

不同复垦方式下土壤无机磷的空间分布特征

闵祥宇¹, 李新举¹, 刘 宁^{1,2}, 许 燕³

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;

2. 潍坊工程职业学院建筑工程系, 山东 潍坊 262500; 3. 济宁市国土资源局采煤塌陷地治理中心, 山东 济宁 272000)

摘要:以济宁地区引黄充填复垦、引湖充填复垦和预复垦 3 种复垦方式样地土壤为研究对象,通过分层采样和室内分析,研究不同复垦方式下土壤无机磷($\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)的空间分布情况,并找出影响复垦土壤速效磷偏低的原因。结果表明:(1)3 种复垦方式下的复垦土壤全磷含量在 0.42~0.77 g/kg 之间,土壤速效磷含量在 0.65~5.22 mg/kg 之间,复垦土壤全磷含量丰富而速效磷含量偏低;(2)复垦土壤中各无机磷形态以难被植物利用的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 含量最高,易被植物利用的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最少,不同复垦方式下的土壤各无机磷形态含量略有差别,与一般土壤相比,复垦土壤中第二磷源 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量占到 3%,比重相对降低,难利用磷源 O-P 含量占到 32%,比重大幅升高;(3)复垦土壤无机磷总量和各形态无机磷含量在表层积累,随土层加深,其含量和有效性呈逐渐降低的趋势,其中引黄充填复垦和引湖充填复垦无机磷含量和有效性优于预复垦;(4)复垦土壤中速效磷含量与土壤压实度呈显著性负相关,相关系数 $r=-0.554^*$ ($p<0.05$),与难溶性 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈极显著性正相关,相关系数 $r=0.650^{**}$ ($p<0.01$)。复垦土壤压实度偏高和有效磷源含量缺乏造成复垦土壤全磷含量丰富而速效磷偏低,比较而言,预复垦方式受到更多的机械碾压而磷素状况更差。

关键词: 复垦土壤; 复垦方式; 土壤压实; 理化性质; 无机磷形态

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0220-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.037

Spatial Distribution Characteristics of Soil Inorganic Phosphorus Under Different Reclamation Modes

MIN Xiangyu¹, LI Xinju¹, LIU Ning^{1,2}, XU Yan³

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018;

2. Department of Architectural Engineering, Weifang Engineering Vocational College, Weifang, Shandong 262500;

3. The Treatment Center of Mining Subsidence, Jining Municipal Bureau of Land and Resources, Jining, Shandong 272000)

Abstract: Taking the soil under three different reclamation modes, i. e. reclamation filled by Yellow River sediments, reclamation filled by lake sediments, and beforehand reclamation, in the Jining region as the research objects, studying spatial distribution characteristics of various forms of inorganic phosphorus ($\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , Fe-P , O-P , $\text{Ca}_{10}\text{-P}$) in soil under different reclamation modes, and discussing reasons for low phosphorus availability in reclaimed soil. The result shows that: (1) Total phosphorus content in reclaimed soil under different reclamation modes was between 0.42 and 0.77 g/kg, and available phosphorus content was between 0.65 and 5.22 mg/kg, total phosphorus content was higher in reclaimed soil, but plant-available phosphorus content was lower. (2) In reclaimed soil, contents of sparsely plant-available inorganic phosphorus ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and O-P) were the highest, while the contents of $\text{Ca}_8\text{-P}$ and $\text{Ca}_2\text{-P}$, which are plant-available, were the lowest. For the contents of various forms of inorganic phosphorus, there were slight differences among different reclamation modes. Compared with normal soils, the proportion of $\text{Ca}_8\text{-P}$ in reclaimed soils decreased, accounting for about 3% of total phosphorus, but the proportion of sparsely plant-available O-P increased, accounting for about 32% of total phosphorus. (3) Total inorganic phosphorus and various forms of inorganic phosphorus accumulated in surface soil, while contents and availability decreased besides increasing soil depth, besides the content and availability in soil under the modes of reclamation

收稿日期: 2016-07-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(41171425)

第一作者: 闵祥宇(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事土地复垦和土壤水肥研究。E-mail: 1991mxy@sina.com

