

抚仙湖流域不同农业模式砾质土壤环境质量及其氮磷流失风险评估*

夏天翔^{1,2}, 李文朝^{1**}, 潘继征¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 于2006年8月分层采集抚仙湖流域有机及传统农业农田砾质土壤, 对土壤样品的机械组成、重金属含量、养分剖面积累进行测定分析; 通过室内降雨模拟, 对不同土壤样品氮磷流失风险进行评估。结果表明: ①有机及传统农业模式下, 砾质土壤机械组成发生明显变化, 0-20cm土层砂粒含量明显降低; ②除传统农业土壤Cd为二级标准, 其他土壤重金属含量均符合国家土壤环境质量(GB/15618-1995)一级标准; ③有机及传统农业模式下0-20cm土层有机质、全氮养分明显积累, 但不同农业模式间无明显差异; 有机农业土壤全磷、水溶性氮磷积累程度显著高于传统农业土壤; ④有机农业土壤在780mm模拟降雨条件下, 氮、磷流失风险更大, 氮、磷流失总量分别是传统农业土壤的1.9倍、19.8倍。

关键词: 砾质土; 土壤环境质量; 氮; 磷; 流失; 抚仙湖

Risk assessment on soil environment quality and losses of nitrogen and phosphorus for the gravel soils under different farming practices in the watershed of Lake Fuxian

XIA Tianxiang^{1,2}, LI Wenchao¹ & PAN Jizheng¹

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: On August 2006, grave soils from organic and conventional farming were sampled within the watershed of Fuxian Lake in Yunnan Province. Soil granule composition, heavy metal contents and nutrition accumulation in the soil profile were determined. Nitrogen and phosphorus losses from the soils were assessed by the in-door rainfall simulation. The results were as below: 1) both organic and conventional farming practices significantly lower the soil sand content on the 0-20 cm soil profile; 2) all soil heavy metal contents met the Class A standard of National Environment Quality Standard for Soils (GB/15618-1995) except Cd which only met Class B standard; 3) soil total nitrogen and organic matter accumulated in the 0-20 cm soil profile, and showed no significant differences between organic and conventional farming practices. The accumulation of soil total phosphorus, NO₃-N and water dissolved phosphorus (WSP) under the organic farming practice is significantly higher than those under conventional farming practice; and 4) under the condition of 780 mm rainfall simulation, the risk of nitrogen and phosphorus losses from the organic farming soil is higher than that from the conventional farming. Total amount of nitrogen and phosphorus losses from the organic farming soil were 1.9 and 19.8 times higher than those from the conventional farming soil, respectively.

Keywords: Grave soil; soil environment quality; nitrogen; phosphorus; losses of nutrients; Lake Fuxian

砾质土壤是指含碎屑状石砾较多, 土壤熟化程度较低的一类土壤^[1], 这类土壤往往分布在湖泊及河流冲积滩附近, 由于我国耕地紧缺, 这些区域常被开垦为农田。砾质土壤水土流失严重, 在降雨条件下, 地面水极易与周围水体发生交换, 从而增加了对周围水体的污染^[2]。有机肥是砾质土壤良好的改良剂, 随着有机农业的兴起, 有机肥被大量施用。然而与传统农业相比, 有机农业同样会产生土壤^[3]及水体污染^[4]。

* 国家 863 项目(2005AA60101004)资助。2007-02-25 收稿; 2007-03-20 收修改稿。夏天翔, 男, 1979 年生, 博士研究生。

** 通讯作者: ttx0715@163.com.

有机及传统农业模式对土壤、水体的环境影响国外研究较多, Pacini 等^[5]比较了不同农业模式下土壤的养分流失与侵蚀、杀虫剂污染、生物多样性等; Younie 等^[6]报道了不同农业模式对土壤氮、磷流失的影响。而目前国内针对有机与传统农业间的环境影响研究尚少见报道, 卢东^[3]报道了华东地区有机与传统农业模式下土壤重金属污染情况, 席运官^[7]、谢标等^[8]仅综述了有机农业的环境效益, 而针对两者间土壤氮磷流失的试验研究几乎没有, 因此, 本文以云南抚仙湖流域砾质土壤为研究对象, 针对有机与传统农业模式下土壤及其水体污染风险进行分析和评估, 以期能够为流域土壤及水体污染防治提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 试验区域介绍

