

安家沟流域不同土地利用方式下地表径流中 COD 和 TN 的污染负荷

赵越¹, 张富¹, 陈瑾², 张佰林², 康启燕¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省定西市水土保持研究所, 甘肃 定西 743000)

摘 要:为探明黄河流域不同土地利用方式下地表径流中 COD 和 TN 污染分布规律,以安家沟流域为研究对象,采用平均浓度模型,对径流来源及其污染负荷进行了分析研究。结果表明:安家沟流域不同土地利用方式下地表径流中 7 项污染物质量浓度平均超标 1.31 倍,其中 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 分别超标 1.78、2.11 倍;劣 V 类水质出现的平均频率为 23.86%,其中 COD_{Mn} 和 TN 平均出现频率分别为 28.17%、52.03%;不同土地利用措施受径流量及其拦蓄效率和污染物输出水平的影响, COD_{Mn} 和 TN 两者污染负荷总量主要分布在林地和农地,其单位面积污染负荷以荒坡为最大 (2.989 kg/hm^2),草地次之 (2.937 kg/hm^2),林地第三 (1.327 kg/hm^2),农地最小 (0.447 kg/hm^2);在坡面到沟道的径流过程中,由于土壤入渗等因子的影响,污染物总量在流域径流过程中具有明显的衰减过程, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 衰减了 40.01%, $\rho(\text{TN})$ 衰减了 38.33%。研究显示,安家沟流域 COD 和 TN 污染在不同土地利用措施之间分异明显,合理规划土地利用方式,加强水土保持措施可有效减轻面源污染的发生。

关键词:土地利用; 面源污染; 径流水质; 污染负荷

中图分类号: X5; P334

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0103-07

COD and TN Pollution Loads in Surface Runoff Under Different Land Uses in Anjiagou Basin

ZHAO Yue¹, ZHANG Fu¹, CHEN Jin², ZHANG Bailin², KANG Qiyan¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: In order to understand the distribution of COD and TN pollution in different land uses, selecting Anjiagou Basin as the research site, we used the average concentration model to analyze the runoff source and pollution load. The results showed that the concentrations of 7 pollutants in surface runoff were 1.31 times more than the standard under different land uses, in which COD_{Mn} and TN exceeded the standard 1.78 times and 2.11 times, respectively; the average occurrence frequency of the water quality worse than grade V was 23.86%, COD_{Mn} and TN were 28.17% and 52.03%, respectively; because of the runoff, impounding efficiency and pollutant output level effect on different land uses, COD_{Mn} and TN pollution loads mainly distributed in the woodland and farmland, the waste hillside of pollution load was maximum in the unit area of COD_{Mn} and TN (2.989 kg/hm^2), grassland came second (2.937 kg/hm^2), woodland third (1.327 kg/hm^2) was next, and agricultural land was minimum (0.447 kg/hm^2); in the runoff process from slope to channel, due to the effect of soil infiltration and other factors, the total amount of pollutants had obvious attenuation, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ and $\rho(\text{TN})$ decreased by 40.01% and 38.33%, respectively. The results showed that the COD_{Mn} pollution and TN pollution were significantly discrepant in different land use, and rational planning of land use, strengthening soil and water conservation measures could effectively reduce the occurrence of non-point source pollution.

Keywords: land use; non-point pollution; water quality of runoff; pollution load

20 世纪末,全球范围约有 30%~50% 的地表水体受到面源污染的影响^[1]。美国农业面源污染占河流的贡献率 64%,占湖泊的贡献率 57%,美国环境保护总署(USEPA)把农业列为全美河流和湖泊污染的第一污染源^[2]。在欧洲国家,农业面源污染同样是导致水环境恶化的主要原因之一。欧洲发达国家的地表水中, $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 超标($>50\text{ mg/L}$)现象十分严重,农业生态系统的养分流失(主要为氮、磷)是主要来源^[1];荷兰农业的氮污染负荷占 60%^[3];芬兰有 20% 的湖泊水质在恶化,而农业面源污染流失的磷素和氮素在各种污染源中所占比重最大,占总排放量的 50% 以上;在瑞典由河流输入的氮的 60%~87% 来自农业面源污染^[4]。