通信作者: 李新举(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土地整理和土地复垦研究。E-mail: xinjuli@sdaa.edu.cn

filled by Yellow River sediments and reclamation filled by lake sediments were higher than those in soil under the mode of beforehand reclamation. (4) There was a significant negative correlation between plant-available phosphorus and soil compactness, $r = -0.554^*$ ($p < 0.05$), and there was an extremely significant positive correlation between plant-available phosphorus and $\text{Ca}_{10} - \text{P}$, $r = 0.650^{**}$ ($p < 0.01$). In reclaimed soil, a greater compactness and a lack of effective source of phosphorus could account for the lower phosphorus availability. In comparison, phosphorus conditions in soil under the mode of beforehand reclamation were worse because this mode got greater mechanical compaction.

Keywords: reclaimed soil; reclamation modes; soil compactness; physicochemical property; inorganic phosphorus forms

煤炭开采为我国经济增长做出巨大贡献,同时也造成大量的耕地损毁,尤其在东部矿区,因多为井工开采,且潜水位较高,所以采煤损毁土地塌陷面积较大,积水较为严重^[1-2]。这给东部矿区采煤塌陷地的复垦工作带来极大困难,而且复垦耕地普遍存在不利耕种和土壤质量偏低的特点^[3]。因此,对复垦土壤质量的研究引起相关专家学者的关注。

目前,对复垦土壤质量的研究仍处在对土壤基本理化性质、重金属污染等方面的研究。王平等^[4]发现塌陷使复垦土壤田间持水量显著降低,但容重的增加不明显;梁利宝等^[5]发现培肥可显著增加复垦土壤养分、有机质等含量,其中以化肥+有机肥的使用效果最好;焦晓燕等^[6]发现剥离复垦表土养分含量高于混推复垦,但孔隙度和毛管持水量均低于后者;Tsolova等^[7]认为复垦土壤偏酸的环境($\text{pH} < 6$)会增加铅、铜、锌的生物利用率,有引发联合毒性的潜在威胁;Chaly等^[8]通过对粗砂质土壤分层或覆盖细砂的方式增加复垦土壤的持水能力;Pinno等^[9]发现在林地油砂开采复垦土地上,矿质混合土壤草种发芽率最高,且N、P、K共施草种生长状况最好。

但国内外专家学者对复垦土壤质量的研究并没有深入到养分形态层面,尤其对复垦土壤磷素的存在形态及其分布缺乏了解。磷在土壤中的存在形态决定磷在环境中的迁移、转化和沉积^[10-12],因此本研究利用蒋柏藩等^[13]和顾益初等^[14]提出的磷形态测定方法,对济宁地区典型复垦区土壤磷形态进行分析测定,以得到不同复垦方式下土壤无机磷空间分布特征,深入探讨复垦土壤速效磷含量偏低的原因,从而使复垦土壤的质量评价方法更加科学严谨。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省济宁市境内,地理坐标为北纬 $34^{\circ}26' - 35^{\circ}57'$,东经 $115^{\circ}52' - 117^{\circ}36'$,全区属暖温带半湿润季风气候区,是我国东部地区典型的高潜水位煤粮复合区,因常年煤炭开采造成了大面积采煤塌陷和耕地积水。具体研究点位于梁山县大路口乡引

黄充填地块、微山县赵庙乡引湖充填地块和任城区南阳湖农场预复垦地块。引黄充填地块即利用靠近黄河的优势,以黄河泥沙为填充材料,表土剥离后用管道运输至塌陷地块进行充填,并在泥沙上部覆盖表土,地理坐标为北纬 $34^{\circ}56'$,东经 $116^{\circ}01'$,复垦高程37 m,复垦后利用方式为耕地;引湖充填地块即利用靠近微山湖的优势,表土剥离后以湖底的淤泥为填充材料,充填完成后将湖泥沉淀出的水与原有积水一起排除,并覆盖表土,地理坐标为北纬 $34^{\circ}47'$,东经 $116^{\circ}58'$,复垦高程21 m,复垦后利用方式为耕地;南阳湖农场预复垦地块即采用“条带式”复垦工艺进行表土剥离,边开采边复垦,复垦过程机械碾压更为频繁,但能更多的恢复耕地,地理坐标为北纬 $35^{\circ}20'$,东经 $116^{\circ}37'$,复垦高程27 m,复垦后利用方式为耕地。

