙样品,具体为前12个样品每30 min采集1次,后12个样品每1.5 h采集1次。此外,按照在固定时间(早上8:00)每月4次的采样频率,在小流域堰口以人工方式采集水体样品300 mL于聚乙烯瓶中,分析前冷冻在-20℃的冰箱中,并于48 h内完成分析。小流域控制站布设有1台自记式浮子水位计(南京思摩特科技有限公司, WFX-40, 中国)按照10 min/次的频率自动记录水位用于计算径流量。此外,小流域内安装有自动气象观测站(Vasaila公司, MAWA301, 芬兰),可自动获取降雨等气象数据。水样中各氮素形态及其浓度测定方法为:TN为取10 mL原液于25 mL比色管,通过消煮氧化后用过硫酸钾氧化—紫外分光光度计法(GB 11894—89)测定;溶解态总氮DN为取过0.45 μm 滤膜(上海兴亚,超细玻璃纤维,中国)10 mL于25 mL比色管,通过消煮氧化后采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度计法(GB 11894—89)测定; NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、亚硝态氮(NO_2^--N)为取25 mL左右水样,过0.45 μm 的滤膜于10 mL的取样杯中,采用连续流动分析仪(Seal公司, AA3, 德国)测定。颗粒态总氮(PN) = $TN - DN$, $DON = DN - [(NH_4^+-N) + (NO_3^--N) + (NO_2^--N)]$ 计算得出。

1.3 数据处理方法

本研究堰口为直角三角堰,小流域径流量计算方法^[16]为:

$$Q = 1.4H^{5/2} \quad (1)$$

式中: Q 为径流量(m^3/s); H 为小流域控制站水位(m)。

降雨日径流量计算公式为:

$$V_i = \sum_j Q_j \times (T_j - T_{j-1}) \times 8.64 \times 10^4 \quad (2)$$

式中: V_i 为第*i*天的径流量(m^3); Q_j 为第*j*时刻的瞬时流量(m^3/s); T_j 为第*j*时刻; T_{j-1} 为第*j*-1时刻。

日氮素迁移通量^[17]计算公式为:

$$L_i = C_i V_i / (3.464 \times 10^4) \quad (3)$$

式中: L_i 为每日单位面积的氮素排放通量(kg/hm^2); C_i 为第*i*天的氮素浓度(mg/L)。

小流域氮素累积迁移通量的计算公式为:

$$L = \sum_{i=1}^n L_i \quad (4)$$

式中: L 为单位面积的氮素的累积排放通量(kg/hm^2)。

2 结果与分析

2.1 降雨—径流过程水体氮形态与浓度变化特征

以研究期内 4 次典型降雨事件为例(图 2),在降雨—径流过程中 TN 和 PN 浓度随流量变化显著,两者浓度变化与流量曲线趋势相似。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为氮素迁移的 2 种重要形态,但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是氮素迁移的主要形态,平均占 TN 浓度的 44.77%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度明显低于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,原因之一是铵态氮主要是吸附在泥沙颗粒上^[18],而土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 极易在降雨驱动下流失进入周边水体中^[19]。章熙峰等^[20]研究发现,紫色土区硝酸盐淋溶作用十分显著。4 次不同降雨事件过程中,截流小流域 TN、DN 及 PN 的迁移集中于初期径流,即初期径流携带大部分 TN、DN 及 PN 负荷,体现了显著的“初始冲刷效应”^[21]。这是由于降雨发生后,地表径流迅速带走污染物,随着降雨的进行,污染物量逐渐减少,造成径流中氮素浓度迅速降低。

基于 4 场典型降雨事件发现,水体 TN 和 DN 浓度较大的 2 次降雨,其径流量均较小,表明径流越大,浓度越小,呈现明显的降雨—径流稀释作用。水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 DN 浓度时间变化规律一致,其对 DN 贡献率为 59.67%,表明降雨—径流过程中,水体氮素迁移形态以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主。需要指出的是,中雨降雨事件(图 2b)径流水体 TN、DN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度均较高,可能是因为该次降雨径流量较小,同时前期无雨时间较长,流域内蓄存的氮负荷也较大所导致^[22]。

