

DOI: 10.5846/stxb201802270398

贾琚杰, 高扬, 汪亚峰. 黄土高原典型坝系流域碳氮湿沉降与水体碳氮流失特征. 生态学报, 2019, 39(3): - .

Jia J J, Gao Y, Wang Y F. Characteristics of carbon and nitrogen wet deposition and loss by runoff in a typical dam watershed, Loess Plateau in China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

黄土高原典型坝系流域碳氮湿沉降与水体碳氮流失特征

贾琚杰^{1,2}, 高 扬^{1,2,*}, 汪亚峰^{3,4}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

4 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

摘要:本研究通过对黄土高原坝系流域的碳(C)、氮(N)湿沉降过程、降雨径流过程及其基流过程的动态监测, 揭示 C、N 湿沉降对流域水体碳氮流失的贡献, 探讨 C、N 流失负荷在降雨-径流中的分布, 进一步评估黄土高原雨季水体碳氮流失状况。结果表明, 研究区域碳、氮湿沉降通量分别为 $173.95 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 和 $43.01 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$, 而通过径流的碳、氮流失量为 $11.52 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 和 $2.19 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 。雨季 C、N 湿沉降对该地区水体 C、N 流失的贡献率分别为 65.81% 和 100%, 其中流水侵蚀引起的 C、N 流失贡献率为 59.20% 和 56.16%。黄土高原主要以流水侵蚀为主, C、N 主要集中在降雨径流后期, 因此截留后期径流可以有效控制养分流失。

关键词:碳氮湿沉降; 碳氮流失量; 降雨径流; 水蚀; 黄土高原

Characteristics of carbon and nitrogen wet deposition and loss by runoff in a typical dam watershed, Loess Plateau in China

JIA Junjie^{1,2}, GAO Yang^{1,2,*}, WANG Yafeng^{3,4}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: In this research, we monitored carbon (C) and nitrogen (N) wet deposition, rainfall-runoff, and base-flow processes in the Loess Plateau's dam watershed during wet season, in order to elucidate the contribution of C and N deposition to C and N loss in water body and discuss the distribution of C and N load in rainfall runoff, and then further evaluate the C and N losses during wet-season in the Loess Plateau. The results showed that the C and N wet deposition flux in this area reached 173.95 and $43.01 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$, respectively, whereas the C and N loss load by runoff were 11.52 and $2.19 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$, respectively. Therefore, the contribution rates of C and N wet deposition to the C and N loss by runoff during rainy season reached 65.81% and 100%, respectively, wherein the rainfall erosion contributed 59.20% and 56.16% of C and N loss, respectively. The rainfall erosion in Loess Plateau is mainly driving mechanism and the C and N loss

基金项目:国家自然科学基金中英合作重大项目(41571130083); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2015-2-2); 中国科学院青年创新促进会项目

收稿日期: 2018-02-27; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn

mainly concentrated at the later stage of rainfall runoff, so if we take a measure to intercept the runoff at the later stage, nutrient losses will be effectively controlled. In addition, it is necessary to control nutrient loss according to local conditions to alleviate soil erosion and nutrient losses in the Loess Plateau's dam watershed.

Key Words: carbon and nitrogen wet deposition; carbon and nitrogen loss flux; rainfall runoff; water erosion; Loess Plateau

大气碳(C)、氮(N)沉降指含碳、氮化合物由地表排放源排放至大气中,再在大气中经混合、扩散、转化、漂移,直至降落回地表,构成了大气碳、氮沉降的复杂耦合过程^[1-2]。C、N沉降作为全球变化的重要过程和生物地球化学循环的关键驱动因素,参与了大气和陆地之间的物理交换^[2]、碳循环、氮循环以及碳-氮-水耦合循环过程^[3-4]。每年全国大气氮沉降量 16.4 TgN/a^[5],黄土高原 DTC 湿沉降量为 3.80 gC m⁻² a⁻¹^[2]。目前,在全世界范围内,关于碳湿沉降定量研究在立陶宛^[6]、波兰^[7]、美国^[8]、新西兰^[9]和巴西^[10]均有发现,在国内,只有中国的北部^[11]和西藏地区^[12]存在可用的碳湿沉降定量数据。在中国北方,大气中 DOC 年沉降通量范围为 1.4—2.7 g m⁻² a⁻¹^[11],而在中国青藏高原,DOC 的年沉降通量约为 0.63 g m⁻² a⁻¹^[12]。这些结果表明,不同区域碳沉降通量之间存在较大的时空变化。关于氮沉降研究虽然较为集中^[4],但是在目标研究对象,黄土高原地区以流域尺度的氮沉降定量研究较为匮乏。Hao 等^[13]研究表明在南方红壤丘陵区雨季氮沉降通量为 41.72 kgN hm⁻² a⁻¹,呈现出极大的季节变异性。

我国黄土高原地区总面积为 64 万 km²,水土流失面积广、流失量多、侵蚀强度大,居全国首位^[14-16]。降雨是造成水土流失、土壤侵蚀的主要动力因子^[17],也是流域水体碳氮流失的前提条件^[18]。目前关于降雨驱动下土壤养分流失研究非常广泛^[19-24],黄土高原羊圈沟小流域年均碳流失模数为 2.70 kg km⁻² a⁻¹^[19]。彭梦玲等^[21]研究表明 TN 流失浓度在雨强 90, 105 mm/h 和 120 mm/h 时分别为 0.6056, 0.8011 mg/L 和 1.3076 mg/L。但是仍然缺乏降雨对流域水体碳氮流失贡献及 C、N 在降雨径流中的分布相关研究。因此,本文通过对位于陕西省延安市羊圈沟典型坝系流域进行研究,分析黄土高原碳氮湿沉降、降雨径流及流域水体碳氮流失特征,揭示降雨对流域水体碳氮流失的贡献,探讨 C、N 流失负荷在降雨径流中的分布,进一步评估黄土高原雨季水体碳氮流失状况,以期为该流域水土流失及土壤侵蚀的治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验研究区位于中国科学院生态环境研究中心的黄土高原丘陵沟壑区羊圈沟野外观测站(36°42'N, 109°31'E),距离陕西省延安市宝塔区东北方向 14 km 的羊圈沟流域^[25](图 1)。研究区内黄土丘陵沟壑区地形变化明显^[26],流域总面积 187.69 hm²,海拔高度 1050—1295 m^[27]。该地区年均降雨量为 535 mm,降雨主要集中在 7—9 月,年平均气温为 9.4℃,气候变化剧烈,具有典型的半干旱大陆性气候特征^[25-27]。土壤类型主要是黄绵土,土质疏松,抗蚀性差^[28],颗粒组成以细砂粒(0.05—0.25 mm)和粉粒(0.005—0.05 mm)为主^[27],平均土壤侵蚀速率损失 9000 t km⁻² a⁻¹^[29]。流域植被在区划上属于森林草原过渡带,流域内由于人为活动的干扰,多为人工种植而形成的次生植被,植物种类主要有刺槐、柳树和杨树等^[19]。