我国水体污染形势严峻,水环境与土壤深受农业面源污染的危害^[5-8]。据 2010 年国家环境保护部、国家统计局、农业部联合发布的《第一次全国污染源普查公报》,2007 年我国污染源年排放总量 3 028.96 万 t,其中农业污染源年排放 COD, TN, TP 分别占全国同类污染物总排放量的 43.7%, 57.2%, 64.9%, 农业源已成为主要污染源^[9],成为全球关注的焦点^[10-11],尤其是大面积水资源的污染,直接威胁到人类的生存,因此对水质的监测和分析极为重要。2008 年全国 7 大水系中,劣 V 类水质的断面超过 20%^[12]。2003 年黄河 COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP 面源主要污染物数量占河流同种类污染物总量的 40.0%, 14.0%, 59.0%, 52.0%, 对黄河水质的影响较大^[13]。在 2005—2014 年黄河流域 80% 的子流域均出现劣 V 类水质。

在此背景下,人们针对农业面源污染的成因、特征、来源、迁移转化途径等做了很多研究^[5-8],但对小流域坡面—沟道径流过程中不同土地利用方式下污染负荷的定量研究相对较少。祖厉河是黄河流域河流水质污染最为严重的区域之一,据《黄河水资源公报》显示,祖厉河从 1998—2013 年全河段水质逐渐恶化,2005 年后成劣 V 类。研究区安家沟流域位于甘肃中部,属祖厉河水系关川河支流的一级支沟,属黄土丘陵沟壑区第 V 副区,土壤侵蚀强烈、水土流失非常严重,是国家水土流失监测与公告项目区。本文通过研究安家沟流域不同土地利用方式下地表径流中主要污染物 COD 和 TN 的分布及负荷,分析其负荷来源及分布特点,从而为进一步开展水土流失与面源污染防治措施的研究提供依据,对改善该地区水环境质量、促进生态环境建设和区域经济社会的可持续发展具有重要的科学意义。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

安家沟流域位于 $104^{\circ}38'13''$ — $104^{\circ}40'25''\text{E}$, $35^{\circ}33'02''$ — $35^{\circ}35'29''\text{N}$,海拔 1 900~2 250 m,流域面积为 8.54 km^2 。气候属中温带半干旱区,年温差大,年均气温 6.3 $^{\circ}\text{C}$,年均降水 427 mm,但时空分布极不均匀,其中 60% 以上集中在 7—9 月份,且多暴雨。土壤主要为黄绵土和沟道盐渍土。植被属于森林草原带干草原区。截至 2014 年底,安家沟流域土地利用方式中农地面积占 46.7% (其中坡耕地占 6.27%,梯田占 93.73%),林地占 23.9%,草地占 5.4%,荒坡荒沟占 11.48%。安家沟流域由马家岔(4.96 km^2)和小安家沟(3.58 km^2)组成。沟道建有淤地坝 3 座,其中小安家沟 1954—1984 年早期建设的 1,2 号中小型淤地坝已淤满,成为径流式淤地坝。马家岔沟建有骨干坝 1 座(3 号淤地坝,2004 年新建)拦蓄了马家岔沟支沟的全部径流泥沙。

1.2 数据及来源

(1) 土地利用调查数据。基于安家沟 1/10 000 地形图及 2014 年 Quick Bird(分辨率 0.61 m)卫星影像资料,利用 ArcGIS 10.2 软件,对安家沟流域内土地利用方式、面积进行统计分析。

(2) 降雨量观测数据。1956 年安家沟流域中心按国家气象台站标准布设气象观测园 1 处,开展常规气象因子观测。目前拥有 U30-NRC 自动气象站 1 台,同时布设量雨筒 2 个,虹吸式自计雨量计 1 台。观测项目主要有降雨量、降雨天数、次数、最大雨量及雨强、气温及土壤水分和温度等主要气象因子。

(3) 径流观测数据。在安家沟流域径流试验场于 1986 年建立,布设有不同坡度、不同植被、不同地标处理等观测小区 30 个。汛期选择典型降雨场次观测小区径流泥沙数量。本研究选取了坡度为 10° , 15° , 20° 共 3 个坡度级,乔木林(油松)、灌木林(沙棘)、农作物(小麦、豌豆)、人工种草(紫花苜蓿、红豆草)、荒坡 5 种土地利用方式的 15 个坡面径流小区及 1 个沟道径流取样点,进行水质取样。径流小区集流池泥沙取样同时取 2.5~5 kg 水样,沟道径流在小安家沟 2 号淤地坝消力池中取样(数量同前),水样在 2 h 内送至检测单位,进行水样登记、观察及水样预处理。

(4) 水质化验。2006—2008 年化验指标 21 项,2013—2014 年仅对 7 种污染超标种类进行化验。水质测定与评价按照 GB3838—2002《地表水环境质量标准》^[14]进行,由甘肃省水环境监测中心定西分中心完成。