2.2 小流域水体氮素形态与浓度及其时间变异特征

观测全年氮素迁移特征(图 3)发现, DN 是小流域水体氮素主要迁移形态,占水体 TN 的 75.31%,表明小流域水体氮素主要以溶解态氮形式迁移。此外, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是水体溶解性氮的主要形态,全年对水体溶解性氮的平均贡献率为 40.63%,这与紫色土区土壤硝酸盐极易淋失有关^[23]。

流域中各氮素浓度随季节变化明显,冬季出口处 TN、DN、PN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为全年最高,分别为 (2.86 ± 1.54) , (2.11 ± 0.79) , (0.75 ± 1.14) , (1.32 ± 0.56) mg/L(表 1)。经调查可知,冬季降雨少,又在 11 月种小麦对农田进行了施肥,降雨将农田中氮肥冲刷进入流域中,所以冬季的 TN 浓度最高。由表 2 可知, TN 与 DN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈极显著相关($P < 0.01$),故 DN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也最高。秋季的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度全年最高,为 (0.32 ± 0.36) mg/L,夏季浓度最低,进一步分析得出,由于降雨集中在夏季,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高值出现相对滞后,可能是夏季

排放的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量虽大,但雨季径流量大,致使单位体积水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变小,入秋后降雨量急剧下降,但田面水持续排放,使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度达到较大值,而在春季和冬季变幅较小,可能是由于 NH_4^+ 易被土壤胶体吸附,在不断的吸附过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量变化不大^[24],且流域上游除居民点外多为旱地,氨挥发强烈, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 易转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随径流流失。夏季的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度为 (0.10 ± 0.13) mg/L、DON 浓度为 (0.80 ± 0.68) mg/L 时到达峰值,这是由于小春作物收割后大量施用肥料,其随径流流失后汇集于流域出口处,加之降雨量急剧增加,5 月底至 6 月温度升高,使得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 向 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化速度变快,致使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度在夏季最高, DON 浓度变化可能与不同位置土地利用方式和人类活动有关。

2.3 小流域氮素迁移通量及其时间变异特征

由图 4 可以看出,水体氮素的主要形态包括 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 DON,但多数情况下主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 DON 这 2 种形态存在于水体中^[25-26]。几种氮的累积通量呈现同步上升趋势,累积速率峰值对应通量峰值,有 3 次明显增幅分别为事件(1)、事件(2)和事件(3)。事件(1)发生于 7 月 30 日,累积通量曲线急剧上升 0.03 kg/hm^2 ,主要原因是在这天的暴雨共产生了 $1\,609.66 \text{ m}^3$ 的径流量。事件(2)发生于 12 月期间,由于截流小流域是集生活污水、农业用水和林地于一体的小流域,在 12 月降雨量明显增加,将地表和农户院中冬季积累的大量污水冲刷淋洗进流域内,加之 11 月种植小麦施肥,经降雨带入地表径流中。因此,各种氮通量均显著增加。事件(3)发生于 5 月 20 日,据实地考察显示,受流域沟渠上游灌溉水闸放水影响,出现全年监测的最大径流量 $4\,227.62 \text{ m}^3$,对应的 TN 通量为 0.20 kg/hm^2 。结合表 2 表明,流域农业管理活动会显著影响小流域的径流过程,也会显著影响水体中氮素的通量。因此,农业管理活动和降雨—径流过程均是驱动农业小流域氮素迁移的重要影响因素。

对流域出口不同形态的氮素通量与日径流量进行相关性分析(表 2)表明,日径流量与 PN 存在极显著相关性($P < 0.01$),但与其他氮素之间并无明显的相关性。TN 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 DON 间存在极显著的相关性,与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 存在显著相关性($P < 0.05$),与 PN 无明显相关性。DN 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 DON 存在极显著相关性($P < 0.01$)。探讨其成因可能是由于在降雨径流