1.2 样品采集与处理

于2015年5月在济宁市试验区内以3种复垦方式的地块(梁山县大路口乡引黄充填地块、微山县赵庙乡引湖充填地块、任城区南阳湖农场预复垦地块)作为研究对象。采用典型样地取样法,挖掘土壤剖面分4层进行取样,分别为0—5,5—15,15—30,30—60 cm,并以各研究点周边原始地貌0—20 cm耕层为对照,取样前现场使用40II型土壤紧实度仪和PC-2R多通道土壤热性质记录仪分别观测土壤压实度和土壤热导率。取样完成后,采用五点混合,混匀后立即装入自封袋中,带回实验室,挑出碎石根叶,待自然风干后进行碾磨并分别过10目和100目筛待用,并于2015年10月在实验室内完成土样理化性质的测定。

1.3 研究方法

土壤压实度和土壤热导率使用SL-TYB型硬度计和PC-2R多通道土壤热性质记录仪现场观测记录;土壤全磷含量采用 $\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法测定;速效磷含量用0.5 mol/L的 NaHCO_3 浸提,钼锑抗比色法测定^[15]。

为将土壤Ca-P进行细分,土壤无机磷的分级测定使用6级测定法^[13-14]:土壤无机磷形态分6级,分别为 $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 、 $\text{Al} - \text{P}$ 、 $\text{Fe} - \text{P}$ 、 $\text{O} - \text{P}$ 和 $\text{Ca}_{10} - \text{P}$ 。

具体方法为:使用 0.25 mol/L 的 NaHCO_3 浸提 $\text{Ca}_2\text{-P}$;0.5 mol/L 的 NH_4OAc 浸提 $\text{Ca}_8\text{-P}$;0.5 mol/L 的 NH_4F 浸提 Al-P ;0.1 mol/L 的 NaOH +0.1 mol/L 的 Na_2CO_3 浸提 Fe-P ;0.3 mol/L 柠檬酸钠+连二亚硫酸钠+0.5 mol/L 的 NaOH 浸提 O-P ;0.5 mol/L 的 $1/2\text{H}_2\text{SO}_4$ 浸提 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。

每个指标均重复测量 3 次,取其平均值,试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 进行数理统计和分析。其中,3 种复垦方式土壤基本状况见表 1。引黄充填、引湖充填和预复垦(以下简称为 M1、M2 和 M3)土壤压实度分别为 1 064,1 067,1 655 kPa,均大于原始地貌的土壤压实度;全磷分别为 0.61,0.65,0.57 g/kg,略小于原始地貌土壤全磷含量;速效磷分别为 3.22,2.75,0.93 mg/kg,远小于原始地貌土壤速效磷含量;热导率分别为 1.087,1.428,1.525 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$,因复垦方式的不同而与原始地貌土壤热导率大小存在差别。

表 1 3 种复垦方式下土壤背景值

编号	复垦方式	压实度/ kPa	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
M1	引黄充填	1064	1.087	0.61	3.22
CK1		921	1.072	0.7	20.43
M2	引湖充填	1067	1.428	0.65	2.75
CK1		859	1.539	0.79	25.02
M3	预复垦	1655	1.525	0.47	0.93
CK1		982	1.431	0.57	21.74

2 结果与分析

2.1 复垦区土壤基本理化性质分析

2.1.1 不同复垦方式土壤理化性质分析 3 种复垦

表 2 3 种复垦方式不同土层深度下的土壤理化性质

编号	复垦方式	土层深度/ cm	压实度/ kPa	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
M1	引黄充填	0—5	843e	0.941c	0.64bc	5.22a
		5—15	930d	0.814c	0.62bc	4.54b
		15—30	1943a	1.282b	0.72ab	1.67e
		30—60	543f	1.309b	0.47cd	0.99f
M2	引湖充填	0—5	1216ce	1.595ab	0.68b	3.24c
		5—15	1343c	0.913c	0.77a	2.04de
		15—30	796e	1.516ab	0.63bc	3.16e
		30—60	915e	1.726a	0.52cd	2.55d
M3	预复垦	0—5	1453ce	1.389b	0.57c	1.04ef
		5—15	1448ce	1.691ab	0.49cd	1.17ef
		15—30	1700b	1.779a	0.45d	0.84f
		30—60	2021a	1.242bc	0.42d	0.65f