1.2 研究方法

1.2.1 样点布设

本研究以羊圈沟小流域为典型,根据不同土地利用方式及空间位置由北至南依次布设 12 个常规采样点,其中样点 6 号、12 号处为水文站所在地,样点 1 以上沟段平时无水流,见图 1。综合考虑各样点区域土地利用方式,将采样点划分为 I(样点 1—3)、II(样点 4—6)、III(样点 7—10)、IV(样点 11、12)区域,其土地利用方式分别为草地、林地、水塘和耕地,具体详见参考文献[25]。

1.2.2 采样方法

本研究于 2016 年 8、9 月在羊圈沟小流域内进行采样工作,分别采集雨水,降雨径流水样,基流水体样品。

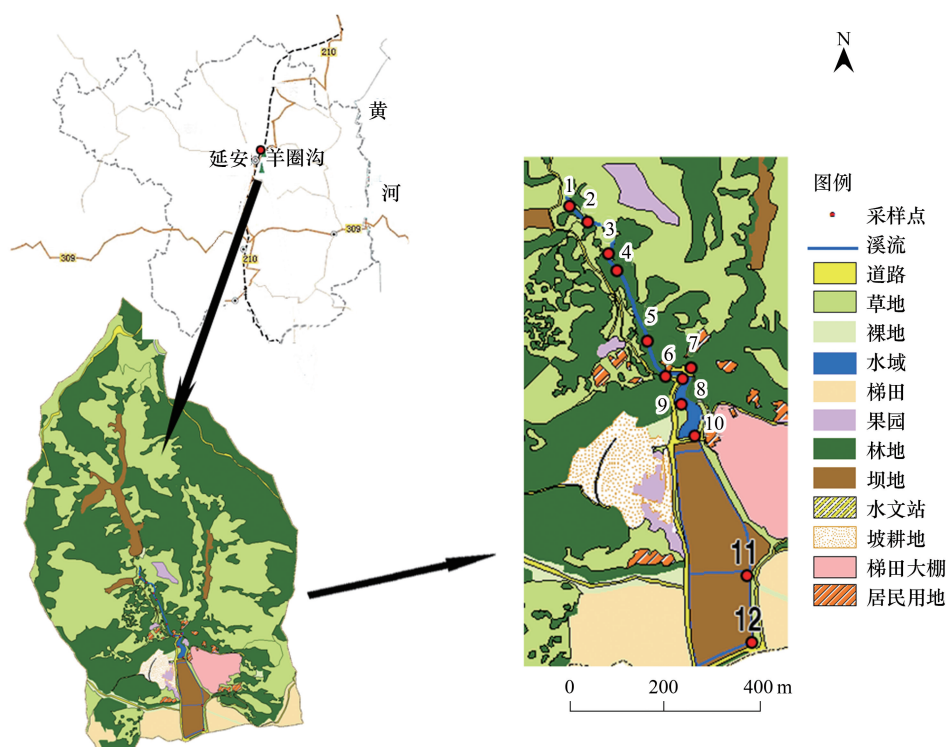


图1 流域采样点分布及土地利用方式

Fig.1 Sampling point distribution of watersheds and different land-uses

(1)雨水采样 采集9场降雨。在左支沟、村支部屋顶及试验站站顶放置雨水采集器收集每场降雨雨水样品,待降雨停止后回收雨水样^[27]。

(2)降雨径流水体采样 降雨径流是指由降雨落入地表所形成的径流,每场降雨采集24个样品,共采集216个样品。通过放置在6号和12号样点处的ISCO 6712全尺寸便携式水质自动采样器采集水样。触发条件为明渠中水位达到0.07 m开始采样,每半小时采一次,采至24个样品后结束采样^[27]。

(3)基流水体采样 基流为基本径流,河道中能够常年存在的那部分径流,与降雨条件无关。每月10日、20日在12个采样点处采样,共采集48个样品。采样时将聚乙烯塑料瓶伸入河流断面中部位置取水^[25]。

(4)流量、降雨量数据来源 通过ISCO 6712全尺寸便携式水质自动采样器实时监测水位、流量及流速的变化。降雨量数据来自羊圈沟流域水文站。

1.2.3 分析方法

取适量水样分别过直径0.45 μm有机微孔滤膜(经过80℃水浴12 h处理),以及通过国家标准碱性过硫酸钾的消解方法处理4℃冷藏保存,通过连续流动注射分析仪(法国Futura型号)测定溶解性总氮DTN、硝态氮NO₃⁻-N、铵态氮NH₄⁺-N和总氮TN^[27]。溶解性总碳(DTC)、溶解性有机碳(DOC)和溶解性无机碳(DIC)通过总有机碳分析仪(德国Vario TOC型号)测定^[19]。

1.3 数据分析

1.3.1 湿沉降通量的计算方法^[13]

$$F = P \times \frac{c}{100} \quad (1)$$

式中, F 为沉降通量(kg/hm²); P 为降雨量(mm); c 为雨水中总碳、氮浓度(mg/L)。

1.3.2 地表径流量及降雨径流输出负荷^[4]

$$x = \int_0^t q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{i=n-1} Q_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \Delta t_i \quad (2)$$

$$y_i = \int_0^t c_i(t) q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{i=n-1} c_i Q_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta t_i \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (3)$$

