

红枫湖流域枯水期土壤理化特征与磷素分异研究

张润宇, 王立英, 陈敬安

(中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要:对贵州省红枫湖枯水期流域土壤的理化性质、磷素含量与形态分布进行了初步研究。结果表明,土壤偏酸性,以粉砂粒为主,消落带土样含水率略高于林地和荒地。表土全磷和速效磷含量为 99.6~679.5 mg/kg 和 1.1~18.6 mg/kg,低于我国土壤平均水平,属喀斯特地质性缺磷;最高值分布在受人类活动污染严重的管理处和后午,且随土层深度的增加而降低。土壤中不同磷形态的含量顺序为 Residual-P>NaOH-P>HCl-P>NaHCO₃-P>H₂O-P。其中,耕作土壤中有有机碳、全氮、全磷和速效磷含量,以及 H₂O-P、NaHCO₃-P 和总可提取态磷的比例均显著高于荒地和林地,表明耕作与施肥过程不仅提高了土壤全磷和生物活性磷含量,也加剧了水土流失的环境风险。

关键词:红枫湖流域;土壤;磷;农业面源污染

中图分类号:S153 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2014)06-0719-07

化肥农药的大量应用,不仅增加了农作物产量,也加剧了对地表水质的污染程度。随着全球对工业废水和城市生活污水等点源污染的有效控制,农业面源污染问题正日益凸显。据美国环保局调查显示,农业面源污染导致约 40% 的湖泊和河流水体水质不合格^[1]。在荷兰,农业面源输入的总氮、总磷占水环境污染总量的 60% 和 40%^[2]。我国湖泊中氮、磷的一半以上来自于农业面源污染,如太湖、滇池、巢湖等^[3]。同时,农业面源污染还具有来源分散、发生的随机性大、危害范围广、时空差异性显著等诸多特点,使其治理难度比点源污染更大^[4]。因此,加强农业面源污染研究对我国水环境保护具有重要现实意义。

红枫湖是黔中地区面积最大的人工水库,系贵阳市周边上百万人口赖以生存的主要水源。伴随区域经济的快速发展,大量的污染物排入湖区,导致水质恶化和富营养化加剧,已严重危及居民用水安全。加之红枫湖地处西南喀斯特中度胁迫及生态敏感区,土壤瘠薄,森林覆盖率低,降雨丰沛,加重了流域水土流失风险与环境危害^[5,6]。磷是作物生长必需的营养元素,也是引发水体富营养化的限制因子。据早前红枫湖流域入库磷负荷估算,农业面源污染输入的磷为 26.6 t/a,占入库总量的 11.9%,仅次于工业污染源(51.3%)和城市生活污染源(19.2%),

其水环境影响不容忽视^[7]。近年来学者对红枫湖水体、沉积物中磷的含量水平、形态分布开展了大量研究^[8,9],而有关流域土壤中磷素的报道较少^[10,11]。为此,本研究调查了红枫湖枯水期流域周边土壤的理化性质,重点研究土壤磷素的含量形态及其空间分异,为后续土壤质量评价及水环境保护提供科学依据。

1 研究方法

1.1 土壤样品采集

2013年3月采集红枫湖流域周边土壤,共设置 17 个采样点(见图 1),其中北湖 7 个,南湖 10 个。正值红枫湖枯水季节,水位下降约 3 m,大面积消落带裸露。为使所采样品具有代表性,在每个采样点 5 m 范围内采集 3~5 个不同土样,捡掉砾石、动植物残体等,充分混合后用四分法缩分至 1 kg 左右,装入密封袋中带回实验室。自然风干后,用玛瑙研钵轻轻捣碎,一部分过 10 目筛用于 pH 和粒度测定,另一部分研磨过 100 目筛用于元素含量和形态分析。本次共采集 17 个点位的表土(0~10 cm)及毗邻消落带土样,8 个点位土柱(现场按 10 cm 间隔分样),以及荒地、林地和 1#、11#、14# 等采样点附近耕作翻茬地(简称耕地)等不同土地利用状况的表土(表 1)。

收稿日期:2014-05-08;改回日期:2014-07-18

基金项目:国家自然科学基金(41273151,41273148);贵阳市科技计划项目(筑科合[2012103]86号);贵州省省长专项资金项目(黔省专合字[2012]7号)。

第一作者简介:张润宇(1979-),男,副研究员,从事环境地球化学研究。E-mail: zhangrunyu@vip.gyig.ac.cn.