(5) 坡面径流污染负荷量计算。面源污染负荷

量的计算采用平均浓度法^[15],是基于非点源的产污汇污原理、建立在数学统计学方法上的非点源负荷估算方法^[16]。本研究根据小流域不同土地利用措施、面积、单位面积径流量、水质污染物浓度等特点,构造了小流域坡面与沟道污染物负荷量计算公式:

$$W_p = \sum_{i=1}^n S_i R_i C_i \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中: W_p 为坡面某污染物负荷量(kg); S_i 为第 i 类土地利用措施面积(hm²); i 为农、林、草、荒地等不同土地利用措施; R_i 为第 i 类土地利用措施单位面积地表径流量(m³/hm²); C_i 为第 i 类土地利用措施地表径流中污染物平均浓度(mg/L)。

$$W_g = W_s C_{SM} \times 10^{-3} \tag{2}$$

式中: W_g 为沟道地表径流某污染负荷量(kg); W_s 为沟道地表径流量(m³); C_{SM} 为沟道地表径流中某污染物浓度(mg/L)。

2 结果与分析

2.1 土地利用调查结果

采用 2014 年 Quick Bird 卫星影像资料及地形图等资料,在 ArcGIS 10.2 的支持下,对小流域内土地利用方式、面积进行的流域实地调查,截至 2014 年底,安家沟流域土地利用措施农地面积占 46.7%(其中坡耕地占 6.27%,梯田占 93.73%),林地占 23.9%,草地占 5.4%,荒坡荒沟占 11.48%。

2.2 降雨、径流分析

2.2.1 降雨量分析 据安家沟流域径流试验场中心降雨观测资料,多年(1956—2014 年)平均降雨量

4 01.5 mm,研究期间(2005—2014 年)平均降雨量 383.7 mm,相比较减少 4.43 个百分点。其中 2005—2011 年年均降雨量 400.3 mm,与多年平均降雨量相当;由于 2013 年为早年其降雨量仅有 112.6 mm,因此 2012—2014 年年均降雨量较少为 345 mm,比多年平均减少 14.07%。2005—2014 年降雨量年际分布见图 1。

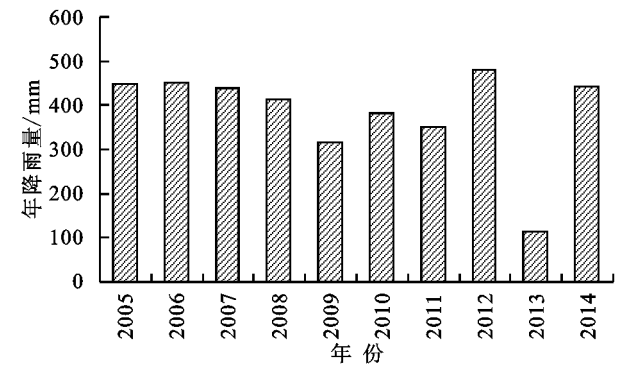


图 1 2005—2014 年降雨量

2.2.2 径流量分析 依据安家沟 2014 年土地利用现状、1986—2014 年不同土地利用方式下径流小区径流泥沙观测资料及水土保持措施拦蓄效率资料^[17],以此计算坡面与流域的径流量(表 1)。计算结果显示农地(梯田、坡耕地)和林地(乔木林、灌木林)由于面积在全流域比重较大,其径流量也相对较大,分别占整个流域径流来源的 37.8%,59.48%。但是通过坡改梯工程和其他拦蓄措施的实施(拦蓄效率水平梯田为 89.4%,人工造林为 66.0%,退耕种草为 18.0%),农地和林地的径流模数显著低于荒坡和草地,能够在一定程度上减轻暴雨径流所引发的水土流失。

表 1 小安家沟流域径流来源及数量

土地利用类型	农地		林地		草地	荒坡	沟床	流域
	梯田	坡耕地	乔木林	灌木林				
面积/hm ²	175.79	14.15	64.06	100.84	2.47	0.27	0.33	357.92
占面积/%	49.12	3.95	17.90	28.17	0.69	0.08	0.09	100.00
径流模数/(m ³ ·hm ⁻²)	13.22	122.37	90.79	31.51	157.9	179.2	60.9	—
拦蓄效率/%	89.20	—	31.62	31.62	18.02	—	—	—
径流量/m ³	4055.4		8993.5		390.0	48.4	20.1	13507.45
径流来源/%	21.66	16.14	32.77	26.71	2.31	0.29	0.12	100.00

注:(1) 人工造林整地方式为反坡梯田;(2) 荒坡种草水平带状整地方式;(3) 沟床主要为红土基岩。

2.3 COD 和 TN 对径流水质的影响

2.3.1 主要污染物分析 依据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》对安家沟流域不同土地利用方式下地表径流中的高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)等 21 项水质类别进行化验和评价,实测结果表明,坡面污染物质量浓度主要超标的项目为:COD_{Mn},TN,BOD₅,NH₃-N,F⁻,NO₂-N,TP。7 项污染物质量平均浓度超