注:采用 LSD 检验,同一栏内不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.1.2 复垦土壤理化性质相关性分析 经相关性分析(表 3),复垦土壤速效磷含量与土壤压实度和全磷含量的相关性更为显著。土壤速效磷和土壤压实度呈显著性负相关,相关系数 $r=-0.554^*$ ($p<0.05$);土壤速效磷和土壤全磷呈显著性正相关,相关系数 r

方式土壤理化性质存在差异(表 2)。在压实度方面,M3 的 30—60 cm 土层和 M1 的 15—30 cm 土层压实度较高,分别为 2 021,1 943 kPa;M1 的 30—60 cm 土层压实度较小,为 543 kPa。这是因为预复垦方式下机械碾压更为频繁,深层土壤受到的压力更大^[16],而引黄充填复垦使用黄河泥沙进行充填会形成“上粘下沙”的土层结构,即充填物上部为粘土,下部多为砂砾,上面再覆盖 20 cm 左右的表土,从而在 15—30 cm 土层之间形成较为板实的黏土层,质地紧实,下部 30—60 cm 土层以砂土为主,较为松散^[17],引湖充填复垦与引黄充填复垦压实情况相似,深层因充填泥沙压实度较小。

土壤热导率是衡量土壤导热性能的物理指标,其大小会影响到土壤微生物活性,土壤水气运移以及土壤中盐分的溶解度和溶解速率^[18]。3 种复垦方式下土壤热导率(λ)在 0.913~1.779 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 之间,M1、M2 和 M3 土壤热导率(λ)的平均值分别为 1.087,1.428,1.525 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 。3 种复垦方式下不同土层间热导率没有明显规律性可循,这是因为土壤热导率受到温度、土壤质地和含水率等多种因素的影响^[19]。

3 种复垦方式下土壤全磷在 0.42~0.77 g/kg 之间,M1、M2 和 M3 土壤全磷平均值分别为 0.61,0.65,0.47 g/kg;土壤速效磷在 0.65~5.22 mg/kg 之间,M1、M2 和 M3 土壤速效磷平均值分别为 3.22,2.75,0.93 mg/kg。相比于原始地貌,3 种复垦方式下的复垦土壤全磷含量相对较高,但土壤速效磷含量极低,这种全磷含量相对丰富而速效磷含量严重不足的状况,是复垦土壤生产力低下的主要原因。

$=0.547^*$ ($p<0.05$),并且复垦土壤压实度和速效磷之间呈一定的线性关系(M1 30—60 cm 土层数据除外),回归方程的决定系数达到 0.648(图 1)。

2.2 复垦区土壤无机磷形态空间分布分析

水溶土壤磷素分为有机磷和无机磷,其中无机磷

主要包括水溶性磷、铁铝结合态磷、闭蓄态磷和一些铁的磷酸盐等,按照蒋柏藩和顾益初^[13-14]的无机磷分级方法,将土壤无机磷分为 Ca₂—P、Ca₈—P、Al—P、Fe—P、O—P 和 Ca₁₀—P。

表 3 复垦土壤基本理化性质间相关性分析

项目	压实度	热导率	全磷	速效磷
压实度	1			
热导率	0.149	1		
全磷	-0.110	-0.470	1	
速效磷	-0.554*	-0.475	0.547*	1

