

黔中水利枢纽不同土地利用类型土壤养分淋溶特征

徐梦¹, 刘鸿雁^{1,2}, 吴攀¹, 涂刚琴¹, 崔俊丽¹, 刘艳萍¹

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 农学院, 贵阳 550025)

摘要: 土壤氮磷流失与土地利用类型有着密切的关系, 作为水源地工程的黔中水利枢纽保护区内主要以旱坡耕地为主, 氮磷素更易流失。选取黔中水利枢纽具有代表性的 3 种土地利用类型(耕地、林地、荒地)土壤, 采用土柱模拟淋溶试验, 对氮磷淋溶流失进行分析, 研究面源污染可能对水质产生的影响。结果表明: 不同土地利用类型土壤的氮磷素淋溶浓度与淋溶量均随着淋溶次数的增加而减少, 并逐步趋于稳定; 氮素淋溶流失的主要形式有硝态氮、氨氮、有机态氮和亚硝态氮, 其中, 有机态氮所占比例最大, 在荒地、林地、耕地中所占的比例分别为 58.75%, 51.09%, 57.07%, 其次为硝态氮, 且 3 种土地利用类型土壤硝态氮淋溶流失均大于氨氮; 磷素淋溶流失的主要形式为颗粒态磷和溶解态磷, 颗粒态磷为磷流失的主要形式, 在荒地、林地和耕地中所占比例分别为 84.73%, 75.56% 和 78.54%; 氮磷素淋溶流失在 3 种土地利用类型中的流失规律各不相同。因此, 在不同土地利用类型的土壤中, 耕地的氮素淋溶流失, 荒地的磷素淋溶流失较为严重, 应采取相应的措施防止对水体造成污染。

关键词: 土地利用; 淋溶; 土柱; 土壤养分; 氮磷

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0025-06

Characteristics of Soil Nutrient Leaching in Different Land Use Types of Hydro-junction in Central Guizhou Province

XU Meng¹, LIU Hongyan^{1,2}, WU Pan¹, TU Gangqin¹, CUI Junli¹, LIU Yanping¹

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The leaching losses of nitrogen and phosphorus from soils are closely related to land use types. Dry sloping land is the predominant type of land use in Hydro-junction in central Guizhou regarded as drinking water sources project, nitrogen and phosphorus of the sloping land are easily leaching loss. Three different typical land use types (farmland, forestland and wasteland) were chosen to analyze the leaching losses of nitrogen and phosphorus by using soil columns in order to evaluate the influence of non-point source pollution on water quality. The results showed that the leaching concentration and amount of nitrogen and phosphorus reduced, and became stable gradually with the increase of leaching duration. The main forms of nitrogen leaching loss were nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, organic nitrogen and nitrite nitrogen. The proportion of organic nitrogen was the largest, which accounted for 58.75%, 51.09%, 57.07% in wasteland, forestland and farmland, respectively, the following was nitrate nitrogen, which was more than ammonium nitrogen in different land use types. The main forms of phosphorus leaching loss were soluble phosphorus and particulate phosphorus, the proportion of particulate phosphorus was the largest, which accounted for 84.73%, 75.56%, 78.54% in wasteland, forestland and farmland, respectively. The change patterns of nitrogen and phosphorus varied in different land use types. The nitrogen leaching loss in farmland and phosphorus leaching loss in wasteland were more than others, therefore, the corresponding measures should be taken to prevent water from contamination.

Keywords: land use; leaching; soil column; soil nutrients; nitrogen and phosphorus

收稿日期: 2016-05-25

修回日期: 2016-06-06

资助项目: 国家自然科学基金(41461097); 黔科合 J 重大字([2015]2001); 研究生创新实践基地建设(贵大研 SJJJ[2015]004)

第一作者: 徐梦(1991—), 女, 山东肥城人, 硕士研究生, 研究方向: 污染控制工程。E-mail: xumeng2006@163.com

通信作者: 刘鸿雁(1969—), 女, 贵州贵阳人, 教授, 博士, 研究方向: 环境生物修复与生态修复。E-mail: re_hyliu@gzu.edu.cn

