

# 鹦鹑沟小流域天然降雨条件下水土及养分流失特征

宋 嘉<sup>1</sup>, 李怀恩<sup>1</sup>, 李家科<sup>1</sup>, 郝改瑞<sup>1</sup>, 彭 凯<sup>1</sup>, 丁 强<sup>2</sup>

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.陕西省环境监测中心站, 西安 710065)

**摘 要:**为研究丹江流域在不同土地利用类型下水土及养分的流失特征并提供科学有效的农业非点源污染防治依据,以南水北调中线工程中丹江流域的鹦鹑沟小流域为研究对象,建立径流小区,分析了 2019—2020 年天然降雨条件下耕地、林地、草地 3 种小区的水土及养分的流失特征。结果表明:在各小区中的水土及养分流失量均与坡度、降雨量、降雨强度呈正相关关系,其降雨—径流(泥沙)回归方程均具有良好的相关性( $R^2 > 0.85$ ),后期可用于产流、产沙量的估算预测当中。在不同的土地利用类型下,水土及养分流失量排序均为:耕地>草地>林地。各形态养分的流失趋势特征相似,其中硝氮和正磷分别在总氮和总磷中流失占比最大,并且氮素的流失量远大于磷素的流失量。相关性分析表明,各影响因素对养分流失的影响整体表现为:径流>泥沙>降雨,并且磷素的流失程度与降雨量、径流量及产沙量之间的相关性均高于氮素。

**关键词:**鹦鹑沟小流域; 土地利用方式; 产流产沙量; 养分流失特征

中图分类号:X522;TV93

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0007-06

## Characteristics of Soil and Nutrient Losses Under Natural Rainfall in Yingwugou Small Watershed

SONG Jia<sup>1</sup>, LI Huaen<sup>1</sup>, LI Jiake<sup>1</sup>, HAO Gairui<sup>1</sup>, PENG Kai<sup>1</sup>, DING Qiang<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Shaanxi Environmental Monitoring Center, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of soil erosion and nutrient losses under different land use types in Danjiang Basin, and provide scientific and effective basis for the prevention and control of agricultural non-point sources, taking Yingwugou small watershed which belongs to the Danjiang River Basin in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project as the research object, the runoff plots were established to analyze the runoff sediment, nitrogen and phosphorus loss characteristics of cultivated land, forest land and grassland under the natural precipitation conditions from 2019 to 2020. The results showed that the water, soil and nutrient losses in each plot were positively correlated with slope, precipitation and rainfall intensity, and the regression equation of precipitation and runoff (sediment) had a good correlation ( $R^2 > 0.85$ ), which could be used for the estimation and prediction of current and sediment yield in the later stage. Under different land use types, soil, water and nutrient losses decreased in the order: cultivated land>grassland>forest land. The trend of nitrogen and phosphorus losses in all forms was similar, among which nitrate and orthophosphate accounted for the largest proportion in total nitrogen and total phosphorus, respectively, and the output of nitrogen was far greater than that of phosphorus. The correlation analysis showed that the overall influences of various factors on nutrient losses was in the sequence: runoff>sediment>precipitation, and the correlation of phosphorus loss with rainfall, runoff and sediment was higher than that of nitrogen.

**Keywords:** Yingwugou small watershed; land use pattern; amount of runoff and sediment; nutrient loss

收稿日期:2020-10-06

修回日期:2020-11-04

资助项目:陕西省重点研发计划资助项目“汉江流域陕西段面源污染特征及控制技术方法研究”(2019ZDLSF06-01)

第一作者:宋嘉(1996—),女,天津市人,硕士研究生,研究方向为非点源污染与海绵城市研究。E-mail:731770775@qq.com

通信作者:李怀恩(1960—),男,陕西省商洛市商南县人,教授,博导,研究方向为非点源污染与水资源保护、生态水文等研究。E-mail:lhuaen@mail.xaut.edu.cn