注: * 表示在 0.05 的水平上显著相关($p<0.05$)。

2.2.1 不同复垦方式下无机磷总量分析 根据不同

表 4 不同复垦方式下土壤无机磷形态

编号	复垦方式	土层深度/cm	无机磷总量/ (mg·kg ⁻¹)	无机磷/ 全磷/%	无机磷形态/(mg·kg ⁻¹)					
					Ca ₂ —P	Ca ₈ —P	Al—P	Fe—P	O—P	Ca ₁₀ —P
M1	引黄充填	0—5	491.73a	77	6.25a	16.50a	34.11c	27.47cd	143.98ab	263.42ab
		5—15	476.76a	77	4.90ab	20.06a	29.90cd	21.38d	127.73b	272.79a
		15—30	443.78b	62	3.85b	10.58b	23.54d	16.07de	121.23bc	268.51a
		30—60	372.30c	79	3.22bc	4.71c	11.82e	12.51e	105.78bc	234.26b
		平均	446.15	73	4.56	12.96	24.84	19.36	124.68	259.75
M2	引湖充填	0—5	487.51a	72	6.70a	17.57a	42.66bc	47.07b	126.63b	246.88ab
		5—15	421.95b	55	6.27a	19.01a	39.65bc	45.52b	105.59bc	205.91bc
		15—30	483.01a	77	5.65ab	18.85a	43.89b	44.32b	170.22a	200.08c
		30—60	467.50a	90	3.95b	18.86a	58.98a	84.82a	128.87b	172.02c
		平均	464.98	72	5.64	18.57	46.29	55.43	132.83	206.22
M3	预复垦	0—5	355.39a	62	3.79b	16.85a	43.43b	40.89b	119.99bc	130.44d
		5—15	333.84a	68	3.21bc	7.69bc	40.09bc	27.84c	143.59ab	111.42de
		15—30	291.43b	65	2.64bc	0.69cd	36.68bc	30.60c	120.47bc	100.35de
		30—60	228.33c	54	1.58c	0.00d	22.88d	28.81c	93.19c	81.87e
		平均	302.26	64	2.81	6.31	35.77	32.04	119.31	106.02

注:采用 LSD 检验,同一栏内不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

从表 4 可以看出,M1 和 M3 土壤无机磷总量随土层深度增加而逐渐降低,其中 M1 从 491.73 mg/kg 递减至 372.30 mg/kg,M3 从 355.39 mg/kg 递减至 228.33 mg/kg;M2 无机磷总量较高,表土、心土、底土含量相当,这是因为底层充填的湖泥养分含量丰富。M1、M2 和 M3 无机磷总量平均值分别为 446.15,464.98,302.26 mg/kg,分别占到全磷含量的 73%,72%和 64%,引黄充填复垦和引湖充填复垦无机磷总量水平要优于预复垦。

2.2.2 不同复垦方式下无机磷形态分析 3 种复垦方式下土壤无机磷形态分布趋势基本相同又略有差异(图 2)。复垦土壤中难被植物利用的 Ca₁₀—P 和 O—P 含量最高,远高于其他形态磷含量($p<0.05$);Fe—P 和 Al—P 次之;植物速效磷源 Ca₈—P 和 Ca₂—P 含量最少。其中 M1 各无机磷形态含量大小顺序为 Ca₁₀—P>O—P>Al—P>Fe—P>Ca₈—P>Ca₂—P;M2 各无机磷形态含量大小顺序为 Ca₁₀—P>O—P>Fe—P>Al—P>Ca₈—P>Ca₂—P;M3 各无机磷形态含量大小顺序为 O—P>Ca₁₀—P>Al—P>