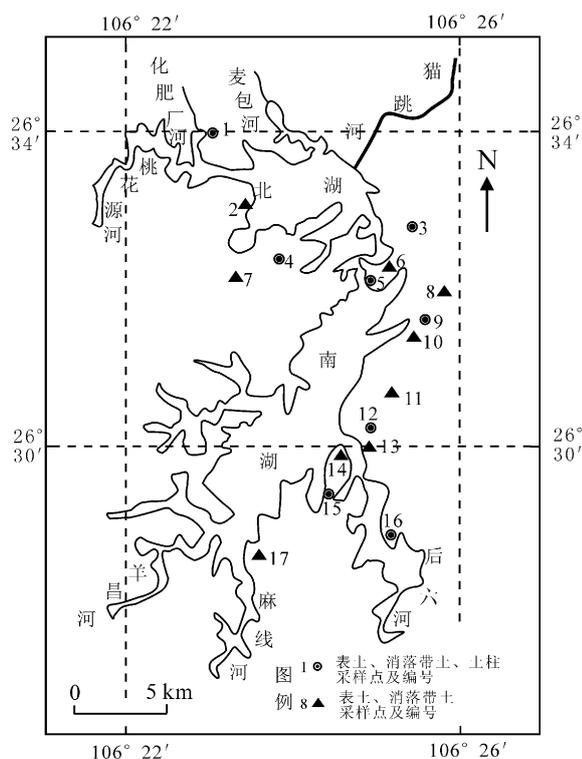


图1 红枫湖流域土壤采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of soils within the Lake Hongfeng Watershed

表1 土壤采样点自然特征

Table 1 Characteristics of the sampling sites

采样点	编号	土柱深度	土壤类型	土地利用状况
北湖	1#	50 cm	黄壤	林地
	2#		石灰土	荒地
	3#	30 cm	黄壤	林地
	4#	40 cm	黄壤	林地
	5#	30 cm	黄壤	林地
	6#		黄壤	林地
	7#		黄壤	林地
南湖	8#		黄壤	林地
	9#	40 cm	黄壤	林地
	10#		石灰土	林地
	11#		石灰土	荒地
	12#	40 cm	黄壤	荒地
	13#		黄壤	林地
	14#		黄壤	荒地
	15#	40 cm	黄壤	林地
	16#	40 cm	石灰土	林地
	17#		黄壤	林地

1.2 土壤理化性质的测定

土壤基本性质按照常规的土壤农化分析方法^[12]。

pH 采用电位法,称取风干样品 10 g 于 50 mL

高型烧杯中,加入 50 mL 无二氧化碳的水,用玻璃棒间歇搅拌 30 min,静置后用酸度计测定。

含水率:将新鲜土样约 20 g 捏碎后装入铝盒内盖紧,计算在 105 °C 下烘至恒重时的失重。

粒度:将风干土样 0.24 g 加入 30% H₂O₂,电加热板上反应去除有机质。然后用 10% HCl 去除样品中的碳酸盐。上清液加入 0.05 mol/L (NaPO₃)₆ 分散剂,利用 Malvern 2000 激光粒度分析仪进行分析。

有机碳、全氮:称取 0.5 g 土样,用 0.1 mol/L HCl 浸泡 24 h,除去无机碳,蒸馏水洗除盐酸后干燥研磨,然后用元素分析仪(vario MACRO cube)测定。

全磷采用硫酸-高氯酸消解法,经 0.45 μm 过滤后钼锑抗比色法测定溶液中的磷。速效磷采用 Olsen 法测定,用 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 值 8.5),土液比 1:20,室温下振荡 30 min,过滤后测定溶液中磷的浓度。

土壤磷形态分析采用 Hedley 方法^[13],依次用去离子水、0.5 mol/L NaHCO₃、0.1 mol/L NaOH 和 1 mol/L HCl 振荡提取 16 h,分别获得水溶性磷(H₂O-P)、NaHCO₃ 提取态磷(NaHCO₃-P)、NaOH 提取态磷(NaOH-P)、HCl 提取态磷(HCl-P)及残渣态磷(Residual P)。每次提取后离心获得上清液,经碱性过硫酸钾消解后测定溶液中的总磷。