试验于 2006 年 3-8 月在中国科学院南京地理与湖泊研究所云南抚仙湖工作站(24°38'N, 102°54'E)进行, 该区域海拔 1722-1740m, 常年平均气温 15.6℃, 年平均日照指数 2153h, 日照率 50%, 总辐射量 122210cal/cm², 年平均蒸发量 1752mm, 年平均无霜期 273d; 多年平均降雨量 951.4mm, 雨季旱季分明, 其中 83%降雨量集中在雨季 5-10 月, 约为 788.1mm。

抚仙湖流域水热资源丰富, 农业基础设施相对完善, 传统农业非常发达, 但化肥施用量大, 农田土壤氮、磷流失已经成为抚仙湖水体污染的主要污染源^①。抚仙湖沿岸耕地紧缺, 大约有砾质土壤 102hm², 目前该区域开发利用有限, 主要以传统农业蔬菜种植为主。2006 年 3 月, 中国科学院南京地理与湖泊研究所与玉溪市澄江县农业技术推广站合作, 在该区域进行有机农业蔬菜种植中试研究。为避免传统农业生产方式对土壤的污染, 中试基地选在多年未耕作地块进行, 生产过程严格按照有机产品生产要求(GB/T19630.1-2005)进行。

1.2 样品采集

供试土壤样品于 2006 年 8 月分别采自有机农业试验区 and 周围传统农业农田, 并采集多年未耕作土壤作为对照。分别采集 0-20cm、20-40cm 和 40-60cm 土壤样品, 风干备用。试验期间降雨量(3-8 月)为 367.5mm, 不同采样区施肥、种植情况见表 1 所示。

1.3 测定项目及方法

土壤机械组成(国际制)和重金属含量采用土壤理化分析常规方法^[9], 分别由中国科学院南京土壤研究所分析测试中心和红壤研究室测定。土壤有机质、全氮、全磷、NO₃-N 含量采用土壤农化分析方法测定^[10], 土壤水溶性磷 WSP(water solved phosphorus)采用 Randall 方法测定^[11]。

土壤氮、磷流失模拟研究方法: 土壤样品风干后过 2mm 筛, 装入 PVC 管, 土壤容重控制在 1.3g/cm³ 左右, 应用 40cm 高度 PVC 管, 直径 11cm, 分别装土 20cm, 管上部和底部均留 10cm, 管底部装 10cm 左右砂石, 并加以滤布, 以过滤下渗水。本次实验模拟降雨量为抚仙湖流域多年雨季平均降雨量, 针对当地雨季降雨密集, 雨量较大的特征, 实验每隔 24h 灌水 130mm(2006 年当地周最大降雨量), 分 6 次灌完, 共计 780mm。每次灌水后收集全部下渗水量直到 2h 内无水下滴为止。水样中 TN、NO₃-N、NH₄-N、TP 和 PO₄-P 含量采用水和废水监测方法测定^[12]。

2 结果与分析

2.1 不同农业模式下土壤机械组成

不同农业模式下 0-60cm 土壤剖面机械组成(表 2)说明, 砾质土壤砂粒含量较高, 0-60cm 土层内不同土壤砂粒含量由上至下均依次升高。与未耕作土壤 0-60cm 土层砂粒含量相比, 有机及传统农业模式下,

表 1 采样区基本情况

Tab.1 Summarize of trial sites

不同农业模式	施肥 种类	施肥量 [*] (kg/hm ²)	蔬菜 种类
有机土壤	腐熟鸡粪	18667	茄子
	稀粪水	14583	辣椒
	菜油油渣	625	
传统土壤	硝酸钾	671	
	尿素	671	莲花白
	复混肥	402	

* 肥料折合 N, P 素总量: 有机土壤, 406kg/hm² 和 145 kg/hm²; 传统土壤, 406kg/hm² 和 145 kg/hm²。

①中国科学院南京地理与湖泊研究所; 玉溪市环境研究所编. 抚仙湖流域全面保护与治理规划(2006-2020). 2005.