的冲刷淋溶作用下,会带入大量的氮素污染物,但高强度的降雨也会稀释径流中的氮素浓度,且研究时间

较短,仅为 1 年,因此日径流量与除 PN 外其他氮素浓度间并无明显相关性。

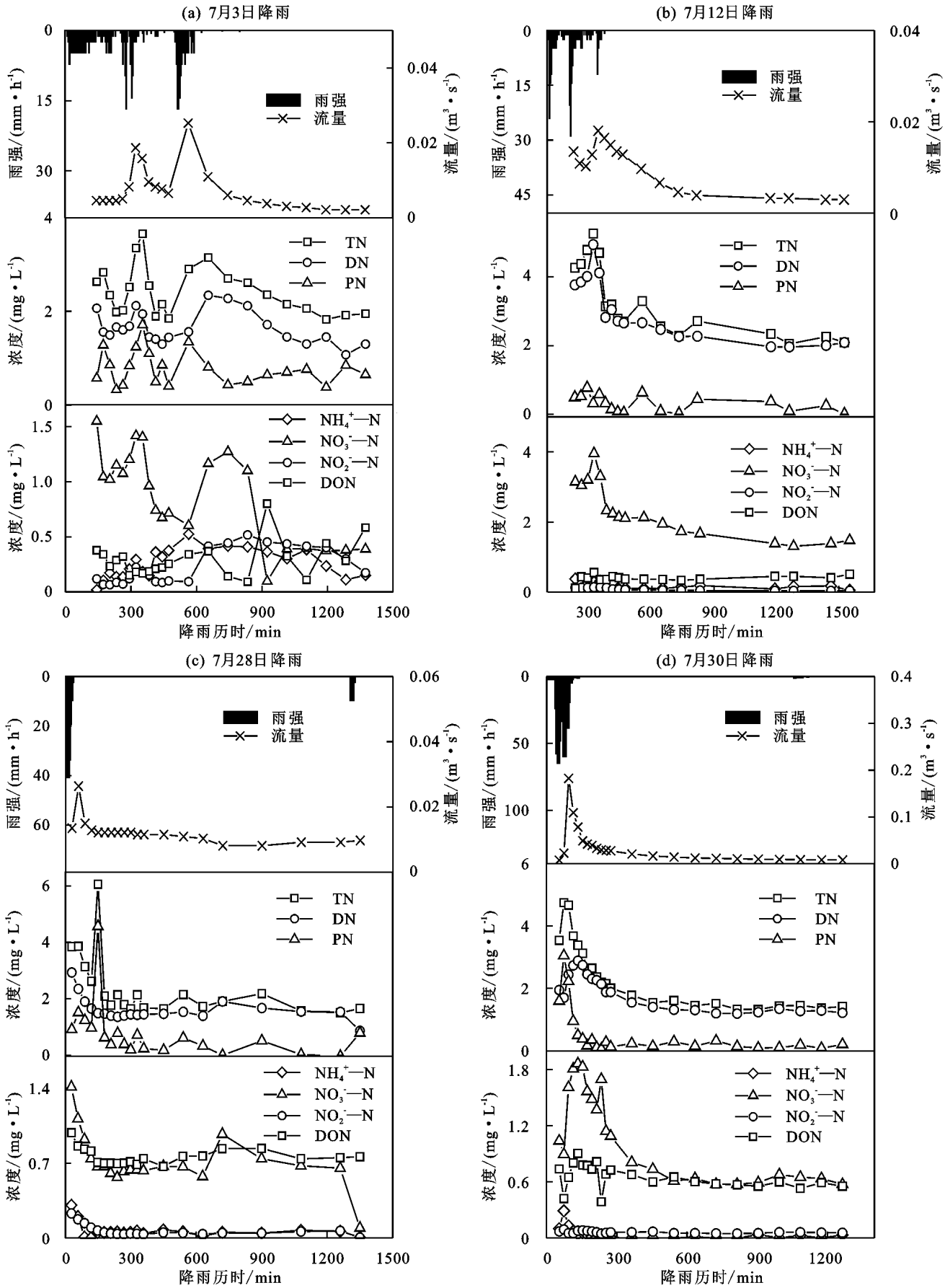


图 2 4 场降雨事件氮素浓度变化特征

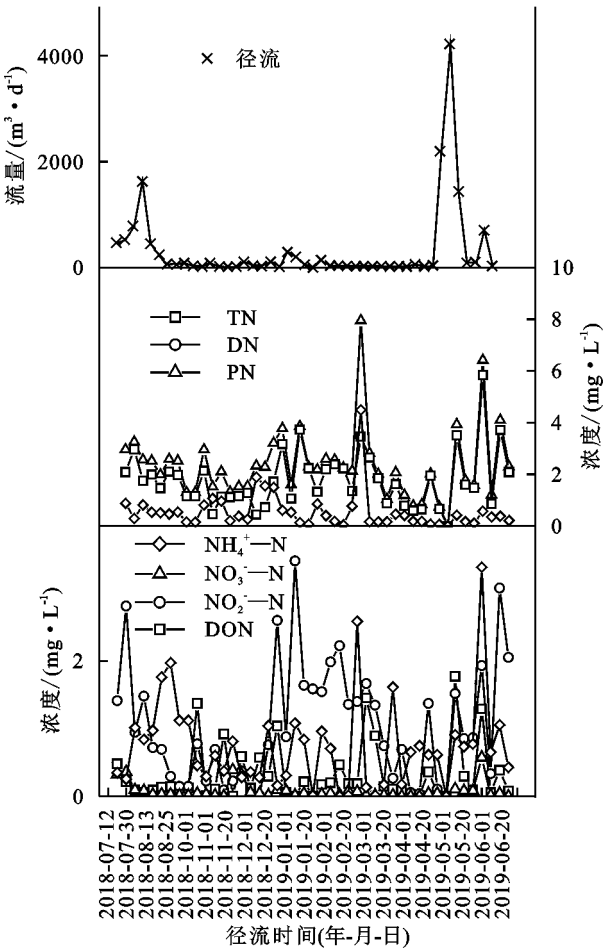


图3 氮素迁移全年特征

由图5可知,氮素流失比例按 $\text{NO}_3^--\text{N} > \text{PN} > \text{DON} > \text{NH}_4^+-\text{N} > \text{NO}_2^--\text{N}$ 分布。其中 NO_3^--N 对可溶态无机氮流失的平均贡献率为54.05%,月输出量占比的平均值为50.33%,是流域地表径流中氮素流失的主要形态^[27]。且 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 输出负荷占总氮输出负荷的58.47%,由此可见, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在流域水体对氮的贡献率极高。通过走访调查可知,流域内主要施用以硝态氮形式存在的复合肥,以此造成流域内硝态氮的迁移量大于铵态氮^[28]。上半年PN流失比例变化范围分别为4.05%~13.48%,平均月流失比例为9.19%,而下半年的变化范围则为8.45%~74.38%,平均月流失比例为29.64%,PN流失比例上半年明显低于下半年。 NO_3^--N 上半年平均流失比例明显高于下半年, NO_2^--N 比例全年普遍较低,

表2 全年不同形态氮素日输出通量与日径流量的相关性分析