近年来,化肥的大量使用及不合理的农业管理措施使氮磷素在土壤中大量积累。土壤中的氮磷素会以各种方式进入水体,从而造成水体富营养化^[1-4]。淋溶作为氮磷素流失的一种重要方式已引起人们广泛的关注^[5-7]。不同土地利用类型土壤养分的淋溶已有大量报道,研究区域多集中于灌溉区、平原区、南方丘陵区以及半干旱区^[8-9]。由于土壤结构的复杂性及研究方法的差异性,土壤氮磷素淋溶流失量及形态方面存在较大差别。土壤氮素淋溶的主要形态有硝态氮、氨氮、有机氮和亚硝态氮^[10-11],硝态氮在耕地的淋溶流失量占淋溶水总氮的比例可高达 80%^[12],是林地、耕地氮素淋溶的主要形式^[13-14],而稻田土中氮素淋溶的主要形态差异较大^[15-18]。磷素淋溶流失的主要形态有水溶性磷、颗粒态磷和有机磷,总磷浓度在耕地淋溶水中可达 7.46 mg/L^[19],水溶性磷在耕地、林地淋溶水中的浓度分别占总磷的 66%和 56.1%^[20],颗粒态磷流失量在紫色土旱坡地是水溶态磷流失量的 1.50~1.51 倍^[21],而有机磷在耕地和林地中的存在形态尚不明确^[20]。

黔中水利枢纽是喀斯特高原深水型湖泊,由于肥料的大量使用,远远超过农作物的实际需求,造成土壤中氮磷素大量盈余,从而形成农业面源污染,引起水体富营养化,导致水环境质量下降。因此,选取黔中水利枢纽具有代表性的 3 种土地利用类型,通过室内土柱模拟试验,在相同淋溶条件下进行氮磷素淋溶模拟研究,以了解氮磷素在不同土地利用类型土壤中的淋溶流失特征,旨在为喀斯特高原深水型湖泊面源污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔中水利枢纽地理坐标为 26°25′—26°40′N, 105°10′—105°30′E,总面积约 248.12 km²。涉及到 4 个县(纳雍、织金、六枝和水城)的 7 个乡镇(新房乡、阳长镇、曙光乡、比德乡、化乐乡、百兴镇和鸡场乡)(图1)。

表 1 供试土壤基本理化性质

土地利用类型	pH 值	总氮/ (g·kg ⁻¹)	总磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
耕地	7.12	2.18	0.23	7.67	86.82	35.34	1.21
林地	7.08	2.19	0.12	4.31	81.51	32.74	1.28
荒地	6.04	1.49	0.11	3.67	76.05	31.49	1.32

1.3 试验装置

淋溶土柱采用直径为 75 mm 的 PVC 管,总高为 45 cm。土柱上方为淋溶用水容器的喷洒出水口,固定在淋溶土柱管管口。土柱下方放置淋溶滤液收集器,用以收

属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年日照 1 300~1 500 h,年平均气温 12.4℃,无霜期 250 d 左右。水量季节性变化明显,5—10 月雨量较多,其中主要集中在 6—7 月,区域水资源丰富,多年平均降雨量为 1 074 mm。该流域为乌江上游三岔河流域,属于长江流域。

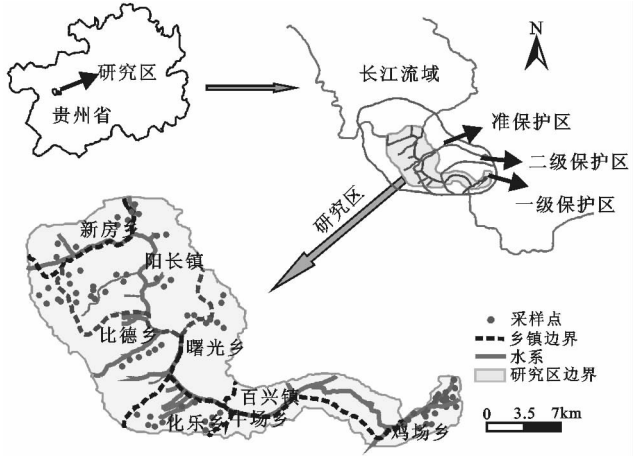


图 1 研究区域及采样点分布

1.2 样品采集与分析

土壤样品的采集于 2014 年 3 月进行,选取黔中水利枢纽具有代表性的 3 种土地利用类型(耕地、林地和荒地)的 0—20 cm 表层土样,并用 GPS 进行定位,每个样点周围进行 5 次重复采样,按 4 分法混合组成待测土样约 1 kg,耕地、林地、荒地土壤样品分别为 48,13,27 个,共计 88 个,见图 1,对 88 个土样进行土壤养分测定,发现区域内土壤养分在不同土地利用类型土壤中差异较大,尤其是耕地中有效氮和有效磷的含量远高于荒地 and 林地^[22]。淋溶试验土样分别由土壤质地和养分状况相对一致土壤样品混合而成,3 种土地利用类型土样各 5 个样点。对土壤进行研磨过 2 mm 筛,共填充 9 个土柱,耕地、林地、荒地土壤各 3 个。pH 值的测定采用电极法,土壤 TP 采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法,TN 采用半微量开氏法,有机质采用油浴加热重铬酸钾容量法,土壤容重采用环刀法,土壤中有有效磷用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,碱解氮用扩散吸收法测定^[23]。供试土壤的基本性质见表 1。