式中, x 为径流量(m^3); q_i 为 t 时间段内的流量(m^3); Q_i 为 Δt_i 内径流量(m^3); Δt_i 为第 i 个样品间隔时间(s); n 为样品个数; y_i 为第 i 种污染物的排放负荷(g); c_i 为 t 时间段内径流中第 i 种污染物的浓度(mg/L); q_i 为样本 i 在监测时的流量(m^3/s); c_i 为第 i 种污染物在样本 t 监测时的浓度(mg/L)。

1.3.3 流域碳氮输出负荷^[25]

流域平均浓度的计算公式为:

$$c_N = \sum c_i \times w_i \quad (4)$$

式中, c_N 为流域第 j 种污染物平均浓度(mg/L); c_i 为在 i 时刻流域第 j 种污染物浓度(mg/L); w_i 为按径流量大小取得的加权系数。

监测点流域输出量的计算公式为:

$$W = c_N \cdot Q \quad (5)$$

式中, W 为监测点第 j 种污染物的输出量(g); c_N 为流域第 j 种污染物平均浓度(mg/L); Q 为流域总径流量(m^3)。

1.3.4 流失模数计算^[19]

$$E = (Q_m \times C_j) / A \quad (6)$$

式中, E 为流域雨季第 j 种污染物月均流失模数($\text{g hm}^{-2} \text{mon}^{-1}$); Q_m 为雨季流域月均径流量(m^3); C_j 为流域第 j 种污染物平均浓度(mg/L); A 为流域面积(hm^2)。

1.3.5 流域湿沉降对水体碳氮输出贡献量的估算^[27]

利用径流系数(表1)计算碳氮湿沉降对流域水体碳氮输出的贡献,计算公式为:

$$M = c \cdot P \cdot q \quad (7)$$

式中, M 为流域碳氮湿沉降对水体碳氮输出贡献量(g); c 为雨水碳氮浓度(g/m^3); P 为降雨量(m^3); q 为径流系数。

表1 径流系数^[27,30]

Table 1 Runoff coefficient

土地利用类型 Land-use type	林地 Forest land	草地 Grassland	耕地 Farmland	水域 Water area
径流系数 Runoff coefficient	0.023—0.03	0.032—0.04	0.036—0.101	1

1.3.6 污染物负荷积累 $M(V)$ 曲线法^[31-32]

$M(V)$ 曲线法用来判别降雨初期冲刷效应和污染物在降雨径流过程中的分布。

降雨径流累积排放率是指一次降雨过程中,径流量随时间的累积量与径流总量的比值,计算公式为:

$$P_Q = \frac{\sum_{i=1}^i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (8)$$

污染物累积负荷率是指一次降雨过程中,污染物随时间的累积量与污染物总量的比值,计算公式为:

$$P_L = \frac{L_i}{L} = \frac{\sum_{i=1}^i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}$$

(9)

式中, P_Q 为降雨径流累积比例(%); P_L 为污染物负荷累积比例(%); L_i 和 L 分别为第 i 个和全部径流样品携带的污染物负荷(g); y_i 为第 i 种污染物的排放负荷(g); n 为样品个数。

2 研究结果

2.1 流域碳、氮浓度变化及沉降通量

图2为8、9月雨水中各形态碳氮浓度变化规律,从中可以看出,8月30日各形态碳、氮浓度均为最大,其中DTC浓度处于2.16—54.14 mg/L范围内变化;TN最高值为11.26 mg/L, NH_4^+ -N浓度较低处于0.01—1.39 mg/L之间, NO_3^- -N浓度高于 NH_4^+ -N。总体上,8月各形态碳氮浓度均大于9月。66.67%的降雨DOC浓度高于DIC,77.78%的降雨 NO_3^- 浓度高于 NH_4^+ ,说明雨水中主要以有机碳和硝态氮形式存在。从图2可以看出,低降雨量能够导致高C、N浓度,这说明降雨造成稀释效应,降雨量大稀释效应强,C、N浓度降低。利用公式(1)对8、9月降雨各形态C、N浓度计算C、N平均浓度及总浓度之和,估算平均沉降通量及总沉降通量列于表2。从中可知,8月15、16日C沉降通量均较高,这是由于8月中旬降雨量较高。8月碳、氮沉降通量分别为0.18、0.05 $\text{g m}^{-2} \text{mon}^{-1}$,9月碳、氮沉降通量分别为0.16、0.03 $\text{g m}^{-2} \text{mon}^{-1}$ 。8、9月分别采集到6、3场降雨,8月各形态C、N沉降通量明显高于9月,可能原因是8月降雨较为频繁。

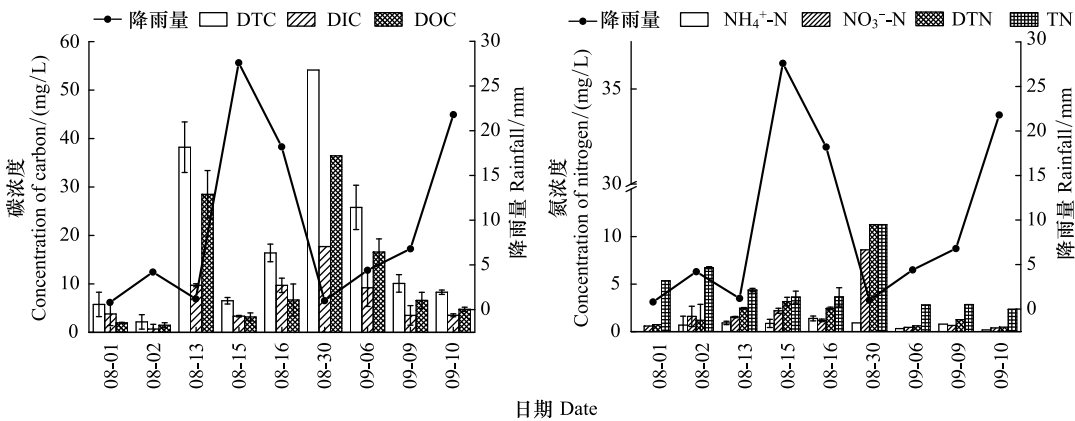


图2 次降雨事件下各形态碳、氮浓度变化

Fig.2 Variation of different forms of carbon, nitrogen concentration under different rain events