李家科(1975—),男,湖北省荆门市人,教授,博导,研究方向为非点源污染与城市雨洪管理与利用等研究。E-mail:xaut\_ljk@163.com

丹江流域作为“南水北调”中线工程的水源涵养区,如何有效保障当地水质水量的安全成为项目工程中的关键问题<sup>[1]</sup>。水土流失作为原动力携带大量泥沙及养分进入水体,不仅造成水质极度恶化,并且导致土地肥力降低,迫使施肥量增加,由此造成严重的恶性循环。水污染使得原本面临的水环境问题更加复杂化,对工、农业生产和人民群众的身体健康形成不可逆转的危害<sup>[2]</sup>。因此,为了保障水安全并长期稳定的达到供水源地的水质要求,确保“一江清水供京津”,清理河流“四乱”,守护秦岭水生态,首要任务就是管控丹江流域的农业非点源污染。

随着涉水问题认识的深入,以“小流域”这个以水循环为基础,相对独立的自然地理单元展开综合性研究已成为主流方向<sup>[3]</sup>。水环境问题突出,根源往往是各个小流域内部及其综合作用。在小流域范围内控制养分输出可有效削减非点源污染物的排放量,缓解水体富营养化<sup>[4]</sup>。众多学者以小流域为基础单元对农业非点源污染进行了多方面的研究。赵晓芳<sup>[5]</sup>在黄土高塬沟壑区小流域对土壤氮磷空间分布特征及养分流失规律进行研究;耿润哲等<sup>[6]</sup>在红枫湖流域采用多因素方差分析得出施肥量是决定总氮、总磷流失的首要因素,地形及土地利用类型是次重要因素;Sui等<sup>[7]</sup>使用双重同位素追踪确定东北农业小流域不同土地利用类型产流中硝酸盐的来源,为区域最佳管理提供建议。

降雨径流、地形地貌、土地利用类型及植被覆盖等各种因素均在不同方面及程度上影响农业非点源污染的发展<sup>[8-10]</sup>。而本区域现有的研究多基于人工降雨条件下,并且对于各形态氮、磷的流失情况及影响因素相关性少有涉及。因此,本文以丹江水源区鸚鵡沟小流域的野外观测资料为依据,选取耕地、林地、草地等不同典型径流小区,基于 2019—2020 年内连续监测的 6 场典型天然降雨,分析降雨量、坡度、土地利用类型及植被覆盖等对水土与养分流失的影响,以为丹江流域农业非点源污染治理提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本次选取的研究区域鸚鵡沟小流域,位于陕西省商洛市商南县城关镇五里铺村,东经 110°52′16″—110°55′30″、北纬 33°29′55″—33°33′50″。地处秦岭东段南麓大巴山北坡,属长江流域汉江水系丹江中游地区,总面积约为 2.23 km<sup>2</sup>。该区域属北亚热带和暖温带过渡区,日照充足,四季分明。降雨年内分配极为不均,主要集中在 7—9 月,占年降雨量的 50%左

右,且多以大、暴雨形式出现。流域内多为低山丘陵地貌,河谷开阔,海拔为 464~824 m。土地利用结构不合理,利用率低,水土流失情况严重。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 所选取的径流小区要求自然条件、土地利用类型及生产状况等社会经济条件在当地具有代表性。结合已有的丹汉江治理工程和已开展监测的小区,于 2019 年 9 月开始进行试验。根据地形地貌、面积大小及试验监测的要求,投入此次研究的不同坡度和土地利用类型的径流小区共有 4 个,具体参数见表 1,均按照当地农户多年的种植习惯进行各项农事活动。

表 1 径流小区基本情况

小区 编号	设置 目的	面积/ m <sup>2</sup>	坡度/ (°)	坡向/ (°)	覆盖度/ %	植被 种类
9	坡度小区(农作物)	11.3	30	135	83	花生
13	坡度小区(农作物)	40.9	12	230	62	玉米
19	措施小区(林地)	100	13	153	78	杏林
20	措施小区(草地)	106.3	12	190	83	龙须草

1.2.2 样品采集与分析 天然降雨所产生的径流及泥沙样品通过集水池进行收集,从降雨开始起计时,每隔 2 h 进行一次采样(暴雨时适当加密)。取样时需先将泥沙与径流充分搅匀,量取 500 ml,并且应在每次取样前记录集水池中水位,精度为 0.1 cm。在水样中及时加入浓硫酸酸化至 pH<2,送回西安理工大学水质实验室进行检测,全程保持储存温度低于 4℃。

