

巢湖低丘山区典型植被覆盖类型土壤磷形态分异特征^①

常龙飞^{1,2}, 王晓龙^{1*}, 聂小飞¹, 李恒鹏¹, 胡 锋³

(1 湖泊与环境国家重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2 贵阳烟草专卖局(公司)清镇分公司, 贵阳 551400;

3 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要:以巢湖低丘山区为研究对象, 分析了该地区 5 种典型植被覆盖类型表层土壤磷素含量与形态特征及其影响因素。结果表明: 次生马尾松林有机碳、总氮、速效氮、总磷与速效磷均高于其他样地, 尾矿裸地养分含量为最低, 但酸度最大。5 种样地 0~5、5~10 与 10~20 cm 3 个土层弱吸附态磷(Ex-P)和钙结合态磷(Ca-P)含量均较低, 灌木林与次生马尾松林土壤活性态磷[铝结合态磷(Al-P)与铁结合态磷(Fe-P)]含量显著高于其他样地, 而惰性态磷[闭蓄态磷(O-P)、钙结合态磷(Ca-P)与残余磷(Res-P)]则以地上群落结构较稳定的草地和次生马尾松林最高, 其中 5~10 cm 土层残余磷(Res-P)含量则以人工恢复林最高。3 个土层尾矿裸地各形态磷含量均显示较低水平, 但其 Fe-P、Al-P 含量在总磷中所占比例高于其他样地, 所以流失危害大。土层间 Ex-P、Al-P、O-P、Ca-P 与 TP 含量均随土层的加深而降低, 但 Fe-P 与 Res-P 含量在土层间规律不明显。相关分析表明土壤 Res-P 与其他形态磷间具有显著的正相关关系, “活化磷”, 即 Ex-P、Fe-P、Al-P 三者间也存在显著正相关关系。土壤养分与磷的各种形态显示了良好的正相关关系, 但速效磷与 O-P、Res-P 呈显著负相关关系。

关键词:巢湖; 土壤养分; 土壤磷形态; 岩石磷形态

中图分类号: S153.6

磷作为植物生长发育所必需的营养元素, 与氮供应受大气沉降影响相比, 植物所需要的磷, 其供应更依赖于土壤过程, 土壤磷的有效性对植物的生长发育有重大影响, 在植物生长中具有不可替代性^[1]。土壤为植被的存在和发展提供必要的物质基础, 植被的出现及其演替, 反过来也将影响土壤的形成和发育。土壤几种主要的营养元素中, 磷的含量是较低的, 总含量在 0.2~2.0 g/kg 范围内, 平均约为 0.5 g/kg(P₂O₅ 1.2 g/kg)^[2-3]。在较短的时间尺度上, 磷的生物地球化学循环主要是生态系统内部植被与土壤间的生物化学循环, 系统内部的生态过程控制着磷的迁移转化。土壤中磷素受生物地球化学作用的影响存在着多种形态, 不同形态磷素的生物有效性及其在土壤中的迁移能力均存在较大差异^[4, 13]。土壤中 95%~99% 的磷以难以利用的迟效状态存在, 参与土壤磷循环的只是全磷很小的一部分。除了土壤磷的有效性对植物的生长有重要影响外, 土壤中的磷扩散速率差异巨大, 也容易造成植物根际土中可利用的营养元素不平衡, 从而导致营养吸收的抑制作用; 土壤磷还可以通过限制

微生物的生长活动, 影响土壤酶的分泌以及氮的矿化, 从而限制植物的生长^[5]。植物与土壤的相互作用是维护土壤磷有效性的关键过程。磷可以随植被的发育和演替, 通过树干径流、渗透水、枯枝落叶、细根脱落、根系分泌物等不断归还到土壤中^[6], 因此在健康的系统中, 植物和土壤紧密联系, 共同保证系统内磷的高效利用和低流失量; 而在人为干扰严重的生态系统中, 较低的地上部分磷归还量是导致土壤有效磷缺乏的最主要因素^[7]。所以植物与土壤的相互作用是维护土壤磷有效性的关键过程。

巢湖位于安徽省中部, 属长江下游左岸水系, 是我国环境污染重点治理的“三河三湖”之一。20 世纪 80 年代初, 巢湖水体开始呈现富营养化状态; 进入 90 年代后, 蓝藻滋生, 富营养化加剧, 并逐渐演变成全国富营养化最为严重的湖泊之一; “十五”末, 巢湖呈中度富营养状态, 其中西半湖已处于重度富营养状态^[8-10]。巢湖周边丘陵区地处富磷地质带, 水域周围分布有古生代泥盆纪红色石英砂岩、中生代侏罗纪灰色砂岩及白垩纪红色砂岩、晚更新世黄褐至棕黄

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41171024)和国家水专项项目(2008ZX07103)资助。

*通讯作者(wangxl@niglas.ac.cn)

作者简介: 常龙飞(1985—), 男, 内蒙古丰镇人, 硕士研究生, 主要从事面源污染方面研究。E-mail: changlongfei8853@163.com