DTC:溶解性总碳,Dissolved Total Carbon; DIC:溶解性无机碳,Dissolved Inorganic Carbon; DOC:溶解性有机碳,Dissolved Organic Carbon; NH_4^+ -N:铵态氮,ammonium; NO_3^- -N:硝态氮,nitrate;DTN:溶解性总氮,Dissolved Total Nitrogen; TN:总氮>Total Nitrogen

表2 雨季期间各形态碳、氮沉降通量

Table 2 Different forms of carbon,nitrogen deposition fluxes during wet-season

月份 Month	沉降通量 Deposition flux/ (kg/km^2)	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	DTN	TN	DTC	DIC	DOC
8月 August	平均	7.04	23.14	31.28	51.52	181.39	66.21	115.18
	总量	259.17	852.02	1151.57	1896.64	6677.78	2437.48	4240.30
9月 September	平均	4.73	5.46	8.58	29.33	162.01	59.53	102.48
	总量	66.56	76.88	120.74	412.80	2279.88	837.75	1442.13
平均 Average	月均沉降通量	6.15	16.36	22.57	43.01	173.95	63.65	110.30

DTC:溶解性总碳,Dissolved Total Carbon; DIC:溶解性无机碳,Dissolved Inorganic Carbon; DOC:溶解性有机碳,Dissolved Organic Carbon; NH_4^+ -N:铵态氮,ammonium; NO_3^- -N:硝态氮,nitrate;DTN:溶解性总氮,Dissolved Total Nitrogen; TN:总氮>Total Nitrogen

2.2 降雨径流 C、N 浓度变化及流失负荷

图 3 为典型降雨径流中各形态 C、N 浓度变化曲线,其中 8 月 15 日为大雨(降雨量>25 mm),9 月 9 日为小雨(降雨量<10 mm)。2 次典型降雨径流中铵态氮浓度均较低,且变化平缓,硝态氮占 DTN 浓度的 80%以上,与 DTN 变化趋势基本一致,TN 浓度变化波动较大(7.20—31.00 mg/L)。DIC 占 DTC 的 75%以上,基本控制着 DTC 浓度的变化趋势。大雨 DTC 浓度变化幅度较小,处于 72.76—92.87 mg/L,小雨则相反,变化范围为 51.25—114.88 mg/L。在大雨事件中,径流中 TN 浓度随时间逐渐增加,到末期降低,而小雨事件则是不断变化,二者均在 400 min 时出现转折,大雨事件 TN 浓度在 400 min 时降低,而小雨则相反。小雨事件各形态 C 浓度变化趋于一致,在 400 min 后达到最大,而大雨事件 C 浓度是在 650 min 达到峰值。根据公式(3)计算出典型降雨事件下径流流失负荷列于表 3。2 次降雨事件共产生地表径流 0.76 m³,DTC 平均流失负荷为 0.94 kg km⁻² mon⁻¹,TN 平均流失负荷为 0.17 kg km⁻² mon⁻¹。降雨径流 C、N 流失负荷差异较大,大雨事件 C、N 流失负荷未必就比小雨多。小雨的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 DTN 流失负荷均小于大雨,但是 TN 及各形态 C 流失负荷均高于大雨,同时大雨的降雨量和径流量均高于小雨,这也进一步说明了大雨对高浓度的 TN 和 C 的稀释作用强。

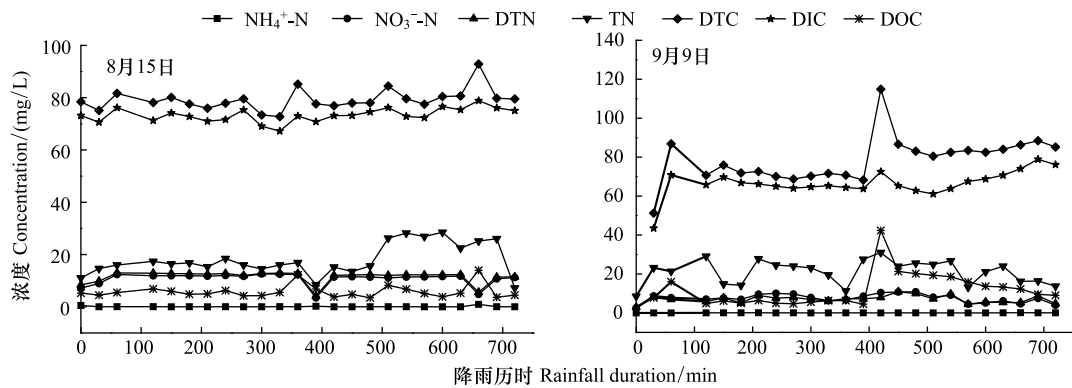


图 3 典型降雨径流各形态碳、氮浓度变化

Fig.3 Variation of different forms of carbon,nitrogen concentration in typical rainfall runoff

表 3 次降雨径流过程碳氮流失负荷

Table 3 Loss load of carbon,nitrogen under different precipitation events

降雨日期 Rain Date/(month-day)	降雨量 Rainfall/mm	累积径流量 Cumulative runoff/m ³	流失负荷 Loss load/g						
			NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DTN	TN	DTC	DIC	DOC
08-15	27.6	0.54	9.27×10 ⁻³	1.46	1.54	2.10	12.51	9.77	0.74
09-09	6.8	0.22	6.30×10 ⁻³	1.02	1.02	3.01	15.73	11.10	1.73
合计 Total/g	34.4	0.76	1.56×10 ⁻²	2.48	2.56	5.11	28.24	20.87	2.47
月均 Monthly/ (kg km ⁻² mon ⁻¹)	52.9	8.44	3.77×10 ⁻³	0.60	0.62	1.23	6.82	5.04	0.60

2.3 流域水体碳氮浓度变化

利用 1—3,4—6, 7—10 和 11、12 采样点的平均值分别作为 I、II、III、IV 区域水体 C、N 含量,其变化趋势如图 4 所示。C 浓度变化规律为 II>I>III>IV,N 浓度变化规律为 I>II>III>IV。整个流域水体以 DIC 为主,而在 I 和 II 区域以 DIN 为主,III 和 IV 区域以 PON 为主。不同区域土地利用方式和人类活动的差异导致各形态碳氮浓度有所差异。I 区域土地利用方式为草地,放牧产生的禽畜粪便和玉米地施用肥料(含硝态氮) 94.28 kg 均会导致较高的 C、N 浓度;II 区域为林地,较高的初级生产力和居民生活产生的污水和垃圾导致 C 浓度最高,林地施氮肥量为 82.01 kg,N 浓度低于 I 区域;III 区域为水塘,大量浮游植物的初级生产力控制着