集淋溶渗滤液。首先在管底铺两层纱布,上面铺上 2 cm 的石英砂,按实地测得土壤容重换算称重后将土样填入模拟土柱,并在土壤表层铺一层纱布,使其均匀布水,每种土地利用类型的土柱做 3 个平行。

1.4 试验方法

试验采用间歇淋溶法,淋溶用水为蒸馏水。根据贵州省水利厅近年来的降雨量数据(表 2),试验选取每周淋溶量为 200 mm,为期 5 周,淋溶总量为 1 000 mm。淋滤液采用滤液收集器进行收集,测量其体积并测定其总氮、总磷、氨氮、硝态氮、可溶性磷酸盐浓

表 2 贵州省近年年降雨量统计

年份	2013	2012	2011	2010	2009	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	平均值
降雨量/mm	982	1117	821	1106	950	1160	1015	990	1130	1037	1242	1108	1300	1074

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤养分的淋溶特征

2.1.1 淋溶浓度与淋溶量的的动态变化 从图 2 可以看出,不同土地利用类型的 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 淋溶浓度与淋溶量均随着淋溶次数的增加而减少,并逐步趋于稳定;不同土地利用类型的总氮淋溶浓度与淋溶量的变化幅度都相对较大,耕地的总氮第一次淋溶浓度与淋溶量较高;除第一次淋溶时林地的氨氮淋溶浓度及淋溶量较高外,各土地利用类型土壤的淋溶液中氨氮的含量都较少,且变化幅度小,并且变化趋势一致;除林地外,荒地和耕地的硝态氮淋溶变化较大,耕地的硝态氮第一次淋溶量较高。对于总磷和可溶性磷,荒地的第一次淋溶浓度与淋溶量较大,随着淋溶次数的增加趋于稳定,且耕地、林地、荒地之间的差异不大。磷素的淋溶浓度和淋溶量均小于氮素淋溶。

2.1.2 淋溶总量的变化 5 次淋溶后养分的淋溶量已基本趋于稳定,将每次得到的各养分的淋溶量进行累加,得到养分的淋溶总量,见表 3。不同土地利用类型土壤总氮、硝态氮的淋溶量顺序为:耕地>林地>荒地,耕地的总氮和硝态氮的淋溶总量分别是荒地的 1.37 倍、1.51 倍,是林地的 1.10 倍、1.40 倍。氨氮的淋溶量顺序为:林地>耕地>荒地,林地的淋溶量分别是为荒地、耕地的 3.91 倍、2.49 倍。总磷的淋溶量顺序为:荒地>耕地>林地,可溶性磷的淋溶量顺序为:荒地>林地>耕地。对不同土地利用类型的 5 次淋溶总量进行差异显著性分析,林地与荒地、耕地在氨氮流失总量上,耕地与荒地、林地在硝态氮流失总量上的差异显著性都达到 $\alpha=0.01$ 水平。荒地和林地、耕地在总氮和可溶性磷流失上呈现显著性差异,荒地和林地在总磷流失上呈现显著性差异。

2.2 不同土地利用类型流失形态组成

2.2.1 氮流失形态组成 三种土地利用类型的土壤氮素淋溶流失的主要形式有硝态氮、氨氮和其他形态氮,其他形态的氮由有机态氮和少量亚硝态氮组成。

度。分析方法采用《水和废水监测分析方法》第四版国际分析方法,总氮采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法;氨氮采用纳氏试剂法;硝态氮采用酚二磺酸光度法;总磷采用钼锑抗分光光度法;可溶态磷由水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后测定与总磷相同;颗粒态磷的浓度为总磷浓度减去可溶态磷的浓度^[24]。

硝态氮流失在荒地、林地、耕地所占的比例分别为 36.73%,35.92% 和 37.62%,氨氮流失分别为 4.52%,12.99% 和 5.31%,均表现出硝态氮的流失大于氨氮的流失;由图 3A 可知,除林地第一次淋溶液中氨氮的比例高于硝态氮外,总的来说淋溶液中硝态氮的含量大于氨氮的含量。

2.2.2 磷流失形态组成 三种土地利用类型的土壤氮素淋溶流失的主要形式有颗粒态磷和溶解态磷,颗粒态磷流失在荒地、林地和耕地中所占比例分别为 84.73%,75.56%,78.54%,均表现为颗粒态磷流失大于溶解态磷,荒地的可溶性磷淋失主要发生在前 3 次淋溶,林地的可溶性磷淋失主要发生在前 4 次淋溶;耕地前 2 次淋溶液中溶解态磷还相对较高,此后基本趋于稳定(图 3B)。