相关系数	日径流量	TN	DN	PN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	DON
日径流量	1							
TN	0.056	1						
DN	0.167	0.835**	1					
PN	0.934**	0.010	0.102	1				
NH_4^+-N	0.145	0.386**	0.522**	0.183	1			
NO_3^--N	0.128	0.574**	0.775**	0.027	0.234	1		
NO_2^--N	0.046	0.314*	0.403**	0.001	0.231	0.140	1	
DON	0.053	0.616**	0.561**	0.040	0.057	0.059	0.290	1

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

约占总氮输出的2.96%。

表1 四季不同形态氮平均浓度变化

单位: mg/L				
指标	春	夏	秋	冬
TN	1.38 ± 0.92	2.50 ± 1.28	1.73 ± 0.52	2.86 ± 1.54
DN	1.19 ± 0.85	2.00 ± 1.27	0.98 ± 0.47	2.11 ± 0.79
PN	0.18 ± 0.14	0.50 ± 0.48	0.75 ± 0.57	0.75 ± 1.14
NH_4^+-N	0.24 ± 0.39	0.18 ± 0.25	0.32 ± 0.36	0.27 ± 0.33
NO_3^--N	0.49 ± 0.42	0.92 ± 0.73	0.21 ± 0.21	1.32 ± 0.56
NO_2^--N	0.03 ± 0.03	0.10 ± 0.13	0.07 ± 0.11	0.03 ± 0.02
DON	0.44 ± 0.34	0.80 ± 0.67	0.38 ± 0.22	0.49 ± 0.56