标倍数为 1.31 倍,其中 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 超标 1.78 倍, $\rho(\text{TN})$ 超标 2.11 倍。在不同土地利用措施下 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 的超标倍数中,乔木林(2.55 倍) > 农地(2.10 倍) > 灌木林(2.00 倍) > 草地(1.60 倍) > 荒坡(1.52 倍) > 沟道(0.92 倍); $\rho(\text{TN})$ 超标倍数中,乔木林(3.85 倍) > 灌木林(3.47 倍) > 草地(2.02 倍) > 农地(1.35 倍) > 沟道(1.41 倍) > 荒坡(0.54 倍)(表 2)。

表 2 不同土地利用方式下地表径流中污染物指标超标倍数

检测项目	草地	农地	乔木林	灌木林	荒坡	沟道	平均值
COD _{Mn}	1.60	2.10	2.55	2.00	1.52	0.92	1.78
TN	2.02	1.35	3.85	3.47	0.54	1.41	2.11
BOD ₅	2.02	2.71	1.98	0.60	—	0.60	1.58
NH ₃ -N	0.34	0.42	2.20	2.56	0.22	0.72	1.08
NO ₂ -N	—	0.88	—	—	—	—	0.88
TP	—	—	0.87	—	—	2.38	1.62
F ⁻	—	—	0.04	0.17	—	—	0.10
平均	0.85	1.07	1.64	1.26	0.33	0.86	1.31

注:草地、林地(乔木林、灌木林)径流小区建设前土地利用现状均为坡耕地,下表同。

劣V类水质出现的平均频率为 23.86%,其中 COD_{Mn}出现频率为 28.17%,TN 出现频率为 52.03%。

表 3 不同土地利用方式下地表径流中劣 V 类水质出现次数与频率

土地利用方式	检测项目	COD _{Mn}	TN	BOD ₅	NH ₃ -N	NO ₂ -N	TP	F ⁻	平均
草地	样本数	15	15	15	15	15	15	7	13.86
	出现次数	2	8	1	2	0	0	4	2.43
	出现频率/%	13.33	53.33	6.67	13.33	0.00	0.00	57.14	20.54
农地	样本数	15	15	15	15	15	15	7	13.86
	出现次数	2	5	1	5	1	0	4	2.57
	出现频率/%	13.33	33.33	6.67	33.33	6.67	0.00	57.14	21.50
灌木林	样本数	15	11	15	15	15	15	7	13.29
	出现次数	7	10	1	8	0	0	5	4.43
	出现频率/%	46.67	90.91	6.67	53.33	0.00	0.00	71.43	38.43
乔木林	样本数	15	11	15	15	15	15	7	13.29
	出现次数	6	8	1	5	0	1	4	3.57
	出现频率/%	40.00	72.73	6.67	33.33	0.00	6.67	57.14	30.93
荒坡	样本数	14	7	14	14	14	14	7	12.00
	出现次数	5	2	0	2	0	0	4	1.86
	出现频率/%	35.71	28.57	0.00	14.29	0.00	0.00	57.14	19.39
沟道	样本数	10	9	10	12	12	12	6	10.14
	出现次数	2	3	0	3	0	1	0	1.29
	出现频率/%	20.00	33.33	0.00	25.00	0.00	8.33	0.00	12.38
平均频率/%		28.17	52.03	4.44	28.77	1.11	2.50	50.00	23.86

2.3.2 COD 和 TN 污染负荷及分布

(1) 污染物浓度变化。主要对 5 a 地表径流中的 COD_{Mn}和 TN 污染物浓度进行汇总,不同土地利用方式下地表径流中 COD_{Mn}和 TN 污染物浓度见表 4。

由于不同污染物的浓度对水质影响不同,衡量标准不一,所以变异系数成为污染物之间比较的重要指标。变异系数越小,说明某种土地利用方式其某类污染物的释放过程受外界因素影响较小、比较稳定,否则相反。表 4 结果显示,不同土地利用方式变异系数大小排序: $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 为草地(44.72%)>农地(43.64%)>乔木林(25.03%)>沟道(22.14%)>灌木林(20.85%)>荒坡(16.30%), $\rho(\text{TN})$ 为沟道(33.00%)>荒坡(26.88%)>灌木林(15.12%)>农