2.3 氮磷淋溶动态特征曲线拟合

选用幂函数、指数函数和对数函数分别对各形态氮、磷淋失浓度(L)与淋洗次数(t)进行回归分析,根据拟合程度选取最佳效果模型(表 4),可以为相同淋溶条件下的不同土地利用类型土壤氮磷素淋溶流失提供参考。不同土地利用类型土壤养分淋失浓度与淋洗次数之间均有很好的相关性。各土地利用类型中硝态氮的淋失浓度都与淋洗次数间呈对数函数关系,氨氮和溶解态磷的淋失浓度都与淋洗次数间呈指数函数关系,说明溶解态磷与硝态氮的流失特征有显著差异,与氨氮的流失特征相似。对于总磷和总氮的拟合方程,林地与耕地总氮拟合为对数函数,总磷拟合为幂函数,说明林地和耕地中总氮的淋失特征与总磷有显著差异。而荒地中总氮和总磷的流失特征相似,都为指数函数拟合。这几种函数模型均表现出不同土地利用类型的养分淋失浓度随淋溶次数增加而减少,但淋溶流失变化率是不同的,对数函数前 3 次淋溶变化率较小,后 2 次淋溶流失变化率较大,幂函数方程前 3 次淋溶流失变化率较大,后 2 次淋溶流失变化率趋于稳定,与对数函数正好相反,而指数模型的淋溶流失变化率呈现逐步减小的趋势。

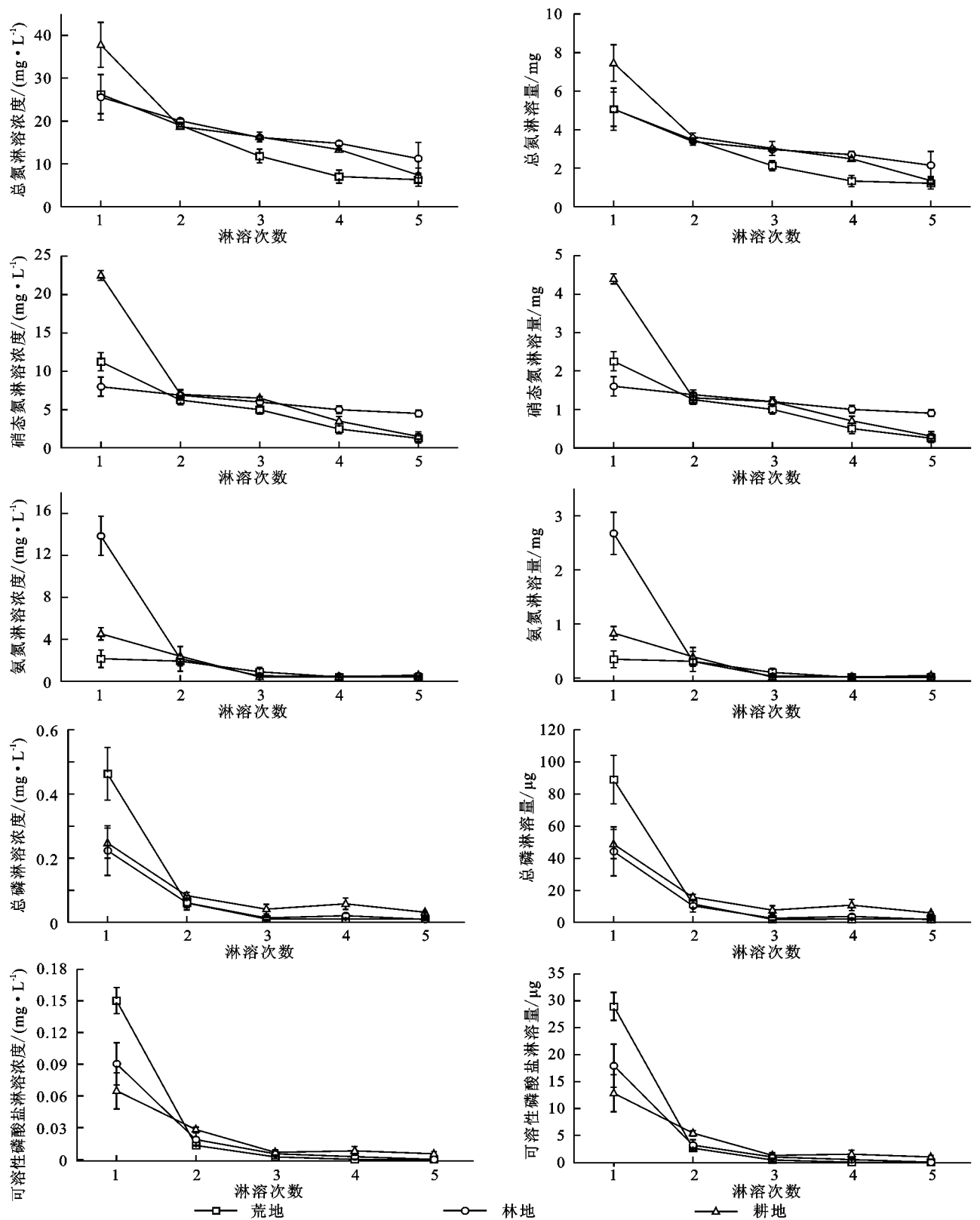
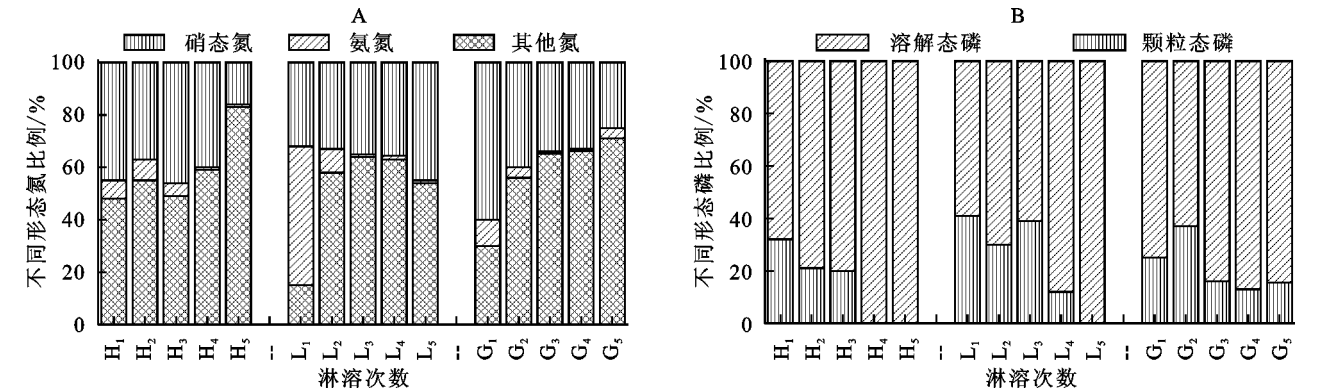