注: 表中数据为平均值±标准差; 春季为3—5月; 夏季为6—8月; 秋季为9—11月; 冬季为12—2月; 平均浓度=浓度平均值±标准差。

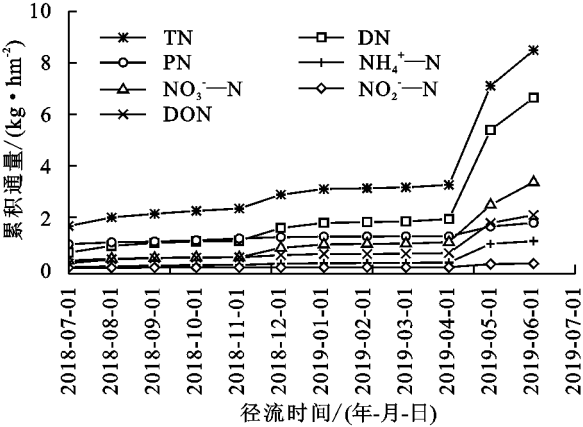


图4 全年氮素的累积通量

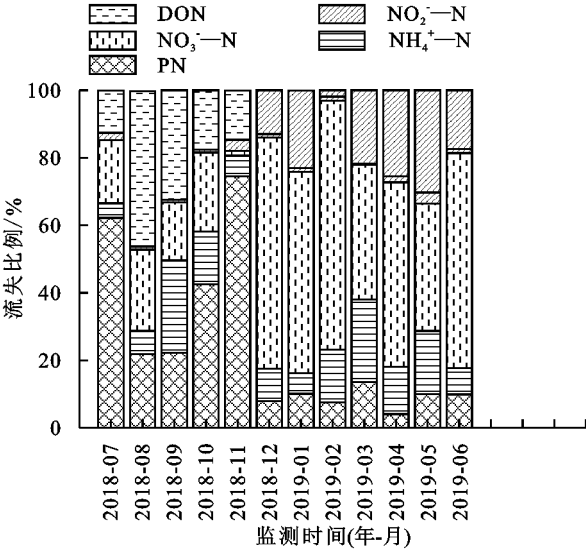


图5 各月氮素流失比例

3 结 论

(1)小流域出口处总氮输出年平均浓度为 2.14 mg/L,氮流失有多种形式,主要包括 NO_3^- —N、 NH_4^+ —N、PN 以及 DON,年流失平均比例分别为 46.24%,12.23%,14.44%和 24.16%。5—9 月占全年 TN 输出负荷的 87.37%,是流域氮素输出的主要时期。

(2)不同季节的氮素平均浓度和通量存在显著性差异。对总氮而言,在夏季流失通量最大,秋季则相反;全年氮素流失以 NO_3^- —N 为主,DON 浓度在夏季最高,秋季最低,TN、DN、PN、 NO_3^- —N 均在各季达最高浓度; NO_2^- —N 浓度则表现为夏季最高。

(3)4 次径流峰值所导致的 TN 迁移通量皆超过年平均迁移通量的 2.60 倍,故径流是流域非点源氮素输出的主要渠道及其驱动,在农业管理活动频繁时节(5 月和 12 月),TN 迁移通量输出分别高于平均月通量 4.16,30.33 倍,表明农业管理活动也对氮素迁移影响显著。

参考文献:

[1] Gu B J, Yang G F, Luo W D, et al. Rapid growth of industrial nitrogen fluxes in China: Driving forces and consequences[J]. Science China (Earth Science), 2013, 56(4):662-670.

[2] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle [J]. Nature, 2008, 451 (7176):293-296.

[3] 赖敏,王伟力,郭灵辉.长江中下游城市群农业面源污染氮排放评价及调控[J].中国农业资源与区划.2016,37 (8):1-11.