0–20cm 土层砂粒含量明显下降, 20–40cm 土层砂粒含量稍有下降, 而 40–60cm 土层砂粒含量几乎无明显变化. 0–40cm 土层砂粒含量的降低与土壤有机质的增加有关, 有机农业模式下有机肥的施用增加了土壤有机质的含量, 而土壤有机质的粘结力比砂粒强、比黏粒弱^[13], 土壤有机质可使砾质土土粒比较容易粘结成小土团, 从而改变它松散无结构的不良状况. 传统农业模式下, 由于蔬菜种植化肥施用量大, 且次数多, 因此土壤养分水平超过一般粮作土壤^[14], 此外少量农家肥的使用以及蔬菜残留还田同样会造成土壤有机质含量的增加. 有机农业模式和传统农业模式相比, 在降低砂粒含量效果上并无明显差异, 主要原因在于这一过程受土壤质地、施肥量以及耕作时间长短等多种因素影响. 40–60cm 土层不同土壤砂粒含量几乎一致, 原因在于有机及传统农业模式并未增加该层土壤有机质含量(下文结果). 土壤质地是土壤固相物质各粒级土粒的配合比例, 土壤砂粒质量分数越高, 表面能越低, 吸附能力越弱, 粒间空隙越大, 吸水、保水性能越差^[15]. 实验结果中, 不同土壤 0–20cm 土层砂粒含量最低, 有利于减缓土壤易溶性氮、磷随水分向下迁移, 而该层土壤受降雨的直接影响, 其氮、磷流失风险远高于下层土壤.

表 2 不同农业模式下土壤剖面机械组成比较

Tab.2 Granule composition on the soil profiles from different farming

土壤深度(cm)	不同土壤	颗粒组成(%)			质地名称
		砂粒	粉砂	粘粒	
0–20	未耕作土壤	81.34	10.38	8.28	砂壤
	有机土壤	75.80	13.13	11.07	砂壤
	传统土壤	73.34	16.69	9.98	砂壤
20–40	未耕作土壤	87.52	6.51	5.98	砂土及壤砂土
	有机土壤	80.33	12.44	7.23	砂壤
	传统土壤	76.21	12.40	11.39	砂壤
40–60	未耕作土壤	97.82	1.09	1.09	砂土及壤砂土
	有机土壤	97.34	1.47	1.19	砂土及壤砂土
	传统土壤	98.11	1.17	0.72	砂土及壤砂土

2.2 不同农业模式下土壤环境质量

2.2.1 不同农业模式下土壤重金属污染 不同农业模式下 0–20cm 土壤重金属积累及评价(表 3)说明, 除传统农业土壤 Cd 含量为二级外, 其余均符合国家土壤环境质量一级标准. 有机及传统农业模式下, 土壤重金属含量普遍有所增加, 可见不同农业模式下土壤均存在重金属污染风险. 与未耕作土壤相比, 有机农业模式下土壤除 Cd 稍有降低外, 其余各重金属含量均有不同幅度上升, 其中升幅最大的是 Zn, 幅度为 41.15%, 最小的是 Pb, 幅度为 21.47%. 而传统农业模式下, 土壤各重金属升幅除 Zn 外, 均高于有机农业模式. 传统农业模式下, Cd、Pb、Ni、Cu 升幅在 60%–70%之间, 而升幅最小的 Zn 也达到了 25.86%. 结果表明, 传统农业模式下土壤重金属污染风险更大, 其主要污染物为 Cd、Pb、Ni、Cu; 而有机农业同样存在重金属污染风险, 主要污染物为 Zn. 不同农业模式下土壤重金属污染状况的差异主要来源于农业生产中的不同物质输入. 有机农业模式下土壤重金属污染仅来源于各种有机肥料, 而传统农业模式主要来源于农药、杀虫剂、化肥以及少量有机肥料等. 资料表明, 有机农业模式下重金属污染风险与重金属含量较高的鸡粪施用有关^[3]; 传统农业模式下化肥重金属含量较高, 我国市售化肥中 Zn 和 Cu 含量相对较高, Zn 含量超过 100mg/kg、Cu 含量超过 1mg/kg, 由于化肥原料来源和制造工艺的不同, 重金属含量不同化肥间差异较大^[16]. 可见, 有机及传统农业生产都必须把好肥料质量关, 必须进一步完善肥料质量检测体系.