色含铁锰结核的黏土或亚黏土和全新世灰色亚砂土，且人为干扰强烈，土地利用类型变化较快，地表植被类型复杂多样。事实上，除工农业污染输入外，由于人为干扰剧烈，周边丘陵地区地表径流磷的输入也是巢湖水体快速富营养化的重要因素之一^[11]。目前针对巢湖水体富营养化评价及其流域水环境评估已有大量研究^[8-9]，其中湖泊环境中磷素含量、分布与迁移转化，以及其与水体藻类生长的关系得到持续关注^[12]。事实上，巢湖湖体中的磷的含量与形态主要取决于流域磷素的输入，但关于巢湖周边丘陵区磷的含量及其输移特征少见报道^[13]。本文通过研究巢湖低丘山区不同植被类型土壤磷的含量及形态特征，旨在探明植被对富磷地质区土壤磷含量及形态特征的影响，为该地区合理利用土地资源，有效恢复地表植被生态系统，进而控制巢湖水体富营养化提供理论基础。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区位于巢湖流域东北部低丘山区，为巢湖流域富磷地区小枞皋河上游。该地区属北亚热带湿润季风气候区，主要气候特点是：季风明显、四季分明、气候温和、雨量充沛、光照充足，年均日照 2 019.2 ~ 2 074.1 h，年平均气温为 15.7℃ ~ 16.1℃，≥10℃积温为 2 290℃ ~ 2 340℃，无霜期为 229 ~ 234 天，多年平均降水量为 1 032 ~ 1 205 mm，但降水季节分

布不均，雨量最多月份为 7 月，最少的为 12 月。研究区植被生长良好，主要植被类型为荒草地、灌木林、马尾松林、尾矿裸地以及农作旱地。其下分布着一套古老的含磷变质岩系，主要为元古界肥东群双山组：矿层产于白云质大理岩之下部的片麻岩、片岩和透镜状大理岩中，主要矿层 3 层，成似层状和透镜状，断续延长 2 ~ 3 km，矿体延长一般数十米至数百米，厚一般在 5 m 左右，含 P₂O₅ 一般在 10% ~ 20% 左右；矿藏已开采 8 年以上，人为干扰强烈。土壤类型主要是以花岗片麻岩和片麻岩等岩石的风化坡积为母质所发育来的偏酸性的黄棕壤，部分高度分化为红壤。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取与样品采集 2009 年 5 月与 2010 年 8 月在研究区选择 5 种典型植被类型，分别为尾矿裸地、灌木林、草地、次生马尾松林、人工恢复林。每个典型植被类型分别设置面积为 4 m × 4 m 的混合样方各 5 个，调查每个样方内植物的种类(优势种和伴生种)与盖度(表 1)。考虑到草地植被根系主要集中于 0 ~ 20 cm 土层，同时植被对土壤质量的影响主要集中在表层土壤(0 ~ 5 cm)^[14]，因此在开展植被调查的同时利用不锈钢土钻(内径 5 cm)采集 0 ~ 5、5 ~ 10 与 10 ~ 20 cm 土层各约 500 g 土样分别装入聚乙烯封口袋，土样及时运回(8 h 内)实验室后，拣除石块等杂物，将土样自然风干后磨碎，分别过 20 目与 100 目筛，用于土壤磷含量、形态以及其他土壤理化指标测定^[15]。

表 1 巢湖低丘山区典型土地利用类型植被覆盖特征

Table 1 The dominant species typical hygrophilous vegetation and companion species typical hygrophilous vegetation in Chaohu hill

植物群落	优势种	伴生种	覆盖度(%)
灌木林	圆叶胡枝子、高羊茅、马尾松	野菊花、野胡萝卜、天蓝苜蓿、白三叶、马兰、金菊花	81 ± 4 b
荒草地	狗牙根、小苜蓿、苦菜	野菊花、野胡萝卜、蒲公英、紫苜蓿、早熟禾等	95 ± 2 a
次生马尾松林	马尾松、圆叶胡枝子	火棘、中华结缕草、狗牙根、野菊花、紫荆、中华胡枝子、野胡萝卜	85 ± 3 b
人工恢复林	马尾松、野菊花、中华结缕草	马兰、早熟禾、天蓝苜蓿、早熟禾、小苜蓿、野菊花	51 ± 3 c

注：表中同列数据小写字母不同表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平，下表同。

1.2.2 样品的测定与分析 土壤理化性质：pH 采用无 CO₂ 水浸提，酸度计测定，土：水为 1：2.5；有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定；全氮含量采用凯氏法测定；全磷含量采用高氯酸消化、钼锑抗比色法测定；有效氮含量采用康维皿扩散法测定；有效磷含量采用双酸浸提、钼锑抗比色法测定^[15]。磷的形态采用 Zhang 和 Jackson^[16]的方法测定，样品依次用 1 mol/L NH₄Cl、0.5 mol/L NH₄F、0.1 mol/L NaOH、0.3 mol/L Na₃C₆H₅O₇ + Na₂S₂O₄ 与 0.5 mol/L (1/2H₂SO₄) 进行提取，振荡后用 4 000 r/min 的离心机离心 15 min，上清液用钼蓝比色法进行测定(GB-11893-89)，依次测得弱吸附态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合

态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和钙结合态磷(Ca-P)，最后算出残余磷(Res-P)^[17]。数据与图表分析和处理采用 SPSS 13.0 软件及 Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 巢湖低丘山区不同植被类型土壤基本理化性质

表 2 中各土地利用类型 0 ~ 5、5 ~ 10 与 10 ~ 20 cm 土层 pH 分别在 7.03 ~ 8.34、6.25 ~ 8.25 和 6.04 ~ 7.96 之间，以尾矿裸地最低，人工马尾松林最高。次生马尾松林表层土壤(0 ~ 5 cm)有机碳(27.71 g/kg)明显高于其他样地，其次为灌木林(24.50 g/kg)、草地(22.13 g/kg)、人工恢复林(19.34 g/kg)与尾矿裸地(7.28 g/kg)；5 ~ 10 cm

表 2 巢湖低丘山区不同植被类型土壤养分含量特征
Table 2 Soil nutrient contents of typical vegetations in Chaohu hill region