[4] 韩梅,周小平,程媛华,等.环太湖主要河流氮素组成特征及来源[J].环境科学研究,2014,27(12):1450-1457.

[5] Tang Z X, Zhang Y F, Zeng L F, et al. Investigation and analysis of three nitrogen pollution in groundwater in Ledong, Hainan Province[J].Agricultural Biotechnology,2019,8(3):135-137.

[6] Jacobsen B H, Hansen A L. Economic gains from targeted measures related to non-point pollution in agriculture based on detailed nitrate reduction maps[J].Science of The Total Environment, 2016,556:264-275.

[7] Zhang Z, Ma B, Hozalski R M, et al. Bench-scale column evaluation of factors associated with changes in N-nitrosodimethylamine (NDMA) precursor concentrations during drinking water biofiltration[J].Water Research, 2019,167. DOI:10.1016/j.watres.2019.115103.

[8] Nakagawa K, Amano H, Berndtsson R, et al. Use of

sterols to monitor surface water quality change and nitrate pollution source [J]. Ecological Indicators, 2019, 107.DOI:10.1016/j.ecolind.2019.105534.

[9] 曾杰,吴起鑫,李思亮,等.雨季喀斯特小流域氮输出特征及其受降雨的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):73-78.

[10] Ervinia A, Huang J L, Huang Y L, et al. Coupled effects of climate variability and land use pattern on surface water quality: An elasticity perspective and watershed health indicators[J]. Science of Total Encironment, 2019, 693. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133592.

[11] 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.

[12] 杨占彪,邵继荣,杨远祥,等.川中丘陵区典型小流域治理对地表水水质的影响[J].中国水土保持,2015(12):45-48.

[13] 蒋锐.紫色丘陵区农业小流域氮迁移的动态特征及其环境影响研究[D].重庆:西南大学,2012.

[14] 王芮,唐家良,章熙锋,等.亚热带农业小流域暴雨过程硝态氮迁移特征及水文示踪研究[J].水利学报,2016, 47(8):996-1004.

[15] 高扬,朱波,汪涛,等.估算紫色土流域地下水非点源污染负荷的降雨量参数法[J].农业环境科学学报,2010, 29(2):352-356.

[16] 颜文健.岩滩水电站量水堰法观测大坝渗流的技术改进[J].红水河,2016,35(2):76-79.

[17] 刘方谊,范先鹏,夏颖,等.三峡库区典型流域农业面源氮素输出特征[J].湖北农业科学,2018,57(10):31-36.

[18] 冯小杰,郑子成,李廷轩,等.暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J].中国农业科学,2018,51 (4):738-749.

[19] 黄昌勇,徐建明.土壤学[J].北京:中国农业出版社, 2010.

[20] 章熙锋,申东,唐家良,等.紫色土农业小流域径流过程与氮流失尺度效应[J].水土保持研究,2018,25(2):72-80.

[21] 王书敏,郭树刚,何强,等.城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象[J].环境科学研究,2015,28(4):532-539.

[22] 蒋锐,朱波,唐家良,等.紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J].水利学报,2009,40(6):659-666.

[23] 汪涛,朱波,罗专溪,等.紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J].土壤学报,2010,47(5):962-970.

变化特征,在 5 cm 土层处土壤水势日变幅较大,土壤水势值为 $-600 \sim -120$ kPa,各时段表现为 $MB > CK > DB$;在 15 cm 土层处,土壤水势变幅较小,其值为 $-180 \sim -90$ kPa,表现为 $DB > CK > MB$;在 30 cm 土层处,土壤水势基本稳定不变,MB 与 DB 处理稳定在 -100 kPa,CK 稳定在 -285 kPa。

(2)土壤水势年内变化呈现“下降—上升—再下降—再上升”的双峰双谷规律,谷值出现在土壤水处于冻结状态的冬季和蒸发强烈的夏季。3 组处理土壤水势年均值 5 cm 处表现为 $MB > CK > DB$,15 cm 处表现为 $DB > CK > MB$,30 cm 处表现为 $MB = DB > CK$,表明 MB 处理覆盖对表层土壤保湿效果显著。