2 结果与讨论

2.1 表土和消落带土壤的理化性质

图 2 所示,红枫湖流域土壤 pH 变化范围为 4.62~6.65,偏酸性,石灰土较为接近中性。这与前人的研究结果基本一致,红枫湖流域土壤类型主要为黄壤和石灰土^[10,14]。南北湖区表土平均含水率分别为 23.9% 和 23.0%,荒地土壤含水率明显低于林地土壤。消落带土壤含水率相对较高,为 19.2%~36.3%。D50 为“中值粒径”,指样品中小于此粒径颗粒量占总颗粒的 50%,常用它来表示该样品颗粒群的平均颗粒大小。红枫湖表土和消落带土壤 D50 分别为 4.1~9.6 μm 和 3.2~9.2 μm, D10 为 0.8~1.5 μm,表明流域土壤聚集体以粉砂粒为主,粘粒比例较低。表土有机碳含量为 0.6%~10.1%,显著高于消落带土壤(0.2%~3.6%)。表土和消落带土壤全氮差异不大,变化范围为 0.1%~0.4%。

2.2 土壤全磷及有效磷的分布特征

红枫湖表土全磷含量为 99.6~679.5 mg/kg (图 3),最高值主要分布在北湖管理处和南湖后午区域,这与沉积物中总磷含量的区域分布特征相吻合^[9]。旅游公司管理处人为活动频繁,污染严重。后午附近由于清镇发电厂长期排放的粉煤灰沉降,导致土壤全磷含量偏高。其中,速效磷为 1.1~18.6 mg/kg,约占全磷的 1.1%~5.2%,同样在北

湖管理处和南湖后午土壤含量最高。而且,土壤全磷含量随土壤深度增加显著降低(图4)。以1#土柱为例,土壤全磷从表层 10 cm 的 385.7 mg/kg,剧减至底层 50 cm 处为 95.8 mg/kg,降低了 75%,而速效磷则减少了 60%。