植物群落	土层 (cm)	pH	有机碳(g/kg)	总氮(g/kg)	总磷(g/kg)	速氮(mg/kg)	速磷(mg/kg)
尾矿裸地	0~5	7.03 ± 0.17 d	7.28 ± 0.21 g	0.26 ± 0.04 e	0.20 ± 0.03 f	80.51 ± 2.17 d	25.81 ± 0.83 c
	5~10	6.25 ± 0.22 e	8.53 ± 0.14 g	0.24 ± 0.01 e	0.18 ± 0.04 f	40.25 ± 3.58 e	18.66 ± 1.94 e
	10~20	6.04 ± 0.13 e	7.82 ± 0.28 g	0.19 ± 0.02 e	0.12 ± 0.01 g	39.25 ± 2.36 e	10.58 ± 2.07 g
灌木林	0~5	7.89 ± 0.09 bc	24.50 ± 4.88 b	1.45 ± 0.13 ab	0.41 ± 0.019 b	156.92 ± 12.1 a	29.78 ± 1.21b c
	5~10	7.87 ± 0.12 bc	19.64 ± 2.05 d	1.07 ± 0.03 cd	0.24 ± 0.02 e	126.6 ± 9.3 b	27.04 ± 0.59 c
	10~20	7.75 ± 0.08 bc	18.52 ± 0.83 de	1.01 ± 0.07 cd	0.26 ± 0.02 de	90.32 ± 5.4 d	26.89 ± 0.66 c
荒草地	0~5	7.91 ± 0.11 bc	22.13 ± 1.78 c	1.25 ± 0.25 bc	0.39 ± 0.025 b	115.12 ± 27.7 bc	27.92 ± 2.33 c
	5~10	7.68 ± 0.12 bc	18.42 ± 2.55 de	1.18 ± 0.18 c	0.34 ± 0.008 c	92.34 ± 14.5 d	22.04 ± 0.89 d
	10~20	7.72 ± 0.06 bc	14.60 ± 2.23 f	0.94 ± 0.07 d	0.21 ± 0.03 ef	91.12 ± 8.3 d	15.09 ± 0.54 f
次生马尾松林	0~5	7.82 ± 0.09 bc	27.71 ± 3.32 a	1.58 ± 0.20 a	0.45 ± 0.023 a	161.13 ± 22.2 a	40.75 ± 0.74 a
	5~10	7.66 ± 0.16 bc	23.63 ± 0.95 bc	1.38 ± 0.07 b	0.34 ± 0.005 c	112.72 ± 10.3 c	27.43 ± 0.52 c
	10~20	7.55 ± 0.07 c	20.12 ± 1.13 cd	1.05 ± 0.09 cd	0.31 ± 0.04 cd	108.51 ± 7.5 c	30.18 ± 0.63 b
人工恢复林	0~5	8.34 ± 0.14 a	19.34 ± 2.78 d	1.23 ± 0.23 bc	0.31 ± 0.029 cd	91.22 ± 11.2 d	28.14 ± 1.02 bc
	5~10	8.25 ± 0.09 ab	17.11 ± 2.35 e	1.15 ± 0.04 c	0.29 ± 0.007 d	82.23 ± 7.9 d	22.92 ± 1.11 d
	10~20	7.96 ± 0.11 b	13.72 ± 0.78 f	0.89 ± 0.09 d	0.23 ± 0.03 ef	83.54 ± 3.6 d	23.06 ± 0.56 d

与 10~20 cm 土层有机碳含量分别在 8.53~23.63 g/kg 与 7.82~20.12 g/kg 之间, 显示了相似的分异趋势。0~5 cm 土层总氮也以次生马尾松林显著最高, 为 1.58 g/kg, 其次为灌木林、草地、人工马尾松林和尾矿裸地; 总磷也显示了相似的变异趋势, 以次生马尾松林最高, 尾矿裸地最低; 次生马尾松林有效态氮、磷显著高于其他生态斑块, 而尾矿裸地有效态氮则显著最低。在 5~10 cm 与 10~20 cm 土层次生马尾松林有机碳、全氮、全磷、有效氮和有效磷含量也处于较高水平, 尾矿裸地则显示了较低的有机质与养分含量。各样地 0~20 cm 土层间土壤有机质、全氮、全磷、有效氮和有效磷均随土层的加深而降低。

2.2 巢湖低丘山区不同植被类型土壤磷形态及其含量特征

表 3 为巢湖流域典型低山丘陵区土壤磷形态含量。可以看出, 5 种样地 Ex-P 含量均较低, 0~5 cm 与 5~10 cm 土层分别以荒草地(4.44 mg/kg)和尾矿裸地最高(4.35 mg/kg), 人工恢复林则均显示了最低的 Ex-P 含量, 分别为 2.88 mg/kg 与 2.60 mg/kg; 各样地 10~20 cm 土层 Ex-P 含量在 3.63~2.67 mg/kg 之间, 以尾矿裸地最高, 灌木林最低。3 个土层 Ex-P 含量依次为 0~5 cm(3.84 mg/kg)>5~10 cm(3.33 mg/kg)>10~20 cm(3.06 mg/kg)。