检测项目包括泥沙、正磷、总磷、总氮、氨氮、硝氮,严格按照国家试验标准操作分析,具体方法见表 2 所示。测定时先将水样调至 pH=7,其中总氮和总磷指标将水样摇匀后直接取少量液体进行测定,氨氮、硝氮及正磷指标则需要将水样以 0.45 μm 滤膜过滤后进行测定<sup>[11]</sup>。同时在径流小区内设立 HOBO 自动气象站,实时记录日最低、最高气温、日降雨量、平均湿度、太阳辐射、风速、风向等气象数据资料。

表 2 水质试验指标及方法

试验指标	试验方法
泥沙	称重法
正磷	钼酸铵分光光度法(GB11893-89)
总磷	过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法(GB/T11893-1989)
总氮	碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法(GB/T11894-1989)
氨氮	纳氏试剂分光光度法(HJ535-2009)
硝氮	酚二磺酸分光光度法(HJ/T3462007)

## 2 结果与分析

降雨—径流是导致泥沙和养分流失的主要驱动

力,由次降雨产生的径流量和泥沙量可以用来描述各径流小区的水土、养分流失情况<sup>[12]</sup>。降雨对径流的产生过程起着决定性作用,从而对泥沙及养分的输出、迁移、转化影响显著。坡度因子和土地利用类型对土壤侵蚀和养分流失过程有着一定的调节作用。坡度是地形中最主要的特征要素之一,坡度增加,导致流速加快,流量突增等多重作用会使径流动能成倍增加,冲刷能力增强,随之坡面土壤流失量同比例上升<sup>[13]</sup>。土地利用类型的变化会带来相应的经济效益,但也反作用于自然环境,由此引起的土壤内部物理化学性质的改变会对土壤侵蚀产生影响。土壤中养分循环机制的不同,对流域中污染物负荷量的贡献率也存在明显的差异<sup>[14]</sup>。植被能够在延缓坡面径流的同时降低养分的流失,植物根系可提高土壤稳定及入渗性能,降低产流产沙量。不同植被种类及覆盖度的水土保持能力都不尽相同,但都可将其总结为:降低雨滴动能,分散径流作用力<sup>[15]</sup>。

故选取 2019—2020 年典型天然降雨条件下的水量、水质及泥沙监测数据,阐明鸚鵡沟小流域内不同径流小区的水土及养分流失情况,并分析其影响因素及特征。

2.1 径流小区降雨特征分析

在 2019—2020 年内所监测到的各场次天然降雨中选取 6 场具有代表性的典型降雨,其特征见表 3。

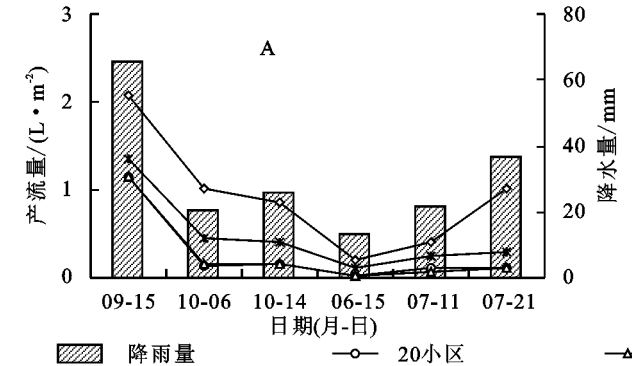


图 1 各径流小区单位面积产流、产沙量与次降雨量关系

由图 1 可得,各径流小区的产流量及产沙量基本伴随降雨量而同步增加。降雨量与产流量关系拟合程度好于其与产沙量。在各场次天然降雨条件下,径流小区的单位面积( $\text{m}^2$ )产流量及产沙量顺序均为:  $30^\circ$ 耕地(9 小区) $>12^\circ$ 耕地(13 小区) $>$ 草地(20 小区) $>$ 林地(19 小区)。

其中, $30^\circ$ 耕地(9 小区)由于坡度大且土地利用类型为花生耕地,其单位面积( $\text{m}^2$ )产流量和产沙量远大于其他小区。伴随降雨量的增大,产流量与产沙量呈倍数关系上升。 $12^\circ$ 耕地(13 小区)为玉米耕地,相较于  $30^\circ$ 耕地(9 小区)坡度平缓,且种植玉米作物的根系要发达于花