在不同土地利用措施下地表径流劣V类水质 COD 出现频率大小为:灌木林(46.67%)>乔木林(40.00%)>荒坡(35.71%)>沟道(20.00%)>农地和草地(13.33%);TN 的出现频率大小为:灌木林(90.91%)>乔木林(72.73%)>荒坡(57.14%)>农地(53.33%)>草地和沟道(均为 33.33%)(表 3)。

通过上述化验评价结果(表 2—3)可以看出,污染物 COD 和 TN 的超标倍数和出现频率较大且均超出平均值,导致水质腐败变臭,对于地表径流水质产生较大影响,应作为流域重点研究的主要污染物。受面积和土壤污染背景、拦蓄措施等影响,COD 和 TN 在不同土地利用措施上分异明显,农地和林地是主要来源,草地和荒坡荒沟则分布较少。

地(13.51%)>草地(13.24%)>乔木林(9.88%),说明 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 在草地和农地最不稳定,林地、沟道和荒坡则较为稳定; $\rho(\text{TN})$ 在沟道和荒坡最不稳定,农地、草地和林地较为稳定。

为了解不同土地利用方式间污染物含量是否有显著差异,采用 SPSS 20.0 软件的均值(Compare Means)单因子方差分析(One-Way ANOVA)工具中的 LSD 方法对不同土地利用方式间 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 进行多重比较分析。结果表明,不同土地利用方式之间 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 无显著性差异($p>0.05$); $\rho(\text{TN})$ 在灌木林与农地、荒坡、沟道之间存在显著性差异(表 4)。

由表 4 可见本研究区林地的 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 高于农地、草地,这与国内其他热点研究区域(密云库

区、太湖流域、黑河流域、长江中上游、九龙江流域等)的分析结果^[18-19]有所不同,分析其原因:一是灌木林和乔木林地径流观测小区建造前土地利用措施是农坡地,具有与农地相同的污染物质背景;二是径流小区建设前坡耕地径流模数为 122.37 m³/hm²,建设后由于乔木林地郁闭达到 0.7 左右,林下几乎无自然草本,松针落叶数量少,表土基本裸露,地表板结严重,反坡梯田整地工程的拦蓄效率较低,暴雨后具有较高的径流系数(径流模数为 90.79 m³/hm²),受土壤背景的影响,将会造成水质的严重污染。同时,建设后灌木林地(沙棘)虽然覆盖度达 0.95 以上,且郁闭度较高,不易形成径流(径流模数为 31.51 m³/hm²),但受沙棘根瘤菌固氮作用的影响,林地土壤氮源丰富,一旦发生特大暴雨将形成径流,具有较高的污染物浓度。

表 4 不同土地利用方式下地表径流中 COD_{Mn}和 TN 的平均浓度

土地利用 类型	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$		$\rho(\text{TN})$	
	均值±标准误	变异 系数/%	均值±标准误	变异 系数/%
草地	(15.578±6.966)a	44.72	(3.022±0.400)ab	13.24
农地	(18.592±8.114)a	43.64	(2.346±0.317)b	13.51
灌木林	(18.027±3.758)a	20.85	(4.472±0.676)a	15.12
乔木林	(21.319±5.337)a	25.03	(4.846±0.479)ab	9.88
荒坡	(15.131±2.466)a	16.30	(1.544±0.415)b	26.88
沟道	(11.508±2.548)a	22.14	(2.406±0.794)b	33.00

注:同列数据后小写字母表示 $p<0.05$ 条件下的显著性。

(2) 污染物负荷变化。根据安家沟土地利用方式径流量(表 1)及污染物平均浓度(表 4),依据公式(1)―(2)计算了污染物的总量、负荷及其所占比例(表

表 5 不同土地利用方式下地表径流中 COD_{Mn}和 TN 的污染负荷

水质指标	项目	土地利用类型					流域	衰减率/%
		草地	农地	林地	荒坡	合计		
COD _{Mn}	面积/hm ²	2.47	189.94	164.90	0.27	357.59	357.92	—
	污染物负荷/(kg·hm ⁻²)	2.460	0.397	1.073	2.712	0.724	0.434	—
	污染物重量/kg	6.075	75.398	176.929	0.732	259.135	155.444	40.1
	所占比例/%	2.34	29.10	68.28	0.28	100.00	—	—
	污染物负荷/(kg·hm ⁻²)	0.477	0.050	0.254	0.277	0.147	0.091	—
TN	污染物重量/kg	1.179	9.514	41.901	0.075	52.668	32.499	38.33
	所占比例/%	2.24	18.06	79.56	0.14	100.00	—	—