2.2.2 不同农业模式下土壤氮、磷在剖面中的累积 养分在土壤中的过量累积, 会带来潜在的环境问题, 如硝态氮的淋失、氧化亚氮的释放等. 因此, 明确养分在剖面的分布, 对于评价养分的有效性及其可能引

起的环境效应具有重要意义^[17]。根据土壤养分分级标准^[1,18], 不同土壤0-60cm有机质、全氮、全磷等级(表4)表明, 不同农业模式下, 土壤有机质均处于缺乏状态, 0-60cm土层有机质含量由上至下依次降低; 与未耕作土壤相比, 有机及传统农业模式均提高了0-20cm土层有机质、全氮、全磷含量。其中, 有机农业0-20cm土层有机质、全氮、全磷含量升幅分别为: 67%、57%、175%, 而20-60cm土层无上升, 说明有机农业模式短期内仅对0-20cm土层养分水平影响显著, 有机农业模式下土壤养分的增加主要受土壤有机质增加的影响, 土壤有机质在土壤剖面的迁移受生物活动, 土体收缩与膨胀、孔隙水运移以及物质沉降作用的共同影响, 总体上属于物质的扩散、平移过程, 因此向下迁移缓慢^[19]。传统农业模式下0-20cm及20-40cm土层有机质、全氮、全磷含量均明显上升, 0-20cm升幅大于20-40cm, 升幅分别为66%、57%、100%。有机及传统农业模式下土壤有机质及全氮积累程度几乎一致, 由于有机农业模式土壤氮素投入小于传统农业模式(表1), 可见有机农业模式前期氮素相对不易流失。而有机农业土壤全磷含量明显高于传统农业土壤, 原因在于有机农业模式下肥料磷素的投入远远高于传统农业土壤(表1), 有机肥的大量施用使得土壤磷素流失风险大大增加^[20]。土壤有机质和全氮变化规律极其相似, 这与大部分研究结果相同, 一般认为土壤有机质和土壤全氮含量之间有一定的相关性, 土壤有机质一般约含氮5%(或6%)左右^[10], 在本文实验结果中土壤有机质含氮范围为5.5%-8.3%。

表3 不同农业模式下土壤重金属积累及评价(mg/kg, pH 除外)

Tab.3 Accumulation and assessment of soil heavy metals from different farming (mg/kg, except pH)

标准 分级	土壤环境质量标准(GB/15618-1995)					未耕作土壤		有机土壤		传统土壤	
	一级	二级	三级	监测 结果	评价 等级	监测结果	评价 等级	监测结果	评价 等级		
pH 值	自然	<6.5	6.5-7.5	>7.5	>6.5	自然		5.7		5.9	
镉≤	0.20	0.30	0.30	0.60	1.0	0.13	一级	0.12	一级	0.22	二级
汞≤	0.15	0.30	0.50	1.0	1.5	0.029	一级	0.040	一级	0.040	一级
砷(水田)≤	15	30	25	20	30						
砷(旱地)	15	40	30	25	40	2.49	一级	3.28	一级	3.52	一级
铜(农田等)≤	35	50	100	100	400	18.79	一级	25.19	一级	30.76	一级
铜(果园)	-	150	200	200	400						
铅≤	35	250	300	350	500	22.96	一级	27.89	一级	31.05	一级
铬(水田)≤	90	250	300	350	400						
铬(旱地)	90	150	200	250	300	15.25	一级	20.02	一级	25.07	一级
锌≤	100	200	250	300	500	50.23	一级	70.90	一级	63.22	一级
镍≤	40	40	50	60	200	7.93	一级	9.85	一级	13.28	一级

土壤水溶性氮磷在土壤水分含量较高时极易流失, 资料表明^[21], 雨季中表土(0-20cm)的可溶性氮素在两周内减少 50%-70%; 而 Pote 等^[22]的研究结果同样表明土壤水分状况决定了径流水中磷素水平和土壤可溶性磷(WSP)之间的关系。在不同土层内土壤 NO₃-N 和 WSP 的积累情况, 0-40cm 内有机农业土壤 NO₃-N 积累明显高于传统农业土壤, 而 40-60cm 土壤 NO₃-N 含量大大低于传统农业土壤, 可以看出传统农业模式下土壤 NO₃-N 淋溶过程更为强烈(表4)。相对于氮素淋溶而言, 有机及传统农业土壤磷素淋溶并不明显, 而 0-20cm 土层内有机农业土壤 WSP 含量高出于传统农业土壤 13 倍左右, 这一结果与土壤全磷含量变化规律一致, 因此有机农业模式下磷素投入方式及数量, 应引起高度重视。