表 3 各场次典型天然降雨特征表

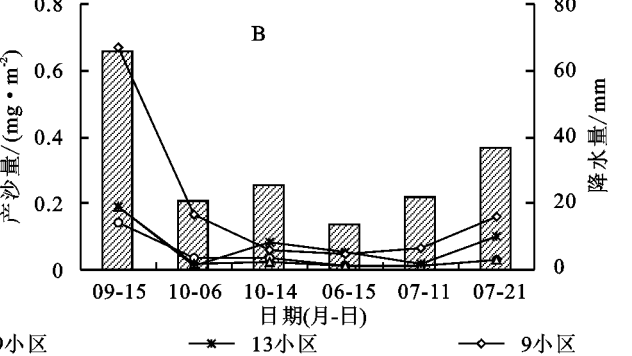
降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/min	平均降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$I_{30}/\text{mm}$	降雨类型
2019-09-15	65.6	3480	1.13	4.2	暴雨
2019-10-06	20.6	2130	0.58	1.7	中雨
2019-10-14	25.7	1710	0.90	3.5	大雨
2020-06-17	13.4	2670	0.30	1.6	小雨
2020-07-11	21.8	1830	0.71	1.6	中雨
2020-07-21	36.8	2250	0.98	1.4	大雨

由表中数据可以看出,这 6 场典型降雨含括类型多样,且主要集中在中、大雨,对研究区域的全年天然降雨代表性强,可充分印证试验结果对鸚鵡沟小流域水土及养分流失管控措施的指导意义。

其中,2019-09-15 的场次降雨不仅降雨量大,且降雨历时最长,降雨强度最大。2019-10-14 的场次降雨虽降雨量不大,但最大 30 min 降雨强度为 3.5 mm,与之降雨量相似的其他两场降雨的降雨强度分别为:1.7 mm 和 1.6 mm。对于这种降雨量、降雨强度大的场次应特别关注各径流小区的水土及养分流失情况,加密水样的采集,重点关注分析。

2.2 径流小区产流产沙特征分析

将所选取的 6 场典型天然降雨条件下各径流小区内的产流量及产沙量均转化为单位面积( $\text{m}^2$ )的计算结果后,对比分析不同坡度及土地利用类型下的产流产沙量,如图 1 所示。



生作物,保水固沙效果好,故虽然土地利用类型相同,单位面积( $\text{m}^2$ )产流量及产沙量却小于  $30^\circ$ 耕地(9 小区)。由此得出,坡度及植被类型的不同都会对水土流失造成影响,前者发挥主导作用。

降雨对产流量及产沙量不仅局限于降水量,雨强和降水历时也会产生一定的影响。2019-10-14 的场次与 2020-07-11 的场次降雨量相差不大,但 2019-10-14 的场次降雨历时短,雨强大。因此各个小区产流量及产沙量均大于 2020-07-11 的场次降雨条件下的产流量及产沙量。

19,20 小区的产流量及产沙量均较低,其坡度平



缓,土地利用类型分别为林地、草地,人类活动干扰少,在不同降雨条件下均能保持稳定的产流产沙量。对于丹江水源区鹦鹉沟小流域的农业非点源污染管控防治而言,林地的水土保持能力较优于草地,种植经济林不仅在治理水土流失方面效果显著,并且具有