图 2 不同土地利用类型土壤养分淋溶动态变化

表 3 不同土地利用类型土壤养分淋溶总量及差异显著性分析

土地利用类型	总氮/mg			硝态氮/mg			氨氮/mg			总磷/μg			可溶性磷/μg		
荒地	13.2	b	B	5.24	b	B	0.784	b	B	107	a	A	32.0	a	A
林地	16.3	a	AB	5.67	b	B	3.06	a	A	62.9	b	A	22.6	b	A
耕地	17.9	a	A	7.96	a	A	1.23	b	B	89.1	ab	A	22.0	b	A

注:ab 表示 0.05 水平下的差异显著性;AB 表示在 0.01 水平下的差异显著性。



注: H, L, G 分别表示荒地、林地、耕地, 数字 1—5 表示淋溶次数。

图 3 氮素流失形态、磷素流失形态所占百分比随淋溶次数变化

表 4 不同土地利用类型养分淋失浓度与淋溶次数的关系

指标	荒地	林地	耕地
总氮	$L=e^{3.643-0.358t-0.007t^2}$ ($R^2=0.979$)	$L=30.465-10.904\ln(t+0.574)$ ($R^2=0.980$)	$L=20.936-8.150\ln(t-0.873)$ ($R^2=0.959$)
硝态氮	$L=10.813-5.961\ln(t-0.143)$ ($R^2=0.958$)	$L=6.8504-1.276\ln(t-0.625)$ ($R^2=0.997$)	$L=7.738-3.707\ln(t-0.981)$ ($R^2=0.986$)
氨氮	$L=e^{-0.170+1.215t-0.450t^2}$ ($R^2=0.997$)	$L=e^{4.519-1.869t-0.047t^2}$ ($R^2=0.999$)	$L=e^{-0.210+2.820t-1.178t^2}$ ($R^2=0.989$)
总磷	$L=e^{2.044-3.189t+0.374t^2}$ ($R^2=0.999$)	$L=0.224t^{-0.980}$ ($R^2=0.992$)	$L=0.245t^{-1.389}$ ($R^2=0.967$)
溶解态磷	$L=e^{1.023-3.164t+0.246t^2}$ ($R^2=0.999$)	$L=e^{-0.568-1.971t+0.137t^2}$ ($R^2=0.999$)	$L=e^{-1.629-1.183t+0.083t^2}$ ($R^2=0.971$)