2.3 不同农业模式下土壤氮磷流失

2.3.1 不同农业模式下土壤氮素流失(表 5) 从氮素流失动态来看, 各次灌溉后收集的不同土壤淋洗液中 TN 数量随着灌溉次数的增加, 下降趋势明显。第 1 次灌溉(模拟降雨量 130mm)后土壤淋洗出的氮素总量, 未耕作土壤、有机农业土壤和传统农业土壤分别占 6 次淋洗出氮素总量的 44.53%、71.94%和 67.15%, 由

此可见砾质土壤在第 1 次降雨发生时, 氮素流失风险最大.

从不同土壤氮素流失总量来看, 供试土样中有机农业土壤与传统农业土壤全氮及有机质水平几乎一致, 然而在连续降雨条件下有机土壤氮素流失总量最大, 分别为传统农业土壤和未耕作土壤的 1.9 倍和 2.3 倍, 之前研究认为有机农业能够抑制土壤氮素流失, 原因主要在于: (1)有机农业使用的有机肥使可溶性氮素难以短期内积累; (2)有机农业有机质明显高于传统农业; (3)有机农业管理措施等可减少氮素流失^[21]. 本实验采土时间为有机肥大量施用后 123d, 由于砂质土壤透气性好, 好氧微生物活动旺盛, 有机肥在微生物作用下分解迅速, 因此在这一时间有机农业土壤中可溶性氮素积累明显, 表 4 中有机农业土壤 NO₃-N 积累较高可以说明这一问题. 就土壤有机质而言, 有机和传统农业土壤并无太大差别, 原因可能在于砾质土壤保肥性能较差, 不易产生有机质的积累; 此外, 由于本次淋洗实验仅针对不同土壤本身氮素淋失风险评价, 因此与有机农业管理措施关系不大.

表 4 不同农业模式下土壤剖面养分积累
Tab.4 Distribution of nutrition on the soil profiles from different farming

不同农业模式	不同深度(cm)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	NO ₃ -N(mg/kg)	WSP(mg/kg)
未耕作土壤	0-20	11.5(较缺)	0.7(五级)	0.4(五级)	3.2	0.2
	20-40	4.6(极缺)	0.3(六级)	0.4(五级)	3.3	0.1
	40-60	1.2(极缺)	0.1(六级)	0.3(六级)	2.5	0.0
有机土壤	0-20	19.2(较缺)	1.1(三级)	1.1(二级)	33.7	49.2
	20-40	4.6(极缺)	0.3(六级)	0.4(五级)	40.6	0.7
	40-60	1.2(极缺)	0.1(六级)	0.5(五级)	0.9	0.0
传统土壤	0-20	19.1(较缺)	1.1(三级)	0.8(三级)	12.2	3.4
	20-40	9.0(缺)	0.5(五级)	0.5(五级)	8.9	0.0
	40-60	1.2(极缺)	0.1(六级)	0.3(六级)	26.5	0.2

表 5 不同农业模式下土壤模拟降雨氮素淋洗过程
Tab.5 Nitrogen leaching process of soils from different farming when rainfall simulated

氮素	不同土壤	六次淋洗液测定结果						结果分析*
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	
TN(mg)	未耕作土壤	46.41	25.94	10.55	9.55	6.39	5.36	S=104.21
	有机土壤	171.87	31.52	11.44	10.38	7.25	6.42	S=238.88
	传统土壤	83.56	20.59	6.41	5.07	4.39	4.42	S=124.43
NO ₃ -N(%)	未耕作土壤	31.18	6.82	16.17	31.91	51.30	87.64	A=27.80
	有机土壤	40.51	3.52	16.01	45.78	39.84	62.79	A=35.26
	传统土壤	75.63	2.01	64.36	63.84	62.78	68.09	A=61.67
NH ₄ -N(%)	未耕作土壤	2.08	2.40	6.10	6.19	7.76	8.62	A=3.63
	有机土壤	2.50	66.84	55.95	13.37	14.99	15.59	A=6.18
	传统土壤	1.04	83.65	9.73	12.87	13.17	14.26	A=3.41

* S.为总和; A.为平均值(以下同).