Fe-P 是土壤磷素的主要形态, 各样地的含量均较高。0~5 cm 土层 Fe-P 含量在 87.56~51.73 mg/kg

之间, 以灌木林最高, 人工恢复林最低; 5~10 cm 土层次生马尾松林显示了最高的 Fe-P 含量(85.97 mg/kg), 其次为草地(75.33 mg/kg)、灌木林(62.29 mg/kg)与人工恢复林(61.46 mg/kg), 尾矿裸地为最低(57.47 mg/kg); 10~20 cm 土层各样地 Fe-P 含量在 67.15~44.31 mg/kg 之间, 与 5~10 cm 土层 Fe-P 含量分异趋势一致。土层间 Fe-P 含量分异趋势依次为 5~10 cm(68.50 mg/kg)>0~5 cm(63.88 mg/kg)>10~20 cm(54.48 mg/kg)。土壤磷素中, Al-P 的贡献不可忽视。0~5 cm 与 10~20 cm 土层 Al-P 含量均以灌木林最高, 分别为 45.65 mg/kg 和 34.36 mg/kg, 5~10 cm 土层次生马尾松林则显示了最高的 Al-P 含量, 平均含量为 44.96 mg/kg, 尾矿裸地 Al-P 含量均为最低。土层间 Al-P 含量分异趋势与 Ex-P 一致, 依次为 0~5 cm(35.56 mg/kg)>5~10 cm(32.73 mg/kg)>10~20 cm(30.51 mg/kg)。

O-P 也是土壤磷素的主要形态之一, 在土壤磷含量中所占比例较高。0~5 cm 土层 O-P 含量以草地为最高, 平均含量为 135.07 mg/kg, 其次为次生马尾松林(121.54 mg/kg)、灌木林(102.88 mg/kg)和人工恢复林(89.12 mg/kg), 而以尾矿裸地最低, 仅为 30.46 mg/kg; 5~10 cm 与 10~20 cm 土层 O-P 含量均与 0~5 cm 土层 O-P 含量分异趋势相似, 含量分别在 32.90~120.89 mg/kg 和 30.58~73.97 mg/kg 之间, 都以草地最高, 尾矿裸地最低。土层间 O-P 含量分异趋势与 Ex-P 一致, 依次为 0~5 cm(95.81 mg/kg)>5~10 cm(78.25 mg/kg)>10~20 cm(59.75 mg/kg)。

表 3 巢湖低丘山区不同植被类型土壤磷形态含量(mg/kg)
Table 3 Contents of phosphorus forms in soils of typical vegetations in Chaohu hill region

植被群落	土层(cm)	Ex-P	Fe-P	Al-P	O-P	Ca-P	Res-P
尾矿裸地	0~5	4.10 ± 0.62 ab	61.36 ± 8.08 d	27.64 ± 0.95 cd	30.46 ± 1.07 hi	14.80 ± 1.42 a	62.64 ± 2.38 gh
	5~10	4.35 ± 0.18 a	57.47 ± 3.68 de	24.13 ± 0.86 d	32.90 ± 2.16 h	16.37 ± 0.79 a	48.77 ± 1.09 i
	10~20	3.63 ± 0.32 b	44.31 ± 8.49 f	24.07 ± 4.48 d	30.58 ± 3.04 i	14.09 ± 1.21 a	59.31 ± 6.45 h
灌木林	0~5	3.38 ± 0.21 bc	87.56 ± 6.21 a	45.65 ± 1.20 a	102.88 ± 2.83 c	17.73 ± 0.78 a	157.79 ± 5.61 b
	5~10	3.41 ± 0.16 bc	62.29 ± 4.76 cd	34.13 ± 6.64 bc	48.16 ± 3.64 g	16.30 ± 1.06 a	78.69 ± 2.86 fg
	10~20	3.61 ± 0.24 b	50.74 ± 2.89 e	34.36 ± 1.58 b	70.44 ± 4.36 ef	16.09 ± 0.79 a	87.73 ± 5.68 f
荒地	0~5	4.44 ± 0.56 a	62.52 ± 2.62 cd	32.17 ± 3.32 bc	135.07 ± 2.84 a	16.80 ± 1.28 a	142.99 ± 6.84 c
	5~10	2.98 ± 0.18 c	75.33 ± 8.24 b	31.46 ± 3.95 bc	120.89 ± 9.03 b	18.01 ± 1.25 a	90.33 ± 3.65e f
	10~20	2.67 ± 0.43 c	60.91 ± 5.03 d	31.61 ± 4.28 bc	73.97 ± 4.68 e	16.17 ± 2.36 a	98.68 ± 6.79 e
次生马尾松林	0~5	4.41 ± 0.29 a	56.24 ± 8.43 de	42.15 ± 2.38 a	121.54 ± 1.57 b	19.28 ± 1.41 a	207.39 ± 3.68 a
	5~10	3.32 ± 0.36 bc	85.97 ± 7.23 a	44.96 ± 2.74 a	99.86 ± 9.68 c	17.36 ± 1.87 a	91.51 ± 5.08e f
	10~20	2.68 ± 0.08 c	67.15 ± 3.68 c	32.21 ± 4.68 bc	58.94 ± 2.58 f	16.38 ± 0.98 a	129.64 ± 12.36 d
人工恢复林	0~5	2.88 ± 0.19 c	51.73 ± 1.14 e	30.17 ± 1.84 c	89.12 ± 4.19 d	18.80 ± 0.98 a	121.18 ± 9.64 d
	5~10	2.60 ± 0.06 c	61.46 ± 2.49 cd	28.95 ± 3.93 c	89.46 ± 12.35 d	15.31 ± 0.88 a	93.21 ± 2.67 ef
	10~20	2.73 ± 0.25 c	49.27 ± 3.08 ef	30.32 ± 2.67 bc	64.81 ± 5.03 f	18.92 ± 1.41 a	70.07 ± 4.39 g