一定的经济效益。因此在治理管控措施方面应因地制宜,尤其是在土壤侵蚀较为严重地区,退耕还林还草是一项十分有效的工程措施。

根据所选取的 6 场典型天然降雨数据资料,得到不同径流小区的降雨量—径流量(产沙量)关系式,见表 4。

表 4 降雨量与各径流小区径流、泥沙关系

小区名称	径流回归方程		泥沙回归方程	
9 小区	$y=0.0329x-0.0796$	$(R^2=0.8742)$	$y=0.0119x-0.1704$	$(R^2=0.8832)$
	$y=-0.00005x^2+0.0373x-0.1492$	$(R^2=0.8747)$	$y=0.0003x^2-0.0091x+0.1563$	$(R^2=0.9645)$
13 小区	$y=0.0217x-0.185$	$(R^2=0.8409)$	$y=0.0032x-0.0206$	$(R^2=0.8462)$
	$y=0.0004x^2-0.0127x+0.3507$	$(R^2=0.9035)$	$y=0.00002x^2+0.0018x+0.0011$	$(R^2=0.8510)$
19 小区	$y=0.0213x-0.3724$	$(R^2=0.8654)$	$y=0.0035x-0.0617$	$(R^2=0.8896)$
	$y=0.0005x^2-0.0218x+0.2995$	$(R^2=0.9701)$	$y=0.00009x^2-0.0034x+0.047$	$(R^2=0.9920)$
20 小区	$y=0.021x-0.3601$	$(R^2=0.8582)$	$y=0.0025x-0.031$	$(R^2=0.8639)$
	$y=0.0005x^2-0.0232x+0.3277$	$(R^2=0.9710)$	$y=0.00005x^2-0.0019x+0.0375$	$(R^2=0.9439)$

注:  $y$  为小区次径流量(次产沙量),  $x$  为次降雨量,单位与上图 1 一致。

回归方程中的  $R^2$  基本上都达到 0.85 以上,具有良好的相关性,可将回归方程用于对鹦鹉沟小流域内径流量及泥沙量的预测估算,郭效丁等<sup>[16]</sup>在鹦鹉沟小流域 2010 年的研究成果也得出相应的线性回归方程,拟合程度均较好。

各径流小区产流量及产沙量的增加速度各不相同。其中,30°耕地(9 小区)径流及泥沙量随降雨量变化增长速度最快,回归方程中斜率最大。泥沙回归方程中  $R^2$  略高于径流回归方程中  $R^2$ ,表明降雨量与泥沙的拟合程度优于其与径流量的拟合程度。但由于实测天然降雨场次较少,且测量水位、水质试验等过程均存在误差,线性关系式中的  $R^2$  还有待在今后的试验中得到进一步的提高。

2.3 径流小区养分流失特征及通量

2.3.1 氮的不同形态流失特征 将所选取的 6 场典型天然降雨条件下各径流小区产流中的总氮、氨氮、硝氮含量分别转化为单次降雨条件下的流失通量,对比分析不同坡度及土地利用类型下氮的不同形态流失情况。

由图 2 可得,各种氮的流失程度基本上同降雨量及降雨强度呈正相关关系,并且在同一土地利用类型情况下,坡度越大,流失量越大,各径流小区氮流失量顺序与产流、产沙量相同,均为 30°耕地(9 小区)>12°耕地(13 小区)>草地(20 小区)>林地(19 小区),证实养分流失与水土流失之间存在相互关系。

耕地小区由于常年翻耕,土壤结构性较差,氮流失量明显高于其他土地利用类型。总氮与氨氮、硝氮的流失趋势有着相似的特征。其中总氮和硝氮流失程度随降雨量变化拟合程度较好,氨氮却有较大的起伏变化。因为氨氮流失量少,并总氮、硝氮含量相较