从不同土壤氮素流失组分上来看, 淋洗液中传统农业土壤 NO₃-N 占 TN 比例远远超过有机农业土壤和未耕作土壤, 可见传统农业土壤氮素流失主要以 NO₃-N 为主, 而有机农业土壤 NO₃-N 和 NH₄-N 的总和

仅占 TN 的 41.44%, 可以推断后者土壤氮素流失主要组分应该为有机氮素, 有机农业模式下可溶性有机质是流失氮素的主要载体. 从土壤不同形态氮素流失过程来看, 第 1 次灌溉淋洗出的氮素中三种土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 比例相对较高, 第 2 次灌溉淋洗液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 比例非常低, 此后 3-6 次灌溉 $\text{NO}_3\text{-N}$ 比例又逐渐上升, 这一过程表明不同土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的大量淋洗提高了土壤中可溶性有机氮在总可溶性氮中的比例, 随着氮素的进一步流失难溶性有机氮并不能快速转换为可溶态. 此外, $\text{NH}_4\text{-N}$ 淋洗总量在 TN 中的比例很低, 但第 2-6 次灌溉淋洗液中, 其占 TN 的比例远高于第 1 次灌溉, 可见在连续降雨条件下, 土壤电位处于还原状态, 土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 逐渐还原转化成 $\text{NH}_4\text{-N}$.

2.3.2 不同农业模式下土壤磷素流失(表 6) 从磷素流失动态来看, 各次灌溉后收集的不同土壤淋洗液中 TP 数量随着灌溉次数的增加, 基本呈下降趋势, 且下降幅度由快而缓. 与氮素流失动态相似, 第 1 次灌溉后未耕作土壤、有机农业土壤和传统农业土壤磷素淋洗总量占 6 次总淋洗量的比例稍大, 分别为 28.93%、20.99%和 20.27%, 这一比例明显低于氮素第 1 次灌溉流失总量占 6 次总流失量的比例, 可见土壤磷素在降雨条件下淋洗过程相对缓慢. 相对于前次灌溉淋洗液中 TP 水平而言, 未耕作土壤和有机农业土壤第 2 次灌溉(模拟降雨量 260mm)后下降幅度最大, 而传统农业土壤第 3 次灌溉(模拟降雨量 390mm)后下降幅度最大. 可见不同农业模式下砾质土壤在第 1 次灌溉后磷素最易流失, 而在 2-3 次灌溉后, 磷素流失程度达到相对平衡状态.

表 6 不同农业模式下土壤模拟降雨磷素淋洗过程

Tab.6 Phosphorus leaching process of soils from different farming when rainfall simulated

磷素	不同土壤	六次淋洗液测定结果						结果分析*
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	
TP(mg)	未耕作土壤	0.46	0.29	0.25	0.20	0.18	0.21	$S=1.59$
	有机土壤	9.21	6.95	7.15	7.47	6.81	6.29	$S=43.88$
	传统土壤	0.45	0.46	0.35	0.32	0.33	0.44	$S=2.35$
$\text{PO}_4\text{-P}(\%)$	未耕作土壤	13.96	50.18	39.69	47.24	50.08	58.18	$A=38.67$
	有机土壤	77.93	86.72	97.30	76.20	77.16	76.04	$A=81.79$
	传统土壤	40.65	62.73	77.73	65.94	67.12	46.60	$A=58.83$

从磷素流失总量来看, 有机农业土壤磷素流失总量远高于传统农业土壤和未耕作土壤, 分别为后者的 19.8 倍和 27.6 倍, 这与有机农业土壤磷素投入远高于其他土壤有关. 农田土壤磷素淋溶是由水分运动作为动力完成的, 本次实验中, 模拟降雨量大且密集, 符合当地的实际情况, 资料表明, 在水分条件满足时, 长期施用有机肥特别是畜禽粪便、质地较轻的土壤更容易发生磷素淋溶^[23].