据全国第 2 次土壤普查,我国土壤全磷含量变化范围为 0.2~1.1 g/kg,呈由南向北递增趋势。已有研究表明,太湖、巢湖和滇池表土全磷含量分别

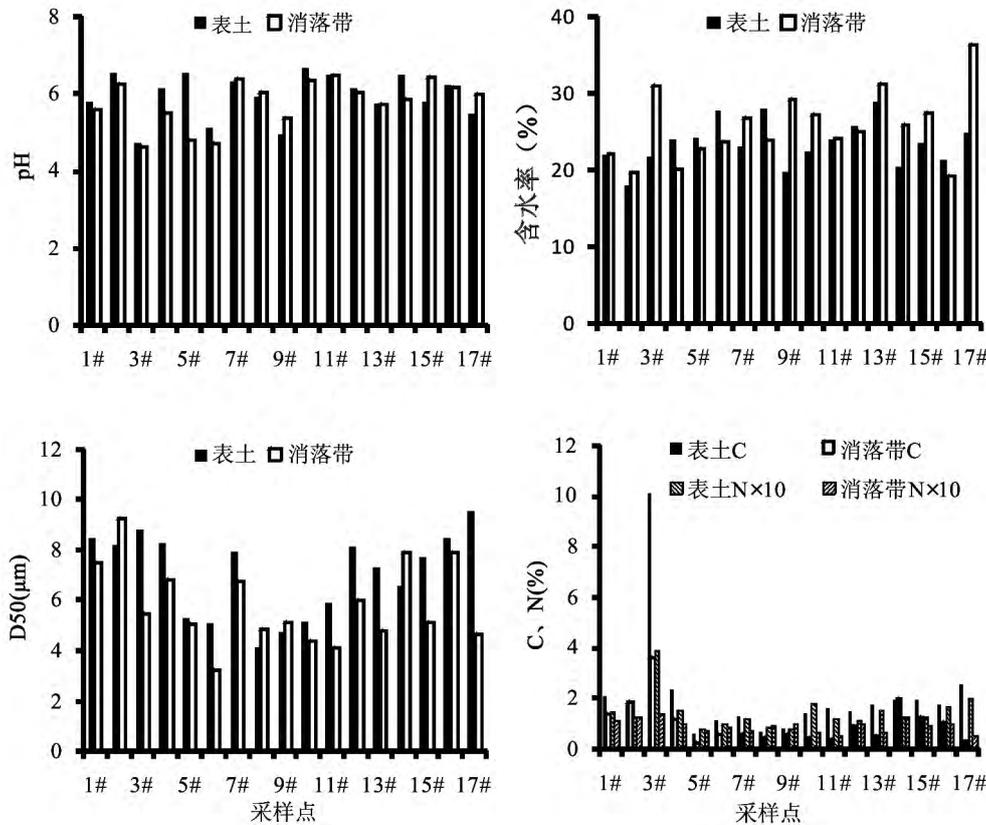


图 2 土壤基本理化性质

Fig. 2 Physical and chemical properties of the soils

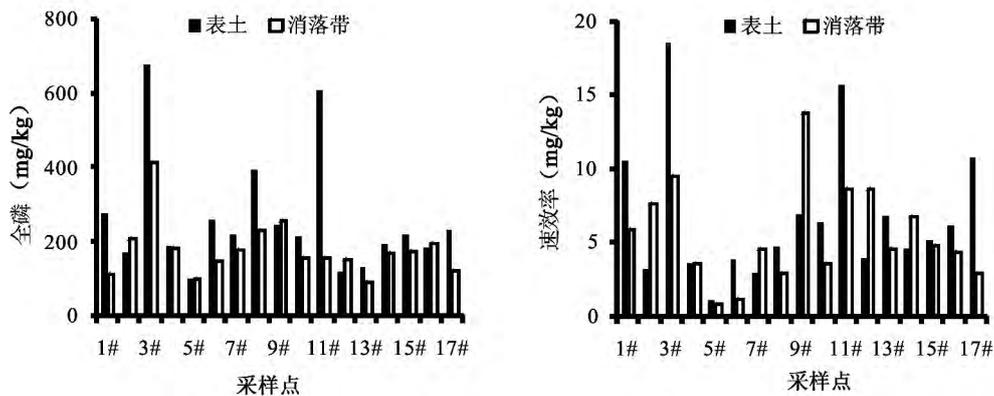


图 3 表土和消落带土壤中全磷和速效磷的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of total P and available P in topsoils and soils from the water-level-fluctuating zone

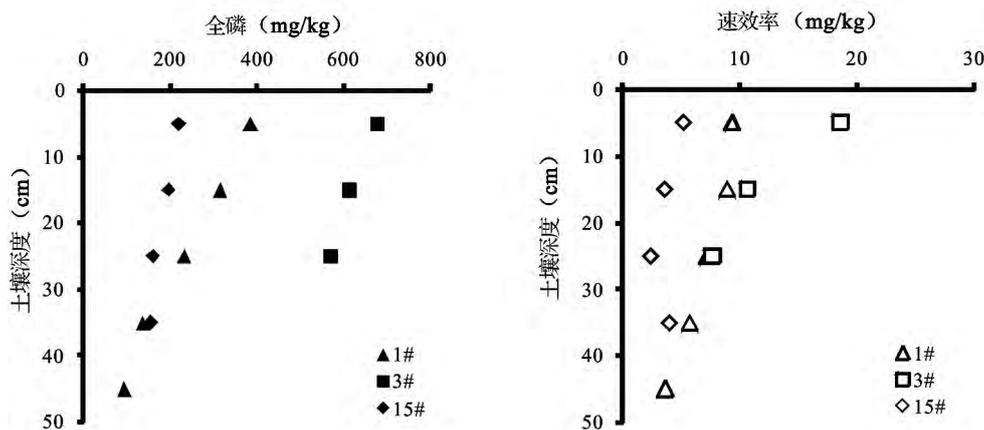


图4 典型土柱中全磷和速效磷的垂向分布

Fig. 4 Vertical distributions of total P and available P in the selected soil cores