复垦方式下土壤无机磷含量(表 4),复垦土壤无机磷总量在 228.33~491.73 mg/kg 之间,占全磷的比重在 54%~90%之间。

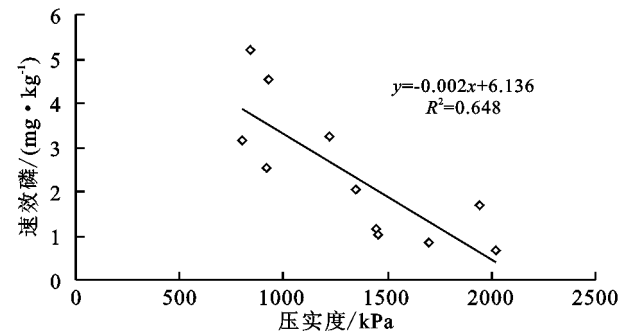


图 1 压实度与速效磷之间的线性关系

Fe—P>Ca₈—P>Ca₂—P。

2.2.3 不同土层深度下无机磷形态分析 3 种复垦方式不同土壤深度下无机磷形态分布情况见图 3。各形态无机磷均在 0—5 cm 土层中含量丰富,包括第一磷源 Ca₂—P、Al—P 和第二磷源 Ca₈—P、Fe—P 在内的有效性磷总量在 100 mg/kg 左右,其中引黄充填复垦为 84.33 mg/kg,引湖充填复垦为 114.00 mg/kg,预复垦为 104.96 mg/kg。引黄充填复垦和预复垦随土层加深,各形态无机磷含量逐渐递减,有效性也逐渐降低,在 15—30 cm 和 30—60 cm 土层显著降低($p<0.05$)(图 3a,图 3c);而引湖充填复垦不同土层间各形态无机磷含量相当(图 3b),15—30 cm 土层无机磷总量与表层基本相同,仅低了 0.92%,30—60 cm 土层有效性磷总量超过表层 31.58%,这也显示出湖泥在复垦地区培肥方面更为优良的特性。总体上看,复垦土壤各形态无机磷含量表现出表层积累,随土层加深,含量和有效性逐渐降低的趋势。这种复垦土壤无机磷的空间变化特征受到土壤压实、农业生产、雨水淋溶、地表径流等多重因素的影响。作

者认为复垦土壤无机磷总量丰富,有效性磷含量偏低,磷素表层积累、深层偏低的特点,与磷的移动性有很大关系,相关研究表明^[20],磷素在土壤溶液中的扩散速率很低,土壤表层施入的活性磷容易被土壤颗粒所吸附或通过化合作用被土壤固定为结合态磷,导致磷的移动性差,不宜被淋洗损失,而通过淋洗损失的磷素以有机磷和可溶性磷为主,这种特征使大量难溶性无机磷在复垦排水阶段保留在土壤中,而可溶性相对较高的有效性磷经排水损失,导致复垦土壤无机磷总量丰富,有效性磷含量偏低;农业生产中磷肥的浅施使磷素积累在土壤表层,机械碾压对土壤的压实影响使磷素难以向深层扩散,导致磷素表层积累,深层偏低,影响磷素的空间利用率。

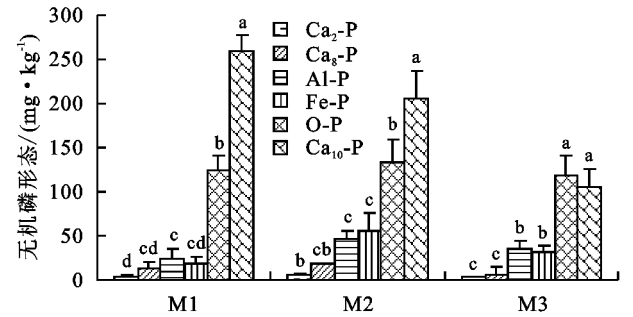


图 2 不同复垦方式下土壤各形态无机磷含量

2.2.4 复垦区土壤无机磷形态相关性分析 从土壤不同形态无机磷和土壤速效磷之间的相关性看出(表 5),土壤速效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈极显著性正相关,相关系数 r 分别为 0.661^{**}, 0.677^{**} 和 0.650^{**}