3 讨论

不同土地利用类型土壤养分的流失浓度和流失量是养分流失的主要研究指标,对养分淋溶流失的防治具有重要意义。土壤养分淋溶是通过吸附—解析—迁移等交替的缓慢过程^[10],不同土地利用类型土壤的氮磷素淋溶流失情况不同,土地利用类型和耕作方式会对土壤的扰动程度和残留物的存在产生影响,引起土壤氮磷素淋溶差异^[25]。同时受土壤养分含量和土壤颗粒组成的影响,养分含量呈现出耕地>林地>荒地的趋势,土壤颗粒组成差异较大^[26]。

在淋溶开始时,土壤的水分含量低,包括土壤结合水含量也很低,水分通过土粒的缝隙渗漏,所以淋溶初期的淋溶浓度和淋溶量大,随着淋溶的持续进行,土壤颗粒在水分的作用下膨胀,土粒之间的孔隙减小,水分运移速率减慢,而使后几次淋溶逐步平稳^[27]。有研究表明,氮素淋溶流失主要受土壤质地、通气性、有机质含量、孔隙度、土壤表层含氮量等影响^[13]。耕地土壤中氮素含量比较高,使氮素更易淋溶流失,耕地的 pH 值为微碱性,使硝化过程中自养硝化细菌的生长和代谢最旺盛,造成土壤中硝态氮的累积^[28],为硝态氮的大量淋溶提供了可能性。耕地的有机质含量可达 35.34 g/kg,有机质含量高改善了土壤结构,增加了土壤的通透性^[29],从而使耕地第 1 次淋溶水中的氮素淋溶浓度和淋溶量较大。耕地中施用的大量氮肥随水迁移至土壤下层,而下层的酶活性较低,氮素可通过吸附—解析—迁移等过程运移

至淋溶水中,从而使淋溶水中的氮素含量高^[30],因此,耕地的氮素淋溶流失总量最大。由于土壤对磷素的吸附性强,一般磷素较氮素不易淋失,因此磷素的淋溶浓度和淋溶量均小于氮素淋溶,与常龙飞等^[31]的研究结果一致。荒地的磷素淋溶第 1 次淋溶浓度与淋溶量较耕地、林地大,但随着淋溶次数的增加差异减小,主要是因为荒地土壤 pH 值偏低,土壤呈酸化状态,酸化后的土壤有利于对沉淀态磷的溶解,对磷的吸持能力也有所下降,且淋溶初期土壤的缓冲能力未体现出来,随着淋溶的持续,土壤的缓冲能力体现出来,从而使差异减小^[32]。耕地、林地土壤呈碱性,淋溶初期土壤的缓冲能力较荒地强,对磷的吸持能力较强从而使磷素淋溶的初期小于荒地的磷素淋溶流失。影响磷素淋溶流失的主要因素有土壤总磷含量和沙粒含量^[13],荒地土壤中沙粒含量较高使荒地中的磷素淋溶总量高。

对于氮磷淋溶流失的形态组成而言,总的来说硝态氮的淋溶流失大于氨氮,与袁玲等^[33]对三峡库区典型农耕地的氮磷素淋溶研究结果一致,可能是由于矿化和硝化作用使硝态氮积累于土壤中,提高了土壤中的含氮量,促进了矿化和硝化作用,而产生强烈的淋溶流失,从而使硝态氮淋溶流失大于氨氮;而且土壤胶体带负电荷,对硝态氮具有较弱的吸附性能,导致硝态氮的移动能力强于氨氮,有机质含量较高,氨态氮容易被土壤胶体吸附而不易淋失。有机态氮是氮素淋溶的主要方式,可能与尿素等氮肥的过量使用有关,土壤黏粒对尿素等有机氮具有一定的吸附能

力,尿素在施用后可以迅速溶解,大量有机氮在吸附饱和时,一部分有机氮会进入表层水,一部分随水迁移至土壤下层^[34],运移至淋溶水中,从而使有机氮比例增加。颗粒态磷是磷素淋溶流失的主要方式,这与黄利玲等^[21]对三峡库区紫色土旱坡耕地土壤磷素流失特征研究结果一致,造成这种现象的原因主要是颗粒态磷易被冲刷,相对于可溶态磷更加容易流失。