(3)3 组处理在 0—30 cm 土层处,冻融期土壤水势受相对湿度及风速影响较大;非冻融期土壤水势受风速影响最大,其次是大气温度与相对湿度。

致谢:感谢长安大学研究生院、长安大学水与发展研究院、国家林业局榆林荒漠生态站对本试验项目的支持;感谢长安大学卢玉东教授、刘秀花教授、王浩工程师、苏凤梅博士在试验及数据分析过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 高国雄.毛乌素沙地东南缘人工植被结构与生态功能研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [2] 包含,张国彪,侯立柱,等.毛乌素沙地地下水浅埋区田间水分动态[J].地球环境学报,2018,9(4):372-382.
- [3] 包含,侯立柱,沈建根,等.毛乌素沙地农田土壤水分动态特征研究[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1301-1309.
- [4] Jia Z F, Zhao Z Q, Zhang Q Y, et al. Dew yield and its influencing factors at the Western edge of Gurbantungut Desert, China[J].Water,2019,11(4):733-749.
- [5] Jia Z F, Wang Z, Wang H. Characteristics of dew formation in the semi-arid loess plateau of central Shaanxi Province, China[J].Water,2019,11(1):126-143.
- [6] 王浩.陕北黄土丘陵区露水凝结特征研究[D].西安:长安大学,2018.
- [7] Wang Q, Ren X, Song X Y, et al. The optimum ridge-

furrow ratio and suitable ridge-covering material in rain-water harvesting for oats production in semiarid regions of China[J].Field Crops Research,2015,172:106-118.

- [8] 苏凤梅,贾志峰,王智.地布—地膜覆盖对渭北旱塬区土壤水分的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):97-102.
- [9] 李佳旻.黄土高原山地苹果园土壤水分动态及蒸散研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [10] 冯伟.毛乌素沙地东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D].北京:中国林业科学研究院,2015.
- [11] 孙建国,王涛,颜长珍.气候变化和人类活动在榆林市荒漠化过程中的相对作用[J].中国沙地,2012,32(3):625-630.
- [12] 王彦武.榆林毛乌素沙地固沙林地土壤质量演变机制[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [13] 杨路明.毛乌素沙地地表凝结水形成过程及其环境影响因子[D].北京:北京林业大学,2016.
- [14] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙漠东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):177-182.
- [15] 王玉才.陕西地区参考作物蒸发蒸腾量空间分布特征[J].甘肃科技,2015,31(8):138-140.
- [16] Ren R, Ma J J, Cheng Q Y, et al. An investigation into the effects of temperature gradient on the soil water-salt transfer with evaporation[J].Water,2017,9:456-475.
- [17] 任荣.非等温条件下土壤水热耦合迁移数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [18] 马雄德.毛乌素沙地裸土蒸发的动力学过程[D].西安:长安大学,2018.
- [19] 王冬梅.水田土壤水势变化规律分析[J].内蒙古水利,2017(10):21-23.
- [20] 伍永秋,张健枫,杜世松,等.毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J].中国沙地,2015,35(6):1612-1619.
- [21] 肖恩邦,孙保平,陈串,等.陕北黄土区人工刺槐林地土壤水势特征[J].水土保持学报,2017,31(3):129-133.
- [22] 田原.兴安落叶松林生长季土壤水势动态变化特征[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [23] 吴春东.冻融期不同秸秆覆盖厚度下土壤水热动态变化规律研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.

(上接第 77 页)

- [24] 陈奕汀,程红光,蒲晓,等.冻融作用对旱地土壤中不同吸附形态铵根离子的影响[J].安徽农业科学,2012,40(19):10094-10097.
- [25] 申东.紫色土丘陵区农业小流域氮磷与离子迁移特征研究[D].四川 绵阳:绵阳师范学院,2017.
- [26] 陈法锦,贾国东,陈建芳,等.河流可溶性有机氮研究进

展[J].矿物岩石地球化学通报,2010,29(1):83-88.

- [27] 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.
- [28] 闫瑞,闫胜军,赵富才,等.黄土丘陵区岔口小流域暴雨条件下氮素随地表径流迁移特征[J].水土保持学报,2014,28(5):82-86.