($p<0.01$);与 Al-P 、 Fe-P 和 O-P 相关性不显著。

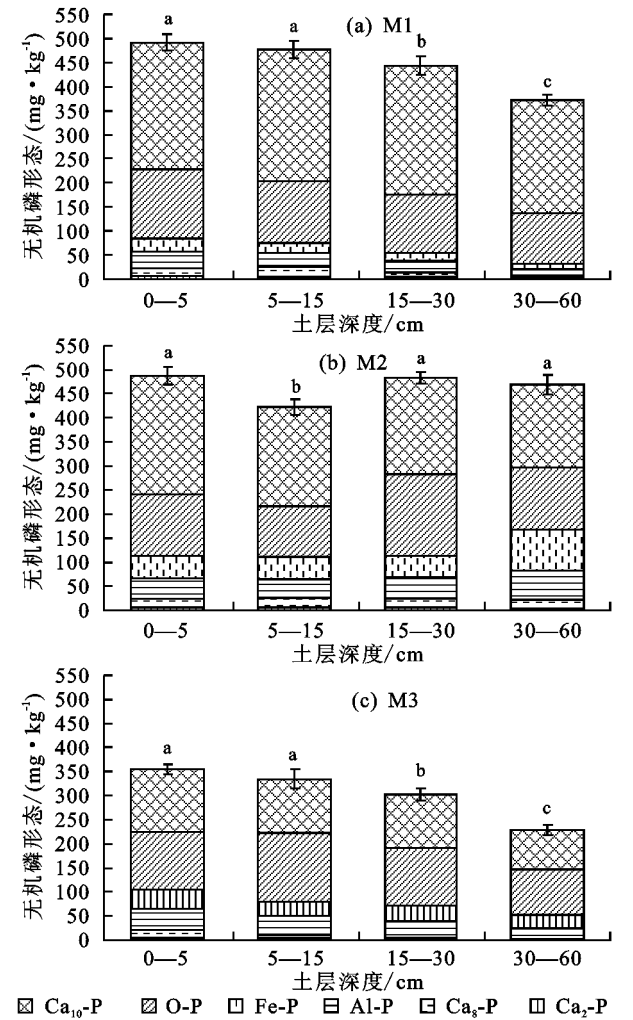


图 3 不同土层深度下土壤各形态无机磷含量

表 5 不同无机磷形态间相关性分析

项目	速效磷	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
速效磷	1						
$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.661 ^{**}	1					
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.677 ^{**}	0.863 ^{**}	1				
Al-P	0.198	0.416	0.582 [*]	1			
Fe-P	0.054	0.303	0.515 [*]	0.897 ^{**}	1		
O-P	0.484	0.451	0.496	0.47	0.213	1	
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	0.650 ^{**}	0.682 ^{**}	0.642 [*]	-0.148	-0.155	0.199	1

注: * 表示在 0.05 的水平上显著相关($p<0.05$); ** 表示在 0.01 的水平上极显著性相关($p<0.01$)。

另外, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之间和 Al-P 、 Fe-P 之间均存在显著性的相关关系,且 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与 Al-P 、 Fe-P 之间也存在显著性相关关系,由此说明复垦土壤中 Ca-P 和铁铝结合态磷的各种形态之间保持着一定的比例,一定条件下通过 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 可以相互转化,而 O-P 很难参与到整个无机磷形态的转化之中。

3 讨论

复垦土壤在施工过程中受到机械碾压的影响,土壤压实度的变化是产生其他环境因子发生变化的根本原因^[21-22]。3 种复垦方式下土壤压实度分别为 1 064, 1 067, 1 655 kPa,均大于原始地貌的土壤压实

度。而复垦土壤压实度与速效磷含量呈显著负相关,相关系数 $r=-0.554^*$ ($p<0.05$),且两者之间存在线性回归关系, $y=-0.002x+6.136$, $R^2=0.648$ 。因此复垦土壤过大的土壤压实度与土壤速效磷含量偏低关系密切,土壤压实破坏了土壤结构^[23],在一定程度上阻碍了无效态磷向有效态磷的转化过程,从而出现全磷含量较高,速效磷含量极低的现象。

土壤无机磷占到土壤全磷的 50%~90%,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 是易被植物利用的,具有高度的有效性; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 可被植物利用,具有较高的有效性; O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 难被植物利用,有效性低。另外有研究表明,无机磷中以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,占到无机

磷总量的 70% 左右;Ca₈-P 和 O-P 次之,占到了 10% 左右;Al-P 和 Fe-P 各占 4%~5%;Ca₂-P 含量最少,仅占到 1%^[24-25]。而针对复垦土壤,所测 Ca-P 中,Ca₁₀-P 占到无机磷总量的 45.88% 左右,达不到 70% 的水平;Ca₈-P 所占比例在 3.00% 左右,远低于 10% 的水平;Ca₂-P 所占比例为 1.05% 左右,与前人研究结论水平相当。所测铁铝结合态磷中,

表 6 不同复垦方式下土壤无机磷形态比重 %

编号	复垦方式	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
M1	引黄充填	1.02	2.90	5.57	4.34	27.95	58.22
M2	引湖充填	1.21	3.99	9.96	11.92	28.57	44.35
M3	预复垦	0.93	2.09	11.83	10.60	39.47	35.08
—	平均	1.05±0.001c	3.00±0.010c	9.12±0.032c	8.95±0.040c	32.00±0.065b	45.88±0.116a