DOC 浓度变化,无大量氮素输入,但水塘大量淤泥堆积导致颗粒态有机氮增加;IV 区域为耕地,同时为试验站所在地。耕地中有机质含量较高,人类活动产生的生活污水、垃圾、粪便导致有机碳浓度升高,另外生活污水排放导致河流淤泥堆积颗粒态有机氮升高。羊圈沟小流域碳氮流失量及流失模数是通过 1—12 采样点的各形态 C、N 浓度平均值,利用水文站监测数据流域面积(4.60 hm²),根据公式(5)和(6)计算得出,列于表 4。从中得知,羊圈沟流域水体雨季月均 DTC、TN 流失模数分别为 11.52、2.18 kg km⁻² mon⁻¹,DOC 和 NO₃⁻流失量分别占相应流失量的 12.41%和 59.63%,说明流失形态以无机碳氮为主。

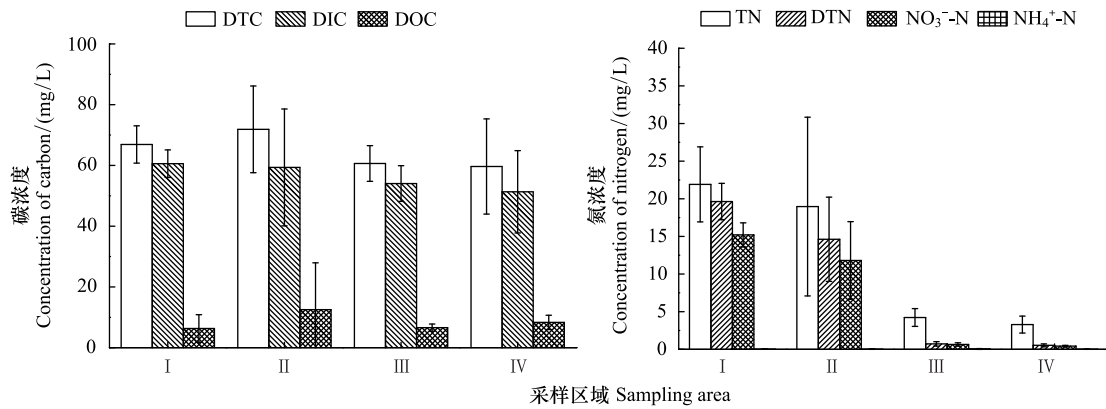


图 4 雨季期间基流 I、II、III、IV 区域不同形态碳、氮浓度变化

Fig.4 Changes of different forms of carbon and nitrogen concentration at I、II、III、IV in base flow during wet-season

I 区域:样点 1—3,草地;II 区域:样点 4—6,林地;III 区域:样点 7—10,水塘;IV 区域:样点 11、12,耕地

表 4 雨季期间流域水体碳氮流失负荷和流失模数

Table 4 Loss load and modulus of C、N of water during wet-season

月份 Month	流失负荷/流失模数 Loss load/ (g/mon) / Loss modulus/ (kg km ⁻² mon ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DTN	TN	DTC	DIC	DOC
8 月 August	流失负荷	0.38	62.33	72.47	106.45	478.65	433.06	45.59
	流失模数	8.16×10 ⁻³	1.35	1.58	2.31	10.41	9.41	0.99
9 月 September	流失负荷	0.17	56.40	72.93	94.79	580.99	494.71	86.28
	流失模数	3.70×10 ⁻³	1.23	1.59	2.06	12.63	10.75	1.88
平均 Average	月均流失负荷	0.46	59.36	72.70	100.62	529.82	463.88	65.94
	月均流失模数	5.93×10 ⁻³	1.29	1.58	2.19	11.52	10.08	1.43

3 讨论

3.1 黄土高原碳氮湿沉降特征

根据黄土高原湿沉降浓度,利用公式(1)估算出 DTC、DOC 和 TN 月均湿沉降通量分别为 173.95、110.30 kg km⁻² mon⁻¹和 43.01 kg km⁻² mon⁻¹(表 2),与 Wang 等^[2]研究结果 DTC(3.80 g m⁻² a⁻¹)和 DOC(1.91 g m⁻² a⁻¹)相比略低,这可能是由于黄土高原 6、7 月份降雨量更大,而本文研究只是针对 8、9 月份进行研究。本研究与其他区域对比发现黄土高原 DOC 湿沉降(110.30 kg km⁻² mon⁻¹)低于北京(1.90 gC m⁻² a⁻¹)^[11]却高于西藏(0.63 gC m⁻² a⁻¹)^[12],这是由于工业污染和人类排放严重的地区 DOC 含量高于其他地区^[11-12],黄土高原工业污染和交通排放比北京低,但是风沙将黄土卷入空中后被雨水清除也会提高 C 浓度^[2]。Zhao 等^[5]研究指出黄土高原 6.0 kgN hm⁻² a⁻¹,与本文研究结果相近。近 5 年来,我国 N 湿沉降量在 15.5—17.5 TgN/a 范围内变化,黄土高原氮沉降量(43.01 kg km⁻² mon⁻¹)比东部(15—50 kgN hm⁻² a⁻¹)^[5]和南方(41.72 kgN hm⁻² a⁻¹)^[13]低,这是因为降雨稀少且分布较集中^[14]的特性造成了黄土高原 N 湿沉降低。