于氨氮增加一个数量级,因此在曲线图中并没有同氨氮一样体现出明显的变化幅度。

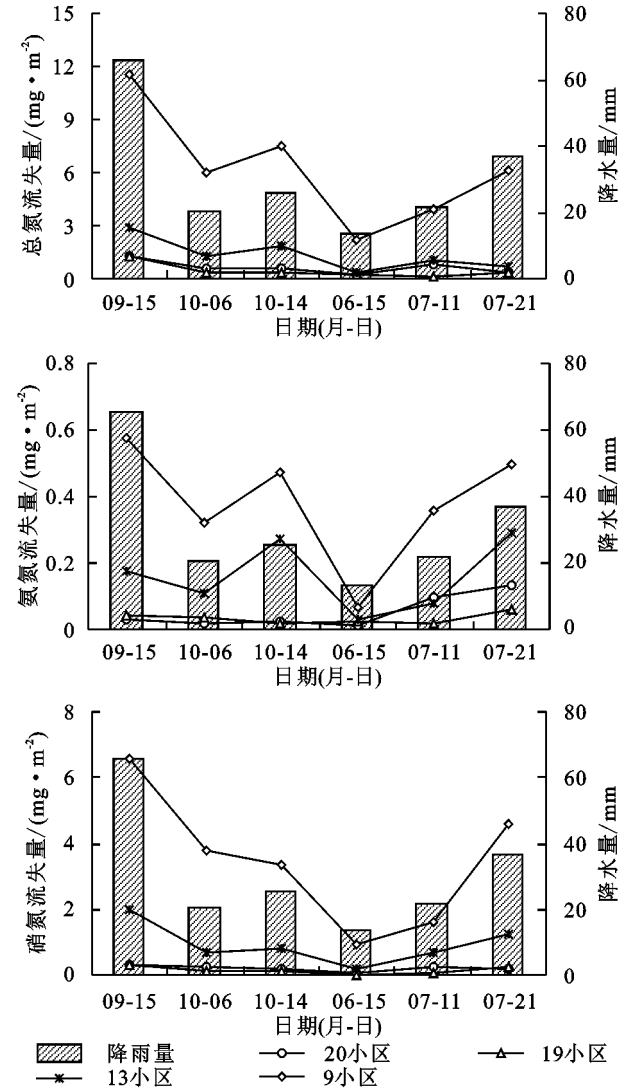


图 2 各径流小区单位面积总氮、氨氮、硝氮流失量与次降雨量关系

2.3.2 磷的不同形态流失特征 将所选取到的6场典型天然降雨条件下各径流小区产流中的总磷、正磷酸

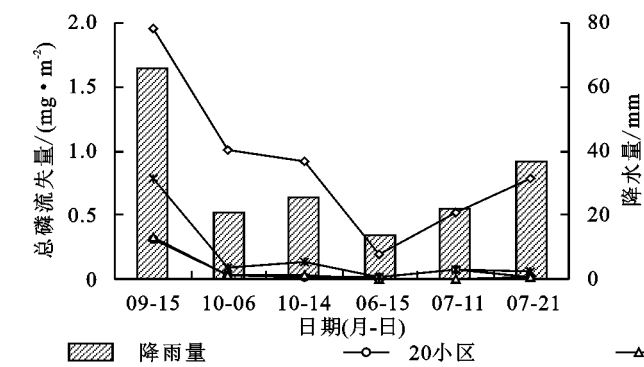
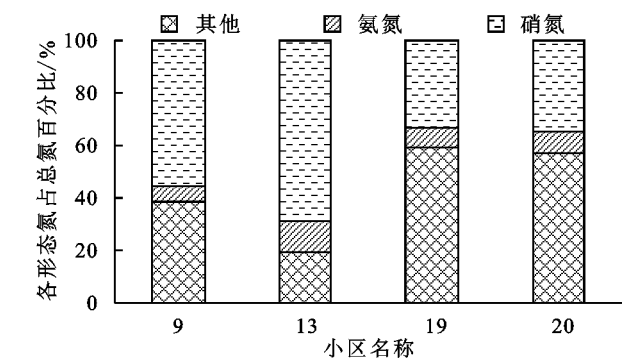


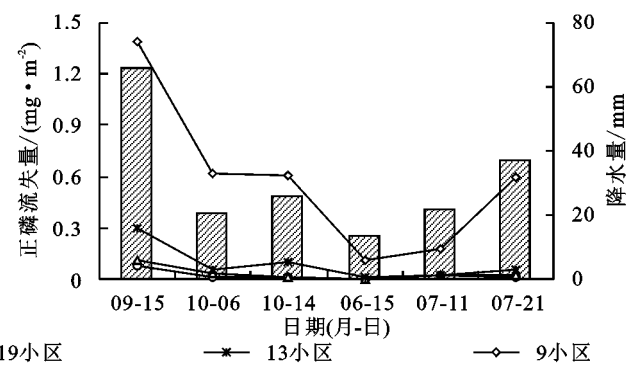
图3 各径流小区单位面积总磷、正磷流失量与次降雨量关系

由图3可知,总磷及正磷的流失量最高点均发生在降雨量65.5 mm场次中,最低点为降雨量13.4 mm场次中。在不同的土地利用类型下,耕地(9,13小区)的氮、磷流失量远大于林地(19小区)和草地(20小区)的流失量。在各径流小区中,磷的流失程度基本上与氮相类似,均与降雨量、降雨强度、坡度、产流量及产沙量呈正相关关系。总磷与正磷的流失趋势特征相似,即说明径流和泥沙是养分流失的主要载体,径流、泥沙量增加,氮、磷的流失量也同比增加。并且产流中的氮素输出量远远大于磷素输出量,张铁刚<sup>[17]</sup>曾在鸚鵡沟小流域2011—2013年的研究中也得出同样的结论。