为 0.23~1.03 g/kg、0.23~3.74 g/kg 和 0.5~7.0 g/kg^[15-17]。相较而言,红枫湖流域土壤全磷明显偏低,表明喀斯特背景下的地质性缺磷。此前对黔中黄壤林地的研究也发现,表土速效磷含量均不足 10 mg/kg^[18]。在土壤研究中,常以速效磷 20 mg/kg 为丰缺界线,可见红枫湖流域土壤普遍磷缺乏,不利于作物的生长,需要补充磷肥。

红枫湖消落带土壤全磷为 89.3~411.4 mg/kg,最高值也分布在北湖管理处,其它区域差别不大。其中,速效磷含量为 0.9~13.8 mg/kg,占全磷的 0.8%~5.7%,最高值在红枫湖后午附近,管理处含量也较高。本结果略低于范成五等的研究数据(全磷 399~711 mg/kg,速效磷 0~65 mg/kg),与采样区域和土壤不同利用状况有关,他们采集了马场镇附近的消落带稻田和旱地土壤,种植作物为水稻、油菜和玉米等,而我们的消落带样品均为荒地土壤^[10]。总体来看,消落带土壤全磷和速效磷含量均比表土低,可能表明土壤部分磷素的流失。消落带为水库季节性水位涨落或人为调度而使周边被淹没土地周期性地出露于水面的一段特殊区域,消落带土壤直接与接纳水体发生作用,通常是磷释放较敏感而脆弱的地带。红枫湖流域碳酸盐岩分布广泛,纯碳酸盐岩出露面积 877 km²,占 55%,以峰林、峰丛为主,山高坡陡,是本区岩溶最发育的地带^[5]。同时,红枫湖地处亚热带季风湿润气候,年均降雨量为 1200 mm,主要集中在夏、秋两季,并多阵雨和暴雨,很容易造成土壤侵蚀。此外,自然植被以天然次生林为主,藤棘灌丛及灌草植被也有大面积分布,森林覆盖率仅为 9.9%,低于贵州平均水平。由于不合理开发利用,森林植被建设和破坏互相消长,土壤

涵水保养能力较差,肥料在雨水冲刷下极易通过径流进入水体^[6]。刘方等(2002)^[18]研究结果显示,黄壤旱地中磷素主要是以土壤黏粒部分随径流进入水体。

2.3 不同土地利用方式对土壤磷素的分布影响

土地利用方式对土壤养分分配具有重大的影响。由图 5 可见,耕作土壤有机碳、全氮、全磷含量分别为 2.23%~3.01%、0.15%~0.22%和 0.31%~0.77%,明显较非耕作土壤(荒地、林地)要高,这是由于对作物长期施肥管理,造成土壤中养分的富集。此外,除 14# 油菜地土壤中速效磷(3.9 mg/kg)和表土相近外,1# 果林和覆膜玉米地土壤速效磷含量分别为 22.3 mg/kg 和 17.3 mg/kg,占全磷的 7.1%和 4.9%;11# 蚕豆和土豆地速效磷高达 178.4 mg/kg 和 119.7 mg/kg,是表土中含量的 8~11 倍,占全磷的 23.9%和 15.5%。杨华等(2013)^[11]研究表明,在红枫湖入湖流域不同土地利用方式下,表土全磷含量顺序为:玉米地(1000 mg/kg)>菜地(720 mg/kg)>荒地(480 mg/kg)>林地(390 mg/kg)。由于长期施肥影响,滇池流域菜地土壤中全磷和速效磷含量也显著高于林地和坡地土壤^[19]。

研究表明,磷肥进入土壤后仅有 10%~30%能被当季作物吸收利用,而大部分磷素在土壤中累积^[4]。事实上,1965 年以前贵州几乎不施磷肥。20 世纪 70 年代以前,施磷量非常低,年均总用磷肥一般不超过 20×10⁴ t,单位面积耕地用肥<60 kg/hm²。到 80 年代,总用量剧增达 30~40×10⁴ t,施用量达 120 kg/hm²左右。2006 年全省磷肥施用量约为 74.82~118.56×10⁴ t,单位面积施用量已