3.2 流域水体碳氮流失特征

水土流失会导致土壤碳、氮素净流失^[29],全国每年因水土流失损失的有机质高达 1.63×10^8 t,流失的氮、磷、钾共计 1.18×10^8 t^[33]。而造成黄土高原流失的原因包括自然因素和人为因素,比如集中暴雨^[34],陡坡^[34],疏松土质^[14],以及植被稀少^[29],而多年来过度开发(放牧,采矿,毁林开荒)也是导致水土流失的原因之一^[14]。其中,降雨是造成水土流失的主要驱动因子,能够引起土壤侵蚀和养分流失^[34],降水通过两种方式导致土壤侵蚀,一是通过雨滴的击溅作用使地表产生剥蚀,二是通过汇集形成地表径流,对地表产生冲刷作用^[35],其中径流流失又分为径流泥沙携带和径流水携带^[36]。本文中水体碳氮流失主要指基流水体的可溶性碳、氮流失,由水蚀导致的可溶性碳、氮流失量和人为、风蚀、重力侵蚀等原因造成的地表径流可溶性碳、氮流失量构成,其中水蚀导致的可溶性碳、氮流失量在本文中为侵蚀性降雨对流域水体碳氮流失的贡献量,包括雨滴的击溅作用即降水侵蚀引起的流失量(贡献量-降雨径流负荷),和流水侵蚀引起的流失量(降雨径流负荷)。由于流域水体的养分输送量大多来自土壤侵蚀作用,能够反映出流域的侵蚀状况^[19],因此也可将基流水体的可溶性碳、氮流失看作土壤可溶性碳、氮通过水体迁移流失量。

刘旦旦等^[34]研究指出黄土高原侵蚀性降雨量 54.6 mm,坡度较低的下垫面,TN 流失量为 $2.05 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$,而研究区域降雨量为 52.9 mm,TN 流失量($2.18 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$)基本与其一致。另外,穆天亮^[37]也曾指出黄土高原有机质流失量达 $2.80 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$,本文研究表明 DOC 流失量为 $1.43 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 。本研究区域年降水量为 531 mm,属于极强度土壤侵蚀^[38],土壤碳氮流失属于严重流失标准^[39],碳流失量与早年相比 $0.48 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[19]相比有所改善,氮流失量却比早年 $39.3 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[37]加剧。近年来,调整土地利用结构、改进耕作方式等一系列水土保持措施^[40-41]以及“退耕还林”政策^[42-44]的实施导致植被覆盖度增大,虽然降雨侵蚀力较强,但土壤抗蚀性能增强,土壤侵蚀反而减弱,土壤侵蚀程度有所改善,但是农业耕作中氮肥的施用增加造成氮流失严重,而且由于气候变化、人类活动及地貌形态的影响,黄土高原西北部生态环境依然脆弱、水土流失及土壤侵蚀危害严重,因此对于黄土高原更应迫切研究因地制宜的水土保护措施^[19,45]。

3.3 降水对流域水体碳氮流失影响

3.3.1 降水对流域水体 C、N 流失贡献

图 5 为根据式(7)估算出羊圈沟小流域雨季期间碳氮湿沉降对流域水体碳氮输出贡献量。降雨量与碳氮贡献量变化趋势基本一致,其中,8月15日和16日碳氮沉降对水体碳氮流失贡献量较高,整体上,8月C、N贡献量高于9月,这是8月降雨频繁导致的。在所有降雨中,只有侵蚀性降雨才能发生养分流失,一般将降雨量 $>12 \text{ mm}$ 的降雨称为侵蚀性降雨^[46]。本文中只有8月15、16日,9月10日为侵蚀性降雨,而侵蚀性碳氮湿沉降对流域水体碳氮输出贡献量为碳氮湿沉降进入水体的碳氮流失量。从图6中得知,DTC湿沉降对流域水体C流失贡献量为 $7.58\text{--}10.76 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$,TN湿沉降贡献量 $2.51\text{--}3.56 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 。DTC,DOC,和TN湿沉降对水体相应流失贡献率分别为 65.81%,91.08%和 100%,这表明该流域碳、氮湿沉降对水体可溶性碳、氮流失贡献巨大。另外,根据表3和表4得知,降雨径流 DTC,DOC,和TN流失负荷占水体相应流失量比例分别为 59.20%,41.96%和 56.16%,而通过降水剥蚀的 DTC,DOC,TN流失率分别为 6.61%,49.12%和 43.84%,这表明黄土高原水蚀主要以流水侵蚀为主,与李素清等^[47]的研究结果(98.66%)相符。

3.3.2 典型降雨事件碳、氮流失负荷在径流过程中的分布特征

通过污染物负荷积累曲线 $M(V)$ 可以评估降雨径流的初期冲刷效应^[31],还可以判断污染物负荷在径流过程中的分布,对控制水土及养分流失有重要意义^[18]。图6分别为8月15日(大雨)和9月9日(小雨)2场降雨径流可溶性碳、氮负荷积累曲线。2场降雨径流各形态C、N均在 45° 线下方,只有8月15日降雨初期铵态氮短暂出现于上方,表明2场降雨均未产生初期冲刷效应。一般认为,当 $M(V)$ 曲线位于 45° 线上方时表明污染物集中于降雨的前期,下方时分布在降雨后期,而当 $M(V)$ 曲线与 45° 线非常接近时表明污染物在降雨过程中分布均匀^[18]。本研究中,在大雨和小雨事件中,可溶性C和除 NH_4^+ 的N的 $M(V)$ 曲线位于 45° 线下方,C和大部分的N集中于后期的地表径流中,而大雨事件中初期 NH_4^+ 的 $M(V)$ 曲线位于 45° 线的上方,20%左右