对比2019-10-06,2019-10-14与2020-07-11这3场次降雨条件下氮、磷的流失情况,发现三者降雨量相近,但各种养分的流失程度却相差甚远。2019-10-14与2020-07-11场次的降雨强度的差距在各小区的



量分别转化为单次降雨条件下的流失通量,对比分析不同坡度及土地利用类型下磷的不同形态流失情况。



氮、磷流失量当中均有明显的体现。伴随降雨强度的增加,养分流失量也同比增加。特别是在30°耕地(9小区)和12°耕地(13小区)处曲线起伏较大。这是由于10月份各种农作物均已收获完成,此时土壤质地松散,加之没有植物根系的“保护”,径流更容易携带走残留在土壤中的养分。同样,在农作物的施肥季节,强降雨条件下,伴随径流量突增,导致大量养分在极短的时间内快速流失。据此应根据气象部门预报调整农事活动管理措施,尽量避免在短历时强降雨极端事件频发期前进行翻耕,施肥等是控制养分流失和减少农业非点源污染的有效途径。

2.3.3 氮、磷不同形态的次降雨流失占比 从氮、磷流失的各种形态的比例来看,不同土地利用方式下,氨氮的流失占比为总氮的6.09%~11.85%;硝氮的流失占比为总氮的33.56%~68.89%;而正磷的流失占比为总磷的31.17%~64.44%(图4)。

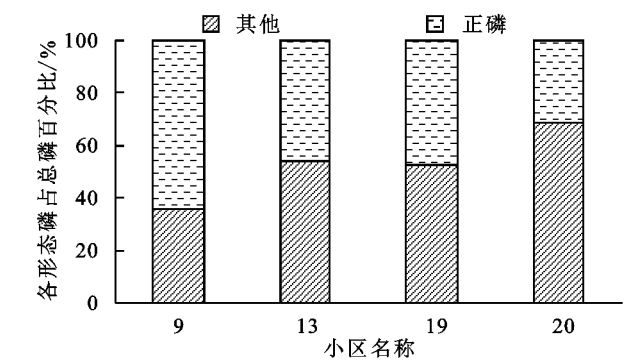


图4 各形态氮、磷流失通量所占百分比

由图4可明显看出,12°耕地(13小区)的氨氮和硝氮之和的流失占比最大为80.74%,高于其他土地利用方式。其中仅硝氮的流失量则占总氮的68.89%,硝氮的流失量均远大于氨氮,这与徐国策<sup>[18]</sup>等在同一研究区域2010—2012年的结论相同。其原因与土壤中氮素形态及其转化机制和输出迁移的驱动力有关。

氨氮因带有正电荷而更容易被土壤胶体吸附,而硝氮则带有负电荷且易溶于水,迁移能力极强,更容易随

径流流失<sup>[19]</sup>。正磷的流失占比在各种土地利用方式下基本相差不大,表明其对于正磷的流失情况影响较小。流失占比最大为64.44%,出现在30°耕地(9小区),其次为林地(19小区)的47.14%和12°耕地(13小区)的45.92%,最小为31.17%,出现在草地(20小区)。

硝酸盐氮可与水中动、植物及人体的血红蛋白相结合,造成机体缺氧,超标过度严重者会导致癌症。正磷酸盐在进入水体之后被水体中的植物、细菌和藻

类等直接利用,是造成水体富营养化的主要磷素形态<sup>[20]</sup>。因此,在防控氮、磷流失时更应该关注硝氮和正磷的流失情况,加强防控与研究。

2.4 各影响因素与养分流失负荷相关性分析

为进一步研究降雨量、径流量、产沙量等与各种形

态氮、磷流失量的相关性,利用 SPSS 22 对各径流小区中的各影响因素做不同场次的相关性分析。由表 5 可得出,降雨量、径流量、产沙量两两之间高度相关,在 0.01 置信区间水平上的相关性均达到 0.9 以上,即印证前述结论,降雨量和径流量对泥沙输出量的影响较大。