Ca-P 主要是指与钙结合态的磷,主要来源于碎屑岩或本地自生^[18]。Ca-P 含量总体较低,0~5 cm 与 10~20 cm 土层分别以次生马尾松林(19.28 mg/kg)和人工恢复林最高(18.92 mg/kg),尾矿裸地则均显示了最低的 Ca-P 含量,分别为 14.80 mg/kg 与 14.09 mg/kg;5~10 cm 土层 Ca-P 含量以草地为最高,平均含量为 18.01 mg/kg,其次为次生马尾松林(17.36 mg/kg)、尾矿裸地(16.37 mg/kg)和灌木林(16.30 mg/kg),而以人工恢复林最低,仅为 15.31 mg/kg;土层间 Ca-P 含量分异趋势与 Ex-P 一致,依次为 0~5 cm(17.48 mg/kg)>5~10 cm(16.67 mg/kg)>10~20 cm(16.33 mg/kg),但层间 Ca-P 平均含量差异较小。Res-P 主要包含有机磷以及一些难溶性磷,是土壤中最稳定的磷,但也可以被植物利用^[19]。5 种样地 Res-P 所占比例较高,Res-P 含量与 Ca-P 含量分异趋势相似,0~5 cm 与 10~20 cm 都以次生马尾松林最高,分别为 207.39 mg/kg 与 129.64 mg/kg,尾矿裸地(62.64 mg/kg、59.31 mg/kg)为最低,5~10 cm 土层 Res-P 含量则以人工恢复林最高,平均含量为 93.21 mg/kg,尾矿裸地最低(48.77 mg/kg)。土层间 Res-P 含量分异趋势与 Fe-P、Al-P、O-P 和 Ca-P 不同,0~5 cm(138.40 mg/kg)>10~20 cm(89.09 mg/kg)>5~10 cm(80.50 mg/kg)。

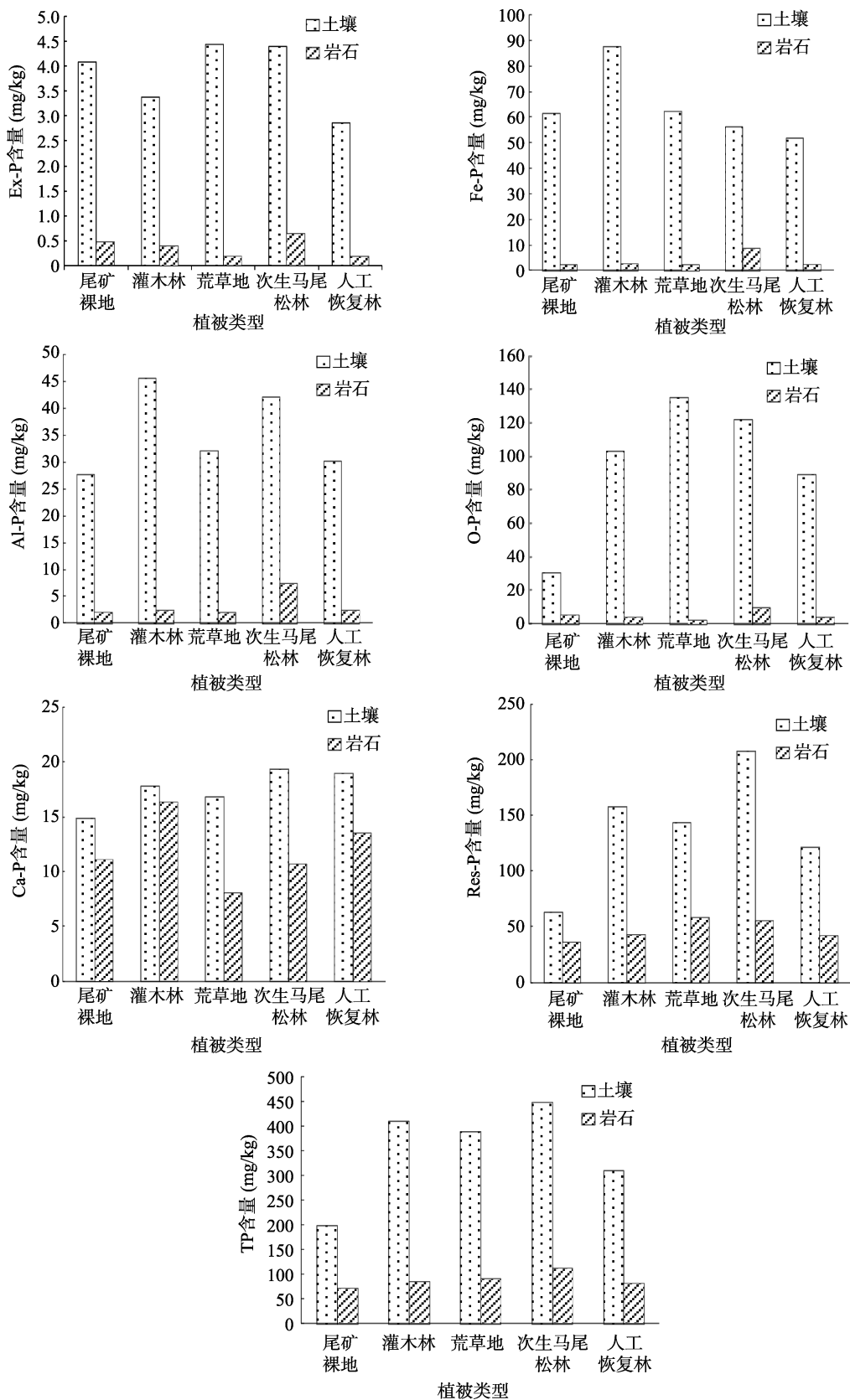
结果表明,灌木林与次生马尾松林土壤活性态磷(Fe-P 与 Al-P)含量显著高于其他样地,而惰性态磷(O-P、Ca-P 与 Res-P)则以地上群落结构较稳定的草地和次生马尾松林最高,其中 5~10 cm 土层 Res-P 含量则以人工恢复林最高;3 个土层尾矿裸地各形态