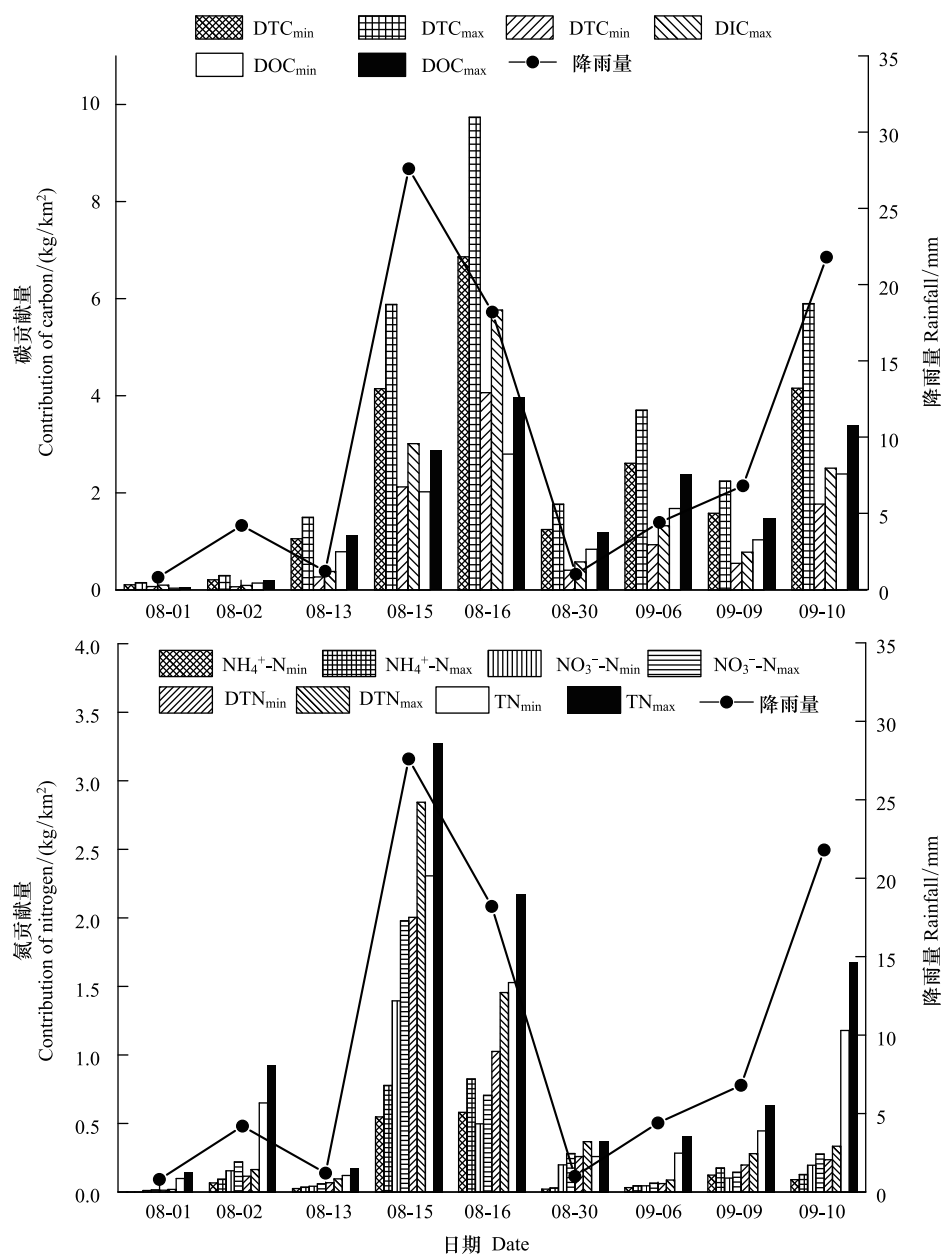


图5 雨季期间碳氮湿沉降对流域水体贡献量

Fig.5 Amount of contribution of carbon and nitrogen wet deposition to the basin during wet-season

的 NH_4^+ 集中于初期 20% 的径流中,由此可见,对于降水引起的养分流失,截留后期径流是控制降水导致的水土流失的有效手段。

4 结论

黄土高原羊圈沟小流域碳湿沉降通量 $173.95 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$,氮沉降通量为 $43.01 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$;水体碳流失量 $11.52 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$,氮流失量 $2.19 \text{ kg km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 。C、N 湿沉降对水体 C、N 流失贡献率分别为 65.81% 和 100%,其中流水侵蚀引起的 C、N 流失贡献率为 59.20% 和 56.16%,降水侵蚀则是 6.61% 和 43.84%,表明该流域碳、氮湿沉降对水体碳、氮流失贡献巨大。研究流域属于极强度土壤侵蚀,碳氮流失严重,养分流失主要以流水侵蚀为主,C、N 主要集中在降雨径流后期,因此截留后期径流可以有效控制养分流失,采取因地制宜的养分控制措施对治理水土流失有重要意义。

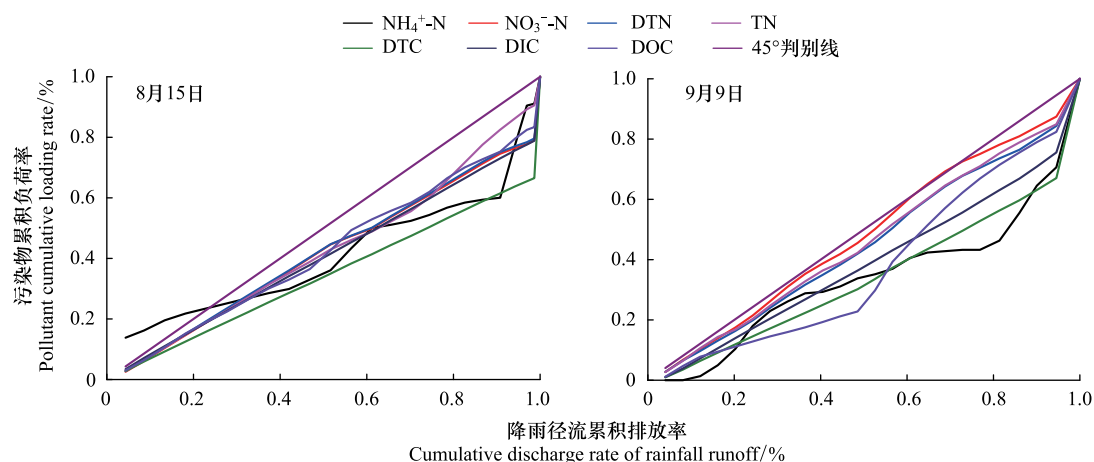


图6 典型降雨事件下径流各形态碳、氮流失负荷累积曲线

Fig.6 The cumulative curve of C and N loss load of runoff under typical rainfall events

参考文献 (References):