4 结论

(1) 氮磷素淋溶浓度与淋溶量均随着淋溶次数的增加而减少,并逐步趋于稳定,耕地的氮素淋溶流失量比林地和荒地大,荒地的磷素淋溶流失大于耕地和林地。

(2) 在荒地、林地、耕地中氮素淋溶的主要形式都是有机态氮,所占的比例分别为 58.75%,51.09%,57.07%,其次是硝态氮,氨氮淋溶流失量最小,三种土地利用类型中磷均以颗粒态磷流失为主,所占比例达到总磷的 70%以上。

(3) 总磷、总氮在 3 种土地利用类型中的淋溶流失规律各不相同,溶解态磷和氨氮的淋溶流失特征均呈指数函数,硝态氮淋溶流失呈对数函数。

参考文献:

- [1] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000,57(1):67-73.
- [2] Zhang H C, Cao Z H, Shen Q R, et al. Effect of phosphate fertilizer application on phosphorus (P) losses from paddy soils in Taihu Lake Region: I. Effect of phosphate fertilizer rate on P losses from paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2003,50(6):695-701.
- [3] Chirinda N, Carter M S, Albert K R, et al. Emissions of nitrous oxide from arable organic and conventional cropping systems on two soil types[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010,136(3):199-208.
- [4] Li H, Liang X, Chen Y, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management[J]. *Agricultural Water Management*, 2008,95(8):887-894.
- [5] 马立珊,汪祖强,张水铭,等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. *环境科学学报*, 1997,17(1):39-47.
- [6] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2006,43(5):408-412.
- [7] 赵燮京,赵小蓉,王昌桃. 成都平原农区地下水中 NO_3^- -N 含量变化规律研究[J]. 2004, *土壤学报*, 41(1):56-60.
- [8] 王辉,王全九,邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. *水土保持学报*, 2005,19(2):61-65.
- [9] 李世清,李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. *应用生态学报*, 2000,11(2):240-242.
- [10] 纪雄辉,郑圣先,石丽红,等. 洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响[J]. *土壤学报*, 2008,45(4):663-671.
- [11] Pathak B K, Kazama F, Toshiaki I. Monitoring of nitrogen leaching from a tropical paddy in Thailand[J]. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Science and Research and Development*, 2004, VI:1-11.
- [12] 习斌,翟丽梅,刘申,等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2):326-335.
- [13] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. *环境科学*, 2012,33(10):3390-3396.
- [14] 兰木岭,高媛,高明,等. 三峡库区王家沟小流域不同坡度土壤氮素流失特征研究[J]. *中国水土保持*, 2014,15(3):39-42.
- [15] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. *Paddy and Water Environment*, 2011,9(3):333-342.
- [16] Zhao M Q, Chen X, Shi Y, et al. Phosphorous loss potential of lowland rice soil in Liaohe River Plain of Northeast China under effects of phosphorous fertilization[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009,18(11):2146-2150.
- [17] Zhao X, Xie Y, Xiong Z, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu Lake Region, China[J]. *Plant and Soil*, 2009,319(1/2):225-234.
- [18] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake Region, China[J]. *Pedosphere*, 2007,17(4):445-456.
- [19] Xue Q Y, Dai P B, Sun D S, et al. Effects of rainfall and manure application on phosphorus leaching in field lysimeters during fallow season[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013,13(9):1527-1537.
- [20] Li M, Hu Z, Zhu X, et al. Risk of phosphorus leaching from phosphorus-enriched soils in the Dianchi Catchment, Southwestern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015,22(11):8460-8470.
- [21] 黄利玲,王子芳,高明,等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡地土壤流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011,5(1):30-33.
- [22] 涂刚琴. 黔中水利枢纽水源地氮磷淋失的敏感区域识别[D]. 贵阳:贵州大学,2015.

次为 180 000 株/hm² > 150 000 株/hm² > 120 000 株/hm² > 210 000 株/hm² > 90 000 株/hm²。

(3) 不同种植密度人工甘草的土壤含水量季节动态特征主要受降雨的季节性变化决定,变化幅度又受种植密度和降雨的影响,但在甘草整个生长季土壤水分变化趋势是基本一致的,因此根据土壤含水量季节动态变化可划分为 3 个时期:土壤水分积累期(5—6 月);土壤水分消耗期(7—9 月);土壤水分稳定期(10 月—次年 4 月)。

(4) 从甘草考种的主要性状上分析,甘草的主根长度、横径和单株重量也是随着密度的增大呈现减小的趋势,表明适当增加栽植密度,虽然不利于个体商品性的提高,但却有利于整体产量的提高。从不同种植密度、产量性状以及水分特征变化的整体分析看,种植密度在 180 000 株/hm² 左右时比较符合宁夏中部干旱带的人工甘草的种植密度,并且能获得最佳的产量效益,产量达到 5 663 kg/hm²。