磷含量均为最低,但其 Fe-P、Al-P 含量在总磷中所占比例高于其他样地,所以流失危害大;3 个土层间土壤 Ex-P、Al-P、O-P、Ca-P 与 TP 含量均随土层的加深而降低,但土层间 Fe-P 与 Res-P 含量规律性不明显。

2.3 巢湖低丘山区不同植被类型对表层土壤(0~5 cm)磷形态的影响

图 1 表明,不同植被类型下,相比较岩石,土壤 TP 以及各形态磷含量都明显增加,其中以 O-P 与 Fe-P 增加最明显,分别平均增加 21.38 倍和 33.78 倍,Ca-P 增加最少,平均增加 0.55 倍;土壤总磷含量以灌木林增加最明显,尾矿裸地增加最少;无机磷含量的增加以灌木林最高,次生马尾松林最低,其中灌木林土壤的 Fe-P、O-P 与 Al-P 含量增加最高,分别平均增加 29.40、58.47 和 17.48 倍,次生马尾松林则最小,仅为 5.38、11.26 和 4.68 倍,土壤 Ca-P 与 Ex-P 的增加以草地为最高,尾矿裸地与次生马尾松林均为最低;土壤有机磷增加量以次生马尾松林为最高,平均增加 2.83 倍,尾矿裸地最低,增加量仅为 0.60 倍。

可以看出,灌木林处于草地向林地演替的过渡阶段,环境变化较为剧烈,植被对岩石养分的释放影响较大,所以磷素的增加量较稳定的草地与次生马尾松林大,但次生马尾松林土壤磷素含量高于灌木林,显示了明显的土壤养分随植被演替过程的积累效应;人工马尾松林由于缺乏自然演替过程,土壤磷的增加量以及总磷含量均较低。



(注：岩层磷形态含量数据引用于沈燕华^[20])

图 1 土壤-岩石磷形态含量特征

Fig. 1 Characteristic contents of phosphorus forms in soil-rock

2.4 巢湖低丘山区不同植被类型土壤养分与各形态磷相关性分析

土壤中各形态磷之间的转化对磷的有效性有重要作用，其相关性如表 4。可以看出 Res-P 与其他磷形态(Ex-P 除外)间具有显著的正相关关系；“活化

磷”，即 Ex-P、Fe-P、Al-P 三者间存在显著正相关关系(相关系数分别为 0.78、0.59 和 0.677)；O-P 与 Ca-P 之间呈显著负相关关系，但与“活化磷”间相关性不明显。说明 Res-P 中有机磷的分解释放对无机磷各形态的含量有重要影响，且活化磷之间有相互促进关系。

表 4 巢湖低丘山区不同植被类型土壤养分与磷形态相关关系
Table 4 Correlations between soil nutrients and phosphorus forms of typical vegetations in Chaohu hill region

	Ex-P	Fe-P	Al-P	O-P	Ca-P	Res-P
Ex-P	1					
Fe-P	0.78*	1				
Al-P	0.59*	0.677**	1			
O-P	0.01	0.447	0.597*	1		
Ca-P	0.081	0.188	0.514	-0.629*	1	
Res-P	0.16	0.264	0.659**	0.721**	0.566*	1
pH	-0.442	0.247	0.487	0.666*	0.568*	0.508
有机质	-0.25	0.496	0.846**	0.807**	0.632*	0.832**
全氮	-0.21	0.488	-0.386	0.658*	0.078	0.775**
全磷	0.116	0.542*	0.763*	0.891**	0.664**	0.877**
速效氮	0.071	0.523*	-0.367	0.126	0.361	0.361
速效磷	0.488*	0.28	0.668**	-0.531*	0.594*	-0.768**

注：*表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平，**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

土壤养分状况对土壤磷的存在形态以及磷形态间的转化具有重要影响。表 4 中土壤酸度与 O-P、Ca-P 间呈正相关关系；土壤养分与磷的各种形态间显示了显著的相关关系：氮素与 O-P、Res-P 和 Fe-P 间呈正相关关系，有机质和全磷与磷的各种形态呈正相关关系，速效磷与 O-P、Res-P 呈显著负相关关系；Ex-P 仅与速效磷相关性明显。

3 讨论

研究磷在土壤中的形态和转化过程，有助于提高磷在植被恢复中的作用，并减小环境危害(水体富营养化)等理论的建立^[21]。本研究中，5 种样地表层(0 ~ 5 cm)土壤磷含量较岩层增加明显，其中尾矿裸地土壤磷含量的增加不仅最小，而且其各形态磷的含量均为最低，说明植被对岩石的矿化是该地区土壤磷素的主要来源；其中以 O-P 与 Fe-P 增加最明显，Ca-P 增加最少，无机磷增加倍数以灌木林最高，次生马尾松林增加倍数最低，有机磷增加倍数则以次生马尾松林为最高；灌木林与次生马尾松林土壤活性态磷(Fe-P 与 Al-P)含量显著高于其他样地，而惰性态磷(O-P、Ca-P 与 Res-P)则以群落结构较稳定的草地和次生马尾松林最高，3 个土层尾矿裸地各形态磷含量均显示较低水平，但其 Fe-P、Al-P 含量在总磷中所占比例高于其他样地。由于该地区土壤偏酸性，且灌