另外,在坡面到沟道的径流过程中,由于地表径流受入渗、过滤等径流过程的影响,COD 和 TN 的总负荷量均出现衰减现象,COD_{Mn} 污染物总量衰减 103.691 kg, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 衰减了 40.01%;TN 污染物总量衰减 20.189 kg, $\rho(\text{TN})$ 衰减了 38.33%。

3 讨论

研究表明,小安家沟流域坡面林地和农地的

5)。COD_{Mn} 污染在坡面的负荷总量为 259.135 kg,其中:林地(176.929 kg)和农地(75.398 kg)分别占总量的 68.28%和 28.10%,是污染物的主要来源;单位面积的负荷为 0.724 kg/hm²,其中:荒坡最大(2.712 kg/hm²),草地处之(2.460 kg/hm²),林地第三(1.073 kg/hm²),农地最小(0.397 kg/hm²);TN 污染在坡面的负荷总量为 52.668 kg,其中:林地(41.901 kg)和农地(9.514 kg)分别占总量的 79.56%和 18.06%,也是污染物的主要来源;单位面积的负荷为 0.147 kg/hm²,其中:草地最大(0.477 kg/hm²),荒坡次之(0.277 kg/hm²),林地第三(0.254 kg/hm²),农地最小(0.050 kg/hm²),两者总量分布大小为荒坡(2.989 kg/hm²)>草地(2.937 kg/hm²)>林地(1.327 kg/hm²)>农地(0.447 kg/hm²)。

以上计算结果显示农地和林地的 COD_{Mn} 和 TN 单位面积负荷低于荒坡和草地,与蒋昌波^[20]、张皓天^[21]等对不同土地利用方式面源污染物单位面积负荷的对比研究结果相反。这是因为本研究中农地和林地面积较大,农地中 92.55%坡耕地被修成梯田,梯田拦蓄了 89.2%的径流,有效拦截了污染物随地表径流的迁移,乔木林和灌木林径流小区建设后径流模数有所减少,分别为 90.79,31.51 m³/hm²;而荒坡和草地的措施面积较小,由于未采取拦蓄措施,暴雨后具有较高的径流模数,分别为 179.2,159.7 m³/hm²。说明不同措施污染物排放数量与措施径流拦蓄性能密切相关,拦蓄能力越大,产生的径流越少,排放的污染物数量越少,加强水土保持措施可以减少降雨径流量和土壤侵蚀量,有效防治面源污染的发生。

$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 分别占总量的 68.28%和 28.10%, $\rho(\text{TN})$ 分别占总量的 79.56%和 18.06%,是污染物的主要来源。其原因一是林地与农地面积的比重大,两者占流域总面积的 70.6%;二是根据研究中的数据计算,小安家沟流域坡面 BOD₅ 污染总量为 147.314 kg,COD_{Mn} 污染总量为 259.135 kg, $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 超过 50%,而其比值间接地反映了有机物的含量,表明土壤中大量有机质在暴雨径流的冲刷和淋溶下进

入水体,导致流域中 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 较高;三是农地化肥、农药施用大。许多研究表明,化肥和农药的使用也是造成水体污染和富营养化的最主要途径^[22]。通过实地调查发现,小安家沟流域内农耕区大量施用氮、磷肥和有机磷农药,而我国氮肥的利用效率较低仅为 30%~35%^[23],致使氮素大量流失。据研究,该流域近年来单位面积化肥平均施用量为 318.55 kg/hm²,已超过国际上为防止水体污染而设置的化肥施用安全上限 225 kg/hm²,从而导致土壤污染严重,一遇暴雨,就会引起水土流失,形成二次污染;四是小安家沟流域灌木林地主要以沙棘林为主,受沙棘根瘤菌固氮作用的影响,为水体提供了丰富的氮源。在环境中,氮肥主要以铵态、酰胺态和硝酸盐态存在,但最终都会转化为硝酸盐态。硝酸盐不易被土壤吸附束缚,而易于被作物吸收,但当土壤氮素过多时,硝态氮很容易随水体浸泡溶解^[24],导致 $\rho(\text{TN})$ 的超标倍数和超标水质中的出现频率最高。