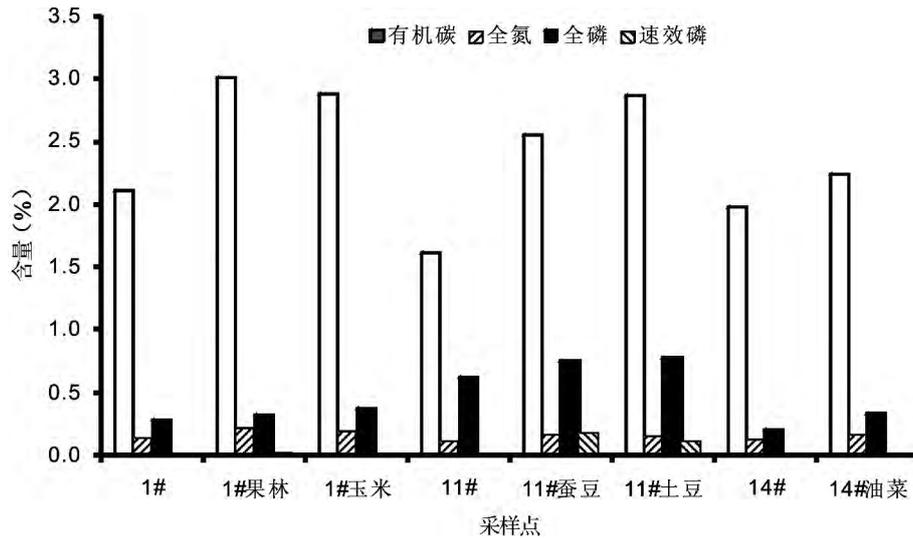


图 5 不同土地利用方式土壤中有有机碳、全氮、全磷和速效磷的含量

Fig. 5 The contents of organic carbon, total N, P and available P in soils under different land use patterns

达 159.4~244.2 kg/hm²。据上世纪 80 年代初贵州省第二次土壤普查结果,耕地土壤全磷和速效磷平均为 0.068%和 8.8 mg/kg^[20]。而近年来对全省土壤跟踪显示,农田土壤全磷含量迅速提高,土壤有效磷含量成倍增加,旱地从 5.6 mg/kg 增加至 12.5 mg/kg^[21]。红枫湖流域内土地垦殖率高,耕地面积高达 40%。流域内有 25°以上坡耕地 57.6 km²,占流域总面积的 3.2%;水土流失面积 311.5 km²,占流域面积(除湖面)的 20.2%^[5]。目前,红枫湖最高水位下的农业耕作现象还很普遍,水位一旦上升,农田完全浸没,土壤里施用的化肥将直接溶解进入水体^[10]。

尽管土壤本身对磷素的固定能力较强,但当磷素达到一定水平时,土壤中较强的磷吸附位都被占据,对磷的吸持能力也达到饱和,磷的流失量就会随之增加。Heckrath 和 Rrookes(2000)^[22]通过对洛桑实验站土壤的长期实验研究,Olsen-P(57 mg/kg)可作为土壤磷素流失对水体环境影响的预警指标。张焕朝等(2004)^[23]研究表明,太湖水稻土磷素发生径流流失的突变点是 Olsen-P 在 26~32 mg/kg。秦皇岛洋河流域典型旱坡土壤磷素淋失的临界值为 9.4 mg/kg,引起下游水体发生富营养化的临界值为 42.7 mg/kg^[24]。本研究显示,红枫湖后午区域耕作土壤中 Olsen-P 含量远超过国内外研究报道的土壤磷素流失的临界值。若土壤长期处在这种磷素有较大盈余的水平下,其水土流失的环境污染风险相当严重。

2.4 红枫湖流域土壤中磷素的形态分布

图 6 所示,红枫湖流域土壤磷素各形态含量顺序为 Residual-P>NaOH-P>HCl-P>NaHCO₃-P>H₂O-P,与杨华等(2013)^[11]研究结果类似,只是 HCl-P 相对含量较高。本次采样区域成土母质为石灰岩,土壤中磷素与大量碳酸钙结合形成沉淀。尽管所有土壤样品中均以 Residual-P 为主,但在不同类型土壤中还存在明显差异。例如,表土中 Residual-P 占全磷的 42.2%~58.7%,消落带土壤中比例高达 51.7%~62.7%,而在耕作土壤中较低,为 34.3%~47.0%。换言之,耕作土壤中总可提取态磷所占比例较荒地和林地要高。其次,耕作土壤中 H₂O-P 和 NaHCO₃-P 含量也略高于表土和消落带土壤,进一步表明土壤耕作与施肥措施对磷素形态的显著影响,使全磷和生物活性磷含量大幅增加。