木林处于草地向林地演替的过渡阶段，环境变化较为剧烈，群落结构较为复杂^[22]，植被所需有效养分更多，所以对岩石的矿化作用更强烈，因此灌木林不仅无机磷的 O-P 与 Fe-P 含量增加倍数最大且其土壤活性态磷(Fe-P 与 Al-P)含量也显著较高，而惰性的 Ca-P 增加最少；但次生马尾松林与草地处于次生演替的稳定阶段，群落结构稳定，所以次生马尾松林表现出土壤养分随植被演替的积累效应，因此次生马尾松林有机磷含量增加倍数最高，同时草地由于土壤-植被的互动效应，通过对土壤质量的改良增加土壤养分^[23]，因此群落结构较稳定的草地和次生马尾松林土壤都以惰性态磷(O-P、Ca-P 与 Res-P)含量最高；尾矿裸地则可能由于该地区降雨强烈，养分流失多，导致土壤养分含量较低，同时由于强烈的冲刷作用，造成 pH 值降低，更加速了土壤磷的矿化^[24]，在与高含量的土壤铁、铝胶体作用下，土壤磷素主要转化为 Fe-P、Al-P 和 O-P，所以尾矿裸地这 3 种形态的磷所占比例较高。

土壤磷素各种形态间的相互影响与相互转化在土壤磷的有效性上有很重要的作用。本研究中土壤 Res-P 与其他磷形态间具有显著的正相关关系，“活化磷”，即 Ex-P、Fe-P、Al-P 三者间也存在显著正相关关系，O-P 与 Ca-P 之间呈显著负相关关系，但与“活化磷”间相关性不明显。一般认为，土壤中有机

磷是土壤有效磷的重要来源^[19]。土壤 Res-P 中的磷主要为有机磷,在微生物的作用下,有机磷矿化分解释放出的无机磷,一部分转化为“活化磷”,即 Ex-P、Fe-P、Al-P,另一部分被土壤中含量丰富的铁、铝胶膜所包蔽成为较难被生物利用的 O-P,还有一部分与土壤中的钙离子结合转化为 Ca-P;土壤中 Ex-P 含量极低,但 Fe-P、Al-P 由于活性较高,可在一定条件下释放出活性磷酸盐;土壤 O-P 与 Ca-P 是土壤中较惰性的磷组分,很难被溶解,但受酸碱度影响较大^[25]。土壤发育程度越高,酸度 pH 值越小, O-P 含量越大,相反则土壤 Ca-P 越高。土壤养分含量对土壤磷形态间转化也很重要。本研究中土壤酸度与 O-P、Ca-P 间呈正相关关系,这与李孝良等^[26]研究结果一致。土壤氮素与 O-P、Res-P 和 Fe-P 间呈正相关关系,土壤有机质与总磷以及各形态磷均呈良好正相关关系,Ex-P 与土壤要素的相关性不明显。土壤总磷主要是通过有机磷的矿化影响其他磷形态含量,并与有机质、氮素共同通过影响土壤物理性质、土壤微生物活动以及土壤微生物量来间接影响土壤磷形态含量^[27-28]。由于 Ex-P 极易被利用或损失,所以土壤养分对 Ex-P 含量影响不明显;土壤 O-P、Ca-P 与有机磷是土壤中惰性的磷组分,所以土壤中活性态的速效磷与 O-P、Res-P 呈显著负相关关系。

4 结论

(1) 5 种典型植被覆盖类型土壤养分显示了较大的差异,次生马尾松林土壤养分含量最高,其次为灌木林、草地、人工马尾松林,尾矿裸地土壤养分含量最低,但酸度最大,表明植被覆盖可明显减少土壤养分流失。

(2) 5 种样地 0~20 cm 3 个土层 Ex-P 和 Ca-P 含量均较低,灌木林与次生马尾松林土壤活性态磷(Fe-P 与 Al-P)含量显著高于其他样地,而惰性态磷(O-P、Ca-P 与 Res-P)则以群落结构较稳定的草地和次生马尾松林最高,其中 5~10 cm 土层 Res-P 含量则以人工恢复林最高;3 个土层尾矿裸地各形态磷含量均显示较低水平,但其 Fe-P、Al-P 含量在总磷中所占比例高于其他样地,所以流失危害大;3 个土层间土壤 Ex-P、Al-P、O-P、Ca-P 与 TP 含量均随土层的加深而降低,但土层间 Fe-P 与 Res-P 含量的变化规律性不明显。

(3) 土壤表层总磷以及无机磷含量的增加都以灌木林最高,表明灌木林处于草地向林地演替的过渡阶段,植被对岩石养分的释放影响较大;次生马尾松林

土壤磷素含量高于灌木林,说明土壤养分随植被的演替有积累效应;人工马尾松林由于缺乏自然演替过程,土壤总磷及各形态磷的增加量以及土壤磷含量均较低。

(4) 土壤 Res-P 与其他磷形态间具有显著的正相关关系,“活化磷”,即 Ex-P、Fe-P、Al-P 三者间也存在显著正相关关系, O-P 与 Ca-P 之间呈显著负相关关系,但与“活化磷”间相关性不明显,表明 Res-P 中有机磷的分解释放对无机磷各形态的含量有重要影响,活性磷之间有相互促进关系;土壤酸度与 O-P、Ca-P 间呈正相关关系,土壤氮素与 O-P、Res-P 和 Fe-P 间呈正相关关系,土壤有机质与总磷以及各形态磷均呈良好正相关关系,速效磷与 O-P、Res-P 呈显著负相关关系,Ex-P 与土壤要素的相关性不明显。

参考文献:

- [1] Mooney HA, Vitousek PV, Matson PA. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere[J]. Science, 1987, 238(4829): 926-932
- [2] 来璐,郝明德,彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 65-67
- [3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-8
- [4] Cross AF, Schlesinger WH. A Literature-review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. Geoderma, 1995, 64: 197-214
- [5] Cleveland CC, Townsend AR, Schmidt SK. Phosphorus limitation on microbial process in moist tropical forests: Evidence from short-term laboratory incubations and field studies[J]. Ecosystems, 2002, 5: 680-691
- [6] 杨玉盛,陈光水,谢锦升,何宗明,陈银秀,黄荣珍. 杉木-观光木混交林群落 N、P 养分循环的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 437-480
- [7] 赵琼,曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153-163
- [8] 胡宏祥,洪天球,樊丽莉. 巢湖马鞍山土壤有机质和 N、P 变化研究[J]. 中国水土保持, 2006(11): 26-28
- [9] 管佳佳,洪天球,贾志海,李如忠. 巢湖炯杨河水质评价及主成分分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2008, 16(3): 89-93
- [10] 王绪伟,王心源,封毅,薛纪萍. 巢湖沉积物总磷含量及无机磷形态研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 56-59
- [11] 李如忠,洪天球. 巢湖流域农业非点源污染控制对策研究[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 2006, 20(11): 105-110
- [12] 屠清瑛,顾丁锡,徐卓然. 巢湖富营养化研究[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1991
- [13] Yin CQ, Lan ZL. The nutrient retention by ecotone wetlands and their modification for Bai Yarn Dianlake restoration[J]. Water Science and Technology, 1995, 32: 159-167

- [14] 王晓龙, 胡锋, 李辉信, 刘满强, 秦江涛, 张斌. 侵蚀退化红壤自然恢复下土壤生物学质量演变特征[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1 404-1 411
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [16] Zhang SC, Jackson ML. Frictionation of soil phosphorus[J]. Soil Sci., 1957, 84: 133-144
- [17] 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
- [18] 陈红军, 黄怀曾, 冯流, 陈明. 永定河沉积物中磷的存在形态及其指示意义[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 176-180
- [19] 赵少华, 宇万太, 张璐, 沈善敏, 马强. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2 189-2 194
- [20] 沈燕华. 巢湖流域北岸东部岩源磷赋存形态及释放规律的研究(硕士学位论文)[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010
- [21] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 韩新宁. 23 年肥料定位试验 0 ~ 100 cm 土壤剖面中各形态磷之间的关系研究[J]. 水土保持学报, 2003(17): 48-50
- [22] 王晓龙, 常龙飞, 李恒鹏, 张奇. 巢湖低丘山区典型植被群落与土壤环境因子特征研究[J]. 土壤, 2011, 43(6): 981-986
- [23] 宋娟丽, 吴发后, 姚军, 余雕, 包耀贤. 弃耕地植被恢复过程中土壤理化性质演变趋势研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 168-173
- [24] 张素霞, 吕家珑, 杨瑜琪, 符孟虎. 黄土高原不同植被坡地土壤无机磷形态分布研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 29-32
- [25] 丁怀香, 宇万太. 土壤无机磷分级及生物有效性研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 682-686
- [26] 李孝良, 于群英, 陈世勇, 沈先云. 安徽省土壤磷素形态及其影响因素研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 2001, 15(1): 12-15
- [27] 苏永春, 勾影波. 我国东北寒冷地区农田土壤磷代谢的生态特征研究[J]. 土壤肥料, 2005(1): 32-34
- [28] Rekolainen S, Salt CA, Barlund I, Tattari S, Culligan-Dunsmore M. Impacts of the management of radioactively contaminated land on soil and phosphorus losses in Finland and Scotland[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2002, 139: 115-136

Distribution Characteristics of Soil P as Influenced by Different Vegetation Type in Chao Lake Mountain Areas

CHANG Long-fei^{1,2}, WANG Xiao-long^{1*}, NIE Xiao-fei¹, LI Heng-peng¹, HU Feng³

(1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 The Qingzhen Branch of Guiyang Tobacco Monopoly Administration (Corporation), Guiyang 551400, China; 3 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Top soil P concentrations and P forms under five typical vegetation types were analyzed in the low mountainous area of Chao Lake. The results indicated that soil of the secondary Masson pine forest had higher contents of soil organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, total P and available P. In contrary, mine tails bare land had both lower soil nutrient levels and soil pH values. Among all the five sample lands investigated, the top 20 cm soil was detected extremely low in both Ex-P and Ca-P. Specifically, soil plant available P (Fe-P and Al-P) of the shrub land and secondary Masson pine forest land was significantly higher than other lands while concentration of soil inertial P (O-P, Ca-P and Res-P) was found higher in grassland and secondary Masson forest land, where the place was featured by a stable community structure. A higher Res-P was detected in 5-10 cm soil for the artificial forestlands, while all the three P forms were lower among all soil layers for the mine tails bare lands. However, the ratio of Fe-P and Al-P in total P concentration was the highest in mine tail bare land which indicated the serious erosion occurred. Overall, contents of Ex-P, Al-P, O-P, Ca-P and TP decreased with soil depth increased but no obvious pattern among soil layers. Additionally, a significantly positive correlation occurred between soil Res-P and other soil P forms. Moreover, positive correlation was also detected among soil mineralized P forms, namely, Ex-P, Fe-P and Al-P as well as soil nutrient conditions and soil P forms while negative correlation was observed between available P and O-P as well as Res-P.

Key words: Chao Lake, Soil nutrient, Soil phosphorus forms, Rock phosphorus forms