土地利用结构和土地利用方式对非点源污染具有重要影响^[25],李俊然等^[26]研究表明在单一土地利用类型占主导地位的流域内,土地利用类型以林地和草地为主的小流域地表水水质明显比以农地为主的小流域地表水水质好。安家沟流域土地利用结构单一,林地虽然占有一定面积比例,但其与农地具有相同的土壤污染背景,而各种土地利用方式之间也缺乏必要的过渡。另外,土地利用方式对污染物输出的影响主要通过流域内的水土流失程度体现,水土流失既是一种非点源污染形式,同时又是其他非点源污染物流失的载体^[27]。尽管安家沟流域农地和林地已经采取了坡改梯、人工造林、退耕种草等一系列水保措施来减少水土流失,但流域内的主要污染仍集中于农地和林地,因此,还需结合流域实际,大力加强水土保持措施的实施,一是要提高拦蓄能力的设计和乔灌草混交设计,尽最大可能地提高水土保持的效率,减少径流泥沙,有效拦蓄污染物;二是合理布设水土流失防御体系,有效促进降雨就地入渗,暴雨径流拦蓄利用,遏制由于水土流失引起的污染土壤的迁移,对下游沟道(河道)的污染;三是作为坡面径流汇集区和泥沙沉积区的沟道,是小流域水土流失防治的最后一道防线,加强沟道治理工程建设,拦蓄坡面径流,可使坡面污染的径流在坝库中自然降解,防止下泄。此外,在农田管理上,还应注意科学合理施肥和喷洒农药,提高化肥和农药的利用效率,从而达到减少面源污染的目的。

4 结论

(1) 受土地利用措施特性及径流特性的综合影

响,不同土地利用方式下地表径流中有 7 项污染物平均超标 1.31 倍,其中 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 超标 1.78 倍, $\rho(\text{TN})$ 超标 2.11 倍;7 项污染物超标水质出现频率平均为 23.86%,其中 COD_{Mn} 为 28.17%,TN 为 52.03%,说明 COD_{Mn} 和 TN 都是影响水质主要因子之一,对径流水质产生较大影响。

(2) 不同土地利用方式单位面积污染负荷分布为荒坡最大,草地次之,林地第三,农地最小;但是,受土地利用措施种类、面积及其径流量和污染物负荷的影响,小安家沟流域的 COD_{Mn} 和 TN 污染负荷总量主要来源于林地和农地。

(3) 由坡面到沟道的径流过程中,地表径流受入渗、过滤等径流过程的影响, COD_{Mn} 和 TN 污染数量均出现衰减现象, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 衰减了 40.01%; $\rho(\text{TN})$ 衰减了 38.33%。

参考文献:

- [1] Dennis L C, Peter J V, Keith L. Modeling non-point source pollution in vadose zone with GIS[J]. Environmental Science and Technology, 1997,8:2157-2175.
- [2] Parry R. Agricultural phosphorus and water quality: A US environmental protection agency perspective[J]. Journal of Environmental Quality, 1998,27(2):258-261.
- [3] 高超,张桃林. 欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施[J]. 农村生态环境,1999,15(2):50-53.
- [4] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands, causes and remedies[J]. Water Science & Technology, 1996,33(4):183-189.
- [5] 杨林章,冯彦房,施卫明,等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(1):96-101.
- [6] 李自林. 我国农业面源污染现状及其对策研究[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(5):207-212.
- [7] 纪丁愈,王庆安,余红英,等. 川中丘陵地区小流域农业面源污染特征及水环境容量研究:以黄腊溪小流域为例[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(4):81-84.
- [8] 吴磊. 三峡库区典型区域氮、磷和农药非点源污染物随水文过程的迁移转化及其归趋研究[D]. 重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2014.
- [9] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R/OL]. 中华人民共和国国家统计局, (2010-02-11). http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjgb/qgqtjgb/201002/t20100211_30641.htm.
- [10] 莫明浩,方少文,涂安国,等. 水土流失面源污染及其防控研究综述[J]. 中国水土保持,2012(6):32-34.
- [11] 胡宏祥,马友华. 水土流失及其对农业非点源污染的影响[J]. 中国农学通报,2008,24(6):408-412.

(下转第 114 页)