- [1] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 吕金岭, 宋韦. 大气氮沉降研究进展. 干旱区研究, 2012, 29(6): 972-979.
- [2] Wang L H, Yen H, Chen L D, E X H, Wang Y F. Characteristics of wet carbon deposition in a semi-arid catchment at Loess Plateau, China. Biogeosciences Discussions, 2018: 1-18.
- [3] 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 刘世荣, 申卫军. 陆地生态系统碳-氮-水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13.
- [4] 郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞. 南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响. 环境科学, 2015, 36(5): 1630-1638.
- [5] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, Liu X J, Xu W, Pan Y P, Duan L. Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance. Atmospheric Environment, 2017, 153: 32-40.
- [6] Armalis S. Wet deposition of elemental carbon in Lithuania. Science of the Total Environment, 1999, 239(1/3): 89-93.
- [7] Siudek P, Frankowski M, Siepak J. Seasonal variations of dissolved organic carbon in precipitation over urban and forest sites in central Poland. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(4): 11087-11096.
- [8] Iavorivska L, Boyer E W, Grimm J W. Wet atmospheric deposition of organic carbon: an underreported source of carbon to watersheds in the northeastern United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 3104-3115.
- [9] Kieber R J, Peake B, Willey J D, Avery G B. Dissolved organic carbon and organic acids in coastal New Zealand rainwater. Atmospheric Environment, 2002, 36(21): 3557-3563.
- [10] Coelho C H, Francisco J G, Nogueira R F P, Campos M L A M. Dissolved organic carbon in rainwater from areas heavily impacted by sugar cane burning. Atmospheric Environment, 2008, 42(30): 7115-7121.
- [11] Pan Y P, Wang Y S, Xin J Y, Tang G Q, Song T, Wang Y H, Li X R, Wu F K. Study on dissolved organic carbon in precipitation in Northern China. Atmospheric Environment, 2010, 44(19): 2350-2357.
- [12] Li C L, Yan F P, Kang S C, Chen P F, Qu B, Hu Z F, Sillanpää M. Concentration, sources, and flux of dissolved organic carbon of precipitation at Lhasa city, the Tibetan Plateau. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(13): 12915-12921.
- [13] Hao Z, Gao Y, Yang T T, Tian J. Atmospheric wet deposition of nitrogen in a subtropical watershed in China: characteristics of and impacts on surface water quality. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(9): 8489-8503.
- [14] 李永红, 高照良. 黄土高原地区水土流失的特点、危害及治理. 生态经济, 2011, (8): 148-153.
- [15] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(西北黄土高原区卷). 北京: 科学出版社, 2010: 28-59.
- [16] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1517.
- [17] 路培. 陕北黄土高原径流泥沙变化特征分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [18] 徐亚娟. 红壤区亚热带流域C、N流失特征及其对水环境影响的研究以江西香溪流域为例[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [19] 鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁. 黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例. 环境

- 科学, 2017, 38(8): 3264-3272.
- [20] Liu Y, Fu B J, Lü Y H, Wang Z, Gao G Y. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China. *Geomorphology*, 2012, 138(1): 404-414.
- [21] 彭梦玲, 吴磊, 乔闪闪. 不同雨强下黄土裸坡水-沙-氮磷流失耦合模拟. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1109-1116.
- [22] 张雪, 李忠武, 申卫平, 郭旺, 陈晓琳, 张越男, 黄金权. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系. *土壤学报*, 2012, 49(3): 465-473.
- [23] 赵旭珍, 李纯乾. 不同下垫面条件下土壤养分流失研究概况. *中国农学通报*, 2016, 32(21): 129-133.
- [24] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 马富亮. 模拟降雨下 3 种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 23-28.
- [25] 陈世博, 汪亚峰, 高扬, 贾珺杰, 陈维梁, 陈利顶. 黄土高原磷湿沉降特征及其对坝系流域磷输出影响——以羊圈沟为例. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 721-728.
- [26] Wang Y F, Chen L D, Gao Y, Wang S, Lü Y H, Fu B J. Carbon sequestration function of Check-Dams: a case study of the Loess Plateau in China. *Ambio*, 2014, 43(7): 926-931.
- [27] 贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶. 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. *环境科学*, 2017, 38(1): 147-155.
- [28] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 梁地. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应. *生态学报*, 2015, 35(18): 6060-6069.
- [29] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 85(1): 58-66.
- [30] 卢龙彬, 付强, 黄金柏. 黄土高原北部水蚀风蚀交错区产流条件及径流系数. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 17-23.
- [31] 薛鹏程, 庞燕, 项颂, 胡小贞, 王欣泽. 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1362-1368.
- [32] Sansalone J J, Cristina C M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, 130(11): 1301-1314.
- [33] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 程先富. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估. *土壤学报*, 2016, 53(1): 28-38.
- [34] 刘旦旦, 王健, 尹武君. 天然降雨对黄土坡地土壤侵蚀和养分流失的影响. *节水灌溉*, 2011, (8): 17-20, 24-24.
- [35] 王林华. 黄土坡耕地地表粗糙度对入渗、产流及养分流失的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [36] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 赵光旭, 张鹏宇. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 67-82.
- [37] 穆天亮, 王全九. 黄土丘陵沟壑区小流域水土养分流失特征研究. *中北大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(4): 349-355.
- [38] 齐清, 王天明, 寇晓军, 葛剑平. 基于 GIS 的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 1-5, 37-37.
- [39] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. GIS 支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 9-12.
- [40] Zhu T X. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. *Geomorphology*, 2012, 153-154: 144-155.
- [41] Bullock A, King B. Evaluating China's slope land conversion program as sustainable management in Tianquan and Wuqi counties. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(8): 1916-1922.
- [42] Zhang J J, Zhang T T, Lei Y N, Zhang X P, Li R. Streamflow regime variations following ecological management on the Loess Plateau, China. *Forests*, 2016, 7(1): 6.
- [43] Li Y J, Jiao J Y, Wang Z J, Cao B T, Wei Y H, Hu S. Effects of revegetation on soil organic carbon storage and erosion-induced carbon loss under extreme rainstorms in the hill and gully region of the Loess Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(5): 456.
- [44] Wang Z, Liu G B, Xu M X, Zhang J, Wang Y, Tang L. Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, 99: 26-33.
- [45] 裴会敏, 许明祥, 李强, 脱登峰. 侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 269-274.
- [46] 张耀宗, 张多勇, 刘艳艳. 近 50 年黄土高原马莲河流域降水变化特征分析. *中国水土保持科学*, 2016, 14(6): 44-52.
- [47] 李素清, 李斌, 张金屯. 不同降雨量下的黄土高原土壤侵蚀特征分析. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1): 94-97.