磷素分级方法为研究地球化学和生物活动对土壤中磷素分布的影响、磷肥利用效率和流失风险评估等提供了重要的理论依据^[13]。在土壤磷的各种形态中,H₂O-P 是有效性最高的土壤磷素形态。NaHCO₃-P 包括无机磷和有机磷两部分,无机磷主要为土壤表面吸附态磷,类似于 Olsen-P;而有机部分是可溶性的有机磷,易于矿化吸收。NaOH-P 是以化学吸附作用吸附于土壤 Fe、Al 化合物和粘粒表面的磷。HCl-P 一般为 Ca 结合态磷,在石灰性土壤中主要为磷灰石型磷。NaOH-P 和 HCl-P 在一定条件下可转化成生物活性磷。Residual-P 为上述试剂提取后残余的比较稳定态磷,难于被植物利用^[25]。土壤中不同磷形态的含量组成主要取决于土壤本身的性质和人为耕作活动,母质类型、氧化铁

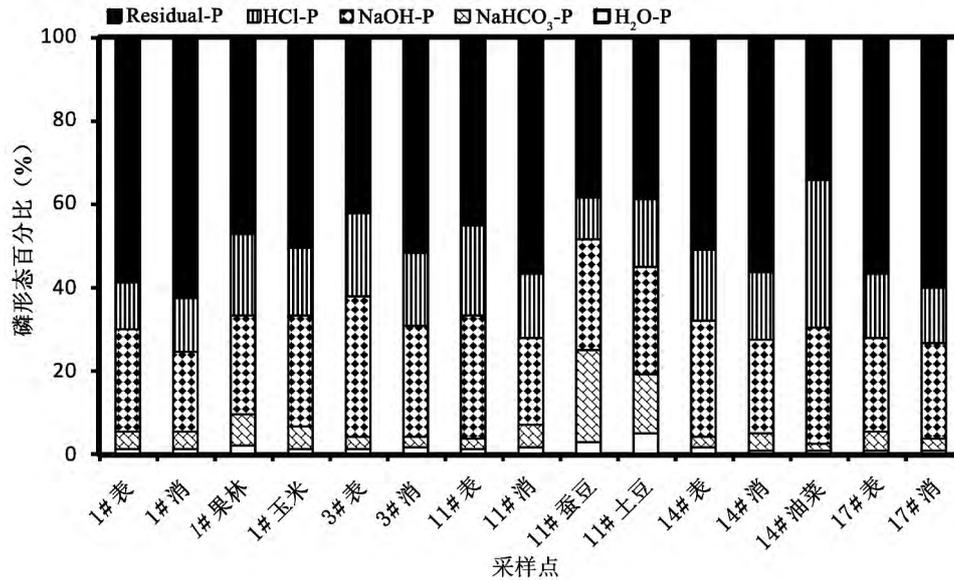


图6 红枫湖流域土壤中磷素的形态分布

Fig. 6 The distributions of P forms in soils from the Lake Hongfeng Watershed

铝含量、土壤粘粒、有机质和 pH 等均影响磷素的赋存形态及其生物活性^[26]。

3 结论

1) 红枫湖流域土壤属于喀斯特地质性缺磷, 不利于作物的生长。

2) 不同土地利用状况对土壤磷素分布具有重要影响。耕作土壤由于长期施肥管理, 不仅提高了全磷和速效磷含量, 而且生物有效磷和总可提取态磷

比例均比荒地和林地要高, 因此水土流失的潜在风险很大。

基于本研究结果, 建议进一步全面摸清流域土壤的磷素现状和动态变化, 建立土壤信息系统和监测制度, 厘清土壤环境质量与风险等级。同时, 对水源保护区内土地耕作施肥加以严格管控, 对最高水位下的耕地开展退耕还林。未雨绸缪, 做好红枫湖流域农业面源污染的防治工作。