在宁夏中部干旱带地区,降雨量有限,地表蒸发量大,人工种植甘草密度不宜过大,以防止耗水过大的季节(6 月中下旬和 7 月上中旬)造成甘草缺水而枯死,而造成人工甘草减产,效益下降。在生产实践中,合理的种植密度是获得高产和优良质量的必要条件。

参考文献:

[1] 蒋齐,潘占兵,张清云,等. 宁夏甘草资源的保护及可持续利用对策[J]. 资源开发与市场,2004,20(2):128-130.

[2] 蔺海明,纪瑛,邱黛玉. 灌水对沙漠绿洲区甘草生长动态和产量的影响[J]. 草业科学,2011,28(11):1992-1997.

[3] 张国荣. 强度采挖甘草资源对干旱区环境的影响[J]. 干旱区资源与环境,1993(S1):363-365.

[4] 李生秀,胡田田,高亚军. 旱地土壤的合理施肥: I. 旱地

土壤的供肥特点和施肥的迫切性[J]. 干旱地区农业研究,1993(S1):1-6.

[5] 张继,姚健,丁兰,等. 甘草的利用研究进展[J]. 草原与草坪,2000,89(2):12-14.

[6] 张玉斌,曹宁,武敏,等. 黄土高原南部水平梯田的土壤水分特征分析[J]. 中国农学通报,2005,21(8):215-220.

[7] 李明,张清云,蒋齐,等. 灌水量对宁夏中部干旱带沙地土壤水分的影响研究[J]. 水土保持研究,2006,13(6):222-227.

[8] 刘长利,王文全,魏胜利. 干旱胁迫对甘草各营养器官生物量及分配的影响[J]. 中药材,2005,28(1):7-8.

[9] 祝玲敏,安文芝,谢建军,等. 播种期对栽培甘草越冬性及根系生长特征的影响[J]. 中国沙漠,2007,27(3):469-472.

[10] 王秀英,张大惠. 不同氮肥施用量对甘草农艺性状的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(3):1178-1181.

[11] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2):81-86.

[12] 余新晓. 土壤动力水文学及其应用[M]. 北京:中国林业出版社,1995.

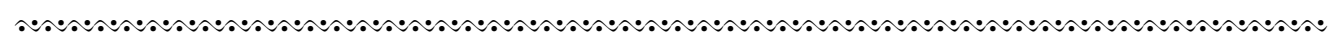
[13] 陈海宾,孙长忠,安峰,等. 黄土高原沟壑区林地坡面土壤水分特征的研究[J]. 西北林学院学报,2003,18(4):13-16.

[14] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184.

[15] 潘颜霞,王新平. 荒漠人工植被区浅层土壤水分空间变化特征分析[J]. 中国沙漠,2007,27(2):250-256.

[16] 潘占兵,李生宝,郭永忠,等. 不同种植密度人工柠条林对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究,2004,11(3):265-267.

[17] 舒维花,蒋齐,王占军,等. 宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林对土壤微生物的影响[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,2012,33(2):205-209.



(上接第 30 页)

[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[24] 黄云凤,张珞平,洪华生,等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):735-739.

[25] 牛新湘,马兴旺. 农田土壤养分淋溶的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(3):451-456.

[26] 王洪杰,李宪文,史学正,等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报,2003,17(2):44-47.

[27] 高海鹰,黄丽江,张奇,等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. 农业环境科学学报,2008,27(4):1346-1352.

[28] 左海军,张奇,徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治,2008,30(12):83-89.

[29] 方堃,陈效民,沃飞,等. 典型水稻土中硝态氮垂直穿透状况及模拟[J]. 安全与环境学报,2007,7(5):16-20.

[30] Zhang Yulong, Wang Yaosheng. Soil enzyme activities with greenhouse subsurface irrigation[J]. Pedosphere, 2006,16(4):512-518.

[31] 常龙飞,王晓龙,李恒鹏,等. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征. [J]. 生态与农村环境学报,2012,28(5):511-517.

[32] 刘嘉. 磷在原状土中的淋溶规律[J]. 环境保护科学,2014,40(6):25-29.

[33] 袁玲,王容萍,黄建国. 三峡库区典型农耕地的氮素淋溶与评价[J]. 土壤学报,2010,47(4):674-683.

[34] 纪雄辉,郑圣先,卢艳红,等. 施用尿肥和控释氮肥的双季稻田表面水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学,2006,39(12):2521-2530.