从磷素流失组分来看, 土壤淋洗液中磷素可分为无机磷和有机磷两部分, 由实验结果可知, 在低淋溶量发生时(未耕作土壤和传统农业土壤), 磷素流失平均水平有机磷比例略大(41%-61%), 而在高流失量发生时(有机农业土壤), 无机磷占据绝大部分(82%). 未耕作土壤淋洗液中有有机磷占总磷比例较高, 而有机农业模式下土壤淋洗液中有有机磷浓度反而较低. 吕家珑等^[24]通过磷肥淋溶小区试验对不同小区地下排水进行监测分析, 研究结果显示, 不施磷肥小区有机磷占总磷比例反而较高, 而常年施用有机肥小区有机磷含量最低, 这与本文的研究结果相一致, 其原因尚需进一步研究. 此外, 在 6 次灌溉过程中, 第 1 次灌溉淋洗液中有有机磷占 TP 的比例相对较高, 此后比例逐渐下降. 可见与氮素相同, 有机磷在短期内难以从难溶态转化为可溶态, 不同土壤磷素流失在模拟 130mm 降雨后, 主要以无机形态为主.

3 结论

(1) 有机及传统农业模式能够有效降低砾质土壤 0-40cm 土层砂粒含量, 而对 40-60cm 土层砂粒含量无明显影响, 土壤砂粒含量的降低主要原因在于土壤有机质的增加.

(2) 有机及传统农业模式均能增加土壤重金属污染, 传统农业模式重金属污染程度更大, 主要污染物为 Cd、Pb、Ni、Cu; 而有机农业模式土壤重金属污染程度较小, 主要污染物为 Zn.

(3) 有机及传统农业模式下 0-20cm 土壤养分积累明显, 两者间有机质和全氮积累程度接近, 但有机农业土壤全磷积累程度更高. 此外, 有机农业土壤可溶性氮、磷积累明显高于传统农业, 氮、磷流失风险较大.

(4) 有机及传统农业土壤在第 1 次模拟降雨(130mm)发生时, 土壤氮、磷最易流失, 此后氮、磷流失强度逐渐降低; 在模拟 780mm 降雨条件下, 有机农业土壤比传统农业土壤氮、磷流失总量更大, 因此必须加强有机农业土壤氮、磷流失管理.

4 参考文献

- [1] 杨义三主编. 玉溪耕地土壤养分状况. 昆明: 云南科技出版社, 2002.
- [2] 章明奎, 方利平. 砂质农业土壤养分积累和迁移特点的研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 46-49.
- [3] 卢东, 宗良纲, 肖兴基. 华东典型地区有机与常规农业土壤重金属含量的比较研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 143-147.
- [4] Birgitte H, Hugo FA, Erik SK. Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, 83: 11-26.
- [5] Pacini C, Wossink A, Giesen G *et al.* Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field-scale analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2003, 95: 273-288.
- [6] Younie D, Watson CA. Soil nitrate-N levels in organically and intensively managed grassland systems. *Aspects Appl Biol*, 1992, 30: 235-238.
- [7] 席运官. 论有机农业的环境保护功能. 环境保护, 2006, 9: 49-52.
- [8] 谢标, 王晓蓉, 丁竹红. 有机农业的环境效益评估. 水土保持学报, 2002, 22(2): 71-74.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [10] 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1996.
- [11] Randall LD, Hailin Z, Jackie LS *et al.* Soil characteristics and phosphorus level effect on phosphorus loss in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 8: 1640-1650.
- [12] 国家环境保局编. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [13] 吕月事. 土壤质地与肥力的关系及其改良途径. 河北农业科技, 2003, 2: 22.
- [14] 金雪霞, 范小晖, 蔡贵信等. 菜地土壤氮素矿化和硝化作用的特征. 土壤, 2004, 36(4): 382-386.
- [15] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响. 太原理工大学学报, 2004, 35(5): 537-540.
- [16] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险. 农村生态环境, 2004, 20(2): 62-64.
- [17] 周建斌, 崔丙年, 陈竹君等. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 332-335.
- [18] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究. 土壤, 2001, 1: 47-51.
- [19] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏等. 华南亚热带山地土壤剖面有机质分布特征数值模拟研究. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1239-1245.
- [20] Tunney H, Carton OT, Brookes PC *et al.* Phosphorus loss from soil to water. New York: CAB International Press, 1997: 253-271.
- [21] 李志芳. 有机农业土壤氮素流失与防止措施. 农业环境保护, 2002, 21(1): 90-92.
- [22] Pote DH, Daniel TC, Nichols DJ *et al.* Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28: 170-175.
- [23] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测. 生态学报, 2003, 23(12): 2689-2701.
- [24] 吕家珑, Fortune S, Brookes PC. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷突变点研究. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 142-146.