参 考 文 献

- [1] US Environmental Protection Agency. Non-point source pollution from agriculture[EB/OL]. <http://www.epa.gov/region8/water/nps/npsurb.html>, 2013.
- [2] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands; Causes and remedies[J]. Water Science and Technology, 1996, 33: 183-190.
- [3] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国农业面源污染的现状与控制技术研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2548-2552.
- [4] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
- [5] 赵吉发. 红枫湖流域面源污染调查研究[J]. 环保科技, 1995, 17(1): 1-4.
- [6] 彭琴, 林昌虎, 何腾兵. 贵州喀斯特山区水土流失特征与水土保持研究进展[J]. 贵州科学, 2006, 24(3): 66-80.
- [7] 丁雄军. 贵州高原深水喀斯特型水库富营养化防治途径探讨——以“两湖一库”为例[J]. “红枫湖、百花湖、阿哈水库水资源环境保护研讨会”论文集, 2009, 26-32.
- [8] 吴红, 严军. 红枫湖特征污染物变化趋势分析[J]. 中国环境监测, 2009, 25(3): 90-93.
- [9] 刘超, 朱淮武, 张润宇, 等. 滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(4): 1073-1079.
- [10] 范成五, 熊元, 秦松. 红枫湖水库消落区典型土壤养分与重金属含量调查[J]. 西南农业学报, 2008, 21(4): 1029-1032.

- [11] 杨华, 龙健, 李兆君, 等. 土地利用方式对红枫湖入湖流域土壤团聚体磷含量及其形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2214—2220.
- [12] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970—976.
- [14] 朱书法, 王中良, 郑厚义. 贵州山区石灰土与黄壤土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值剖面分布差异研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25 卷(增刊): 70—73.
- [15] 刘付程, 史学正, 潘贤章, 等. 太湖流域典型地区土壤磷素含量的空间变异特征[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 77—81.
- [16] 周慧平, 高超, 孙波, 等. 巢湖流域土壤全磷含量的空间变异特征和影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2112—2127.
- [17] 张乃明, 李成学, 李阳红. 滇池流域土壤磷累积特征与释放风险研究[J]. 土壤, 2007, 39(4): 665—667.
- [18] 刘方, 何腾兵, 钱晓刚, 等. 不同利用方式下黄壤旱坡地磷素状况及环境影响分析[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 232—236.
- [19] 郑莲琴, 和树庄. 滇池流域不同土地利用方式土壤磷解吸研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 855—860.
- [20] 何佳芳, 范成五, 秦松. 贵州农业土壤磷素流失特征与防治对策[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(9): 124—127.
- [21] 陈旭晖. 贵州土壤养分含量的变化与施肥管理[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 121—128.
- [22] Hesketh N, Rrookes P C. Development of a indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 105—110.
- [23] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的“突变点”[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 6—10.
- [24] 崔力拓, 李志伟. 洋河流域典型旱坡地土壤磷素淋失风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2419—2422.
- [25] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775—1782.
- [26] Nwoke O C, Vanlauwe B, Diels J. The distribution of phosphorus fractions and desorption characteristics of some soils in the moist savanna zone of West Africa[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69: 127—141.

Physical-chemical Characteristics and Phosphorus Distribution in Soils from the Lake Hongfeng Watershed in Dry Seasons

ZHANG Run-yu, WANG Li-ying, CHEN Jing-an

(State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Physical-chemical properties, contents and form distribution of phosphorus (P) in soils from the Lake Hongfeng Watershed were investigated during a drought period. The results showed that soil was acidic, with silt-dominating particle size composition. Water contents were slightly higher in soils from the water-level-fluctuating zone than those of abandoned land. Due to P deficiency in karst geological areas, total P and available P were below the national average level, ranging from 99.6 to 679.5 mg/kg and from 1.1 to 8.6 mg/kg in top soils of the Lake Hongfeng Watershed. The highest values of total P and available P occurred in soils of management office and Houwu with heavy human activities, and gradually reduced with increasing soil depth. Soil P forms varied in the rank order of Residual-P > NaOH-P > HCl-P > NaHCO₃-P > H₂O-P. The contents of organic carbon, total nitrogen, total P and available P, the proportions of H₂O-P, NaHCO₃-P and total extractable P were significantly higher than those of forest land and abandoned land, suggesting that the cultivation and fertilization processes have not only improved the contents of total and bio-available P, but also enhanced soil loss risk on the water environment.

Key words: Lake Hongfeng Watershed; soil; phosphorus; agricultural non-point pollution