表 5 降雨量、径流量、产沙量和养分流失量的相关性

小区名称	相关性	径流量	产沙量	氨氮含量	硝氮含量	总氮含量	正磷含量	总磷含量
9 小区	降雨量	0.935 **	0.940 **	0.787	0.900 *	0.899 *	0.924 **	0.903 *
	径流量	—	0.927 **	0.787	0.974 **	0.964	0.994	0.984
	产沙量	—	—	0.592	0.837 *	0.850 *	0.921 **	0.917 *
13 小区	降雨量	0.917 *	0.920 **	0.437	0.982 **	0.796	0.928 **	0.920 **
	径流量	—	0.811	0.214	0.880 *	0.934 **	0.983 **	0.984 **
	产沙量	—	—	0.497	0.860 *	0.715	0.886 *	0.848 *
19 小区	降雨量	0.930 *	0.943 **	0.546	0.866 *	0.924 **	0.905 *	0.920 **
	径流量	—	0.996 **	0.292	0.712	0.984 **	0.982 **	0.999 **
	产沙量	—	—	0.335	0.719	0.980 **	0.972 **	0.997 **
20 小区	降雨量	0.926 **	0.929 **	0.095	0.690	0.738	0.932 **	0.890 *
	径流量	—	0.985 **	0.228	0.692	0.868 *	0.993 **	0.978 **
	产沙量	—	—	0.276	0.672	0.808	0.966 **	0.927 **

注: \*\* 相关性显著水平为 0.01, \* 相关性显著水平为 0.05。

在各形态氮、磷流失程度上,降雨量与正磷、总磷含量的相关性最高,各径流小区均到达 0.9 以上,相关性较为显著,与硝氮、总氮含量为重度相关,相关度也可达到 0.6 以上。径流量与各形态氮、磷含量的相关性明显高于降雨量和产沙量,说明在各场次降雨事件中,径流量对各形态氮、磷污染负荷的影响大于降雨量和产沙量。大部分氮、磷的流失是以径流为直接载体,少部分附着在泥沙表面。并且,在不同降雨条件下的各径流小区中,降雨量、径流量及产沙量与磷素的相关性均高于氮素。

3 结论

(1) 各径流小区的产流、产沙量基本随场次降雨量和降雨强度而同步增加,降雨量与产流量关系拟合程度好于产沙量。在不同土地利用类型条件下,单位面积产流、产沙量顺序均为:耕地>草地>林地。降雨—径流(泥沙)回归方程均具有良好的相关性( $R^2>0.85$ )。

(2) 各径流小区中的不同形态的氮、磷流失程度基本上相类似,均与降雨量、降雨强度、坡度、产流产沙量呈正相关关系,流失量顺序也相同。在不同的土地利用类型下,耕地的氮、磷流失量远大于林地和草地的流失量。总氮与氨氮、硝氮的流失趋势特征相似,总磷与正磷的流失趋势也相同,并且产流中氮素的输出量远远大于磷素,硝氮的流失量均远大于氨氮。

(3) 各影响因素的相关性分析表明,对于各形态氮、磷污染负荷的影响中,整体表现为:径流>泥沙>降雨。降雨量、径流量及产沙量与磷素的相关性均高于氮素,总氮和正磷分别在氮、磷的各种形态中相关性最高。

参考文献:

[1] 彭圆圆,李占斌,李鹏.模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流氮素流失特征[J].水土保持学报,2012,2(26):1-5.

[2] 王星,李占斌,李鹏,等.陕西省丹汉江流域面源污染现状及防治对策[J].水土保持通报,2011,31(6):186-189.

[3] Lu L, Cheng H, Pu X, et al. Identifying organic matter sources using isotopic ratios in a watershed impacted by intensive agricultural activities in Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 222: 48-59.

[4] 傅伯杰.新时代自然地理学发展的思考[J].地理科学进展,2018,37(1):1-7.

[5] 赵晓芳.黄土高原沟壑区小流域土壤氮磷空间分布及流失研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.

[6] 耿润哲,殷培红.红枫湖流域非点源污染控制区划[J].农业工程学报,2016,32(19):219-225.

[7] Sui Y, Ou Y, Yan B, et al. A dual isotopic framework for identifying nitrate sources in surface runoff in a small agricultural watershed, northeast China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,246:119074.