- [3] 魏智,金会军,蓝永超,等.基于Kriging插值的黑河分水后中游地下水资源变化[J].干旱区地理,2009,32(2):196-203.
- [4] 张素芳.基于主成分分析法的咸阳市区地下水动态驱动因子分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(2):126-129.
- [5] 陈伏龙,郑旭荣,何新林,等.莫索湾灌区1998—2007年地下水埋深变化及影响因素[J].武汉大学学报:工学版,2011,44(3):317-320.
- [6] 包磊,雷进生,刘琼.基于主成分分析法的地铁系统安全综合评价[J].三峡大学学报:自然科学版,2011,33(4):57-59.
- [7] 王学民.对主成分分析中综合得分方法的质疑[J].统计与决策,2007(8):31-32.
- [8] Iverson L R, Prasad A M, Matthews S N, et al. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios[J]. Forest Ecology & Management, 2008, 254(3):390-406.
- [9] 洪燕珠,周昌乐,张志枫,等.基于随机森林法的慢性疲劳证候要素特征症状的选择[J].中医杂志,2010,51(7):634-638.
- [10] 孙雪莲,舒清杰,欧光龙,等.基于随机森林回归模型的思茅松人工林生物量遥感估测[J].林业资源管理,2015(1):71-76.
- [11] Peters J, De Baets B, Samson R, et al. Modelling ground-water-dependent vegetation patterns using ensemble learning[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2007,4(5):3687-3717.
- [12] Baudron P, Alonso-Sarria F, García-Aróstegui J L, et al. Identifying the origin of groundwater samples in a multi-layer aquifer system with Random Forest classification[J]. Journal of Hydrology, 2013,499(9):303-315.
- [13] 赵洁,徐宗学,周剑.黑河中游过去20年地下水位空间变异性分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(8):172-178.
- [14] 李江,郝新梅,范琳琳,等.黑河中游绿洲地下水位空间变异性研究[J].水力发电学报,2015,34(11):106-115.
- [15] 李启森,赵文智,冯起,等.黑河流域及绿洲水资源可持续利用理念及对策[J].自然资源学报,2005,20(3):370-377.
- [16] 侯景儒,黄竞先.地质统计学的理论与方法[M].北京:地质出版社,1990.
- [17] 李欣海.随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J].应用昆虫学报,2013,50(4):1190-1197.
- [18] 凌俐,陈丽,谢兆莉.随机森林法用于分析阿糖胞苷致不良反应发生的影响因素[J].中国药房,2015,26(8):1091-1093.
- [19] 闫朝晖. R 软件在多元统计分析教学中的应用研究[J].科技创新导报,2011(1):157-158.
- [20] 韩业珍,魏晓妹,李立.基于地统计学的地下水位时空变异特征研究[J].人民黄河,2010,32(5):52-53.
- [21] 胡晓利,卢玲.黑河中游张掖绿洲地下水时空变异性分析[J].中国沙漠,2009,29(4):777-784.
- [22] 米丽娜,肖洪浪,朱文婧,等.1985—2013年黑河中游流域地下水位动态变化特征[J].冰川冻土,2015,37(2):461-469.
- [23] 李吉超,缪建新.临泽县发展节水灌溉途径探讨[J].甘肃农业,2002(4):40-41.
- [24] 张汉军.聚苯乙烯保温板在渠道衬砌中防冻胀应用技术[J].甘肃水利水电技术,2003,39(4):294-295.

~~~~~  
(上接第108页)

- [12] 周生贤.国务院关于水污染防治工作进展情况的报告:2008年12月24日在第十一届全国人民代表大会常务委员第六次会议上[J].中华人民共和国全国人民代表大会常务委员公报,2009(1):74-78.
- [13] 杨艳春,闫莉,程伟.黄河流域非点源污染估算研究[J].人民黄河,2011,33(11):66-68.
- [14] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准 GB3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 李怀恩.估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J].环境科学学报,2000,20(4):397-400.
- [16] 刘洁,陈晓宏,周纯,等.非点源污染在东江河流环境中的贡献比例估算[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S1):79-82.
- [17] 张富,姚进忠,雷升文,等.甘肃省水土保持综合治理效益研究[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [18] 应兰兰,侯西勇,路晓,等.我国非点源污染研究中输出系数问题[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):90-95,99.
- [19] 廖义善,卓慕宁,李定强,等.基于“径流—地类”参数的非点源氮磷负荷估算方法[J].环境科学学报,2014,34(8):2126-2132.
- [20] 蒋昌波,楚贝,胡世雄,等.涟水流域非点源污染特征[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2011,8(4):64-70.
- [21] 张皓天,张弛,周慧成,等.基于SWAT模型的流域非点源污染模拟[J].河南大学学报:自然科学版,2010,38(6):644-650.
- [22] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染管理及控制[J].环境科学,1998,19(5):87-91.
- [23] 唐莲,白丹.农业活动非点源污染与水环境恶化[J].环境保护,2003(3):18-20.
- [24] 卜红梅,王岑,张全发.汉江上游金水河流域非点源污染及控制[J].水土保持学报,2009,23(4):33-38.
- [25] 胥彦玲,王苏舰,李怀恩.土地覆被变化对流域非点源污染的影响研究:以黑河流域为例[J].水土保持研究,2010,17(3):250-253.
- [26] 李俊然,陈利顶,郭旭东,等.土地利用结构对非点源污染的影响[J].中国环境科学,2000,20(6):506-510.
- [27] 孙娟,顾霜妹,李强坤.水土流失与农业非点源污染[J].水利科技与经济,2008,14(12):963-965.