注:采用 LSD 检验,同一栏内不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

Al-P 和 Fe-P 是土壤无机磷的有效性磷,其含量均占到无机磷总量的 9% 左右,但两者在复垦土壤中,与土壤速效磷相关性并不显著,相关系数分别为 0.198 和 0.054;而土壤速效磷与难以被植物直接利用的 Ca₁₀-P 呈极显著性正相关关系, $r=0.650^{**}$ ($p<0.01$)。因此,这种相关关系一定程度解释了速效磷偏低的原因,也说明复垦土壤中 Ca₁₀-P 是良好的潜在磷源^[10-12],这一点在指导复垦土壤培肥上具有实际意义。

4 结论

(1)复垦土壤全磷含量丰富,但速效磷含量偏低,土壤生产力低下,土壤全磷在 0.42~0.77 g/kg 之间,土壤速效磷在 0.65~5.22 mg/kg 之间。引黄充填和引湖充填土壤磷素含量相当,而预复垦土壤磷素含量相对较低。

(2)复垦土壤各形态无机磷含量呈现表层积累、深层偏低的特点,随土层加深,含量和有效性均有降低,而引湖充填因湖泥养分丰富,含量总体较高,显示出特殊性;复垦土壤中各形态无机磷含量顺序为 Ca₁₀-P 和 O-P 含量最高,Fe-P 和 Al-P 次之,Ca₈-P 和 Ca₂-P 含量最少,不同复垦方式之间具体顺序略有差异。

(3)复垦土壤速效磷偏低的原因有 3 个:一是复垦土壤压实度过大,且与速效磷呈显著性负相关;二是复垦土壤中各形态无机磷所占比重的特殊性,第二磷源 Ca₈-P 含量水平相对降低,难利用磷源 O-P 含量水平大幅升高;三是土壤速效磷与难溶性 Ca₁₀-P 存在极显著正相关关系,而与有效性磷源 Fe-P 和 Al-P 相关性不明显。

(4)在复垦过程中,应当从考虑减少机械碾压次数降低土壤压实度和后期施加有机肥改善磷形态分布的角度入手,提升土壤质量。

参考文献:

[1] 胡振琪,魏忠义.煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与

对策[J].能源环境保护,2003,17(3):3-7.

[2] 王巧妮,陈新生,张智光.我国采煤塌陷地复垦的现状、问题和原因分析[J].能源环境保护,2008,22(5):49-53.

[3] 李新举,胡振琪,李晶,等.采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J].农业工程学报,2007,23(3):277-280.

[4] 王平,王金满,秦倩,等.黄土区采煤塌陷对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):297-304.

[5] 梁利宝,洪坚平,谢英荷,等.不同培肥处理对采煤塌陷地复垦不同年限土壤熟化的影响[J].水土保持学报,2010,24(3):140-144.

[6] 焦晓燕,王立革,卢朝东,等.采煤塌陷地复垦方式对土壤理化特性影响研究[J].水土保持学报,2009,23(4):123-125.

[7] Tsoolova V T,Hristova M B,Borras J B,et al. Pb, Cu and Zn geochemistry in reclaimed soils (Technosols) of Bulgaria[J]. Journal of Geochemical Exploration,2014,144(9):337-344.

[8] Chaly A,Dmitriev V,Pavleino M,et al. Improving water storage of reclamation soil covers by fractionation of coarse-textured soil[J]. Canadian Journal of Soil Science,2014,94(4):489-501.

[9] Pinno B D,Landhäusser S M,Chow P S,et al. Nutrient uptake and growth of fireweed (*Chamerion angustifolium*) on reclamation soils[J]. Canadian Journal of Forest Research,2014,44(1):1-7.

[10] 罗先香,敦萌,闫琴.黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J].水土保持学报,2011,25(5):154-160.

[11] 杨慧,曹建华,孙蕾,等.岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J].水土保持学报,2010,24(2):135-140.

[12] 夏建国,仲雨猛,曹晓霞.干湿交替条件下土壤磷释放及其与土壤性质的关系[J].水土保持学报,2011,25(4):237-248.

[13] 蒋柏藩,顾益初.石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J].中国农业科学,1989,22(3):58-66.

[14] 顾益初,蒋柏藩.石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J].土壤,1990,22(2):101-110.