

施肥对采煤塌陷区复垦土壤理化性质和磷分级的影响

冯鹏艳, 梁利宝

(山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 以山西省晋城市采煤塌陷区复垦土壤为研究对象, 连续3年定位施肥研究施用有机肥(M)、无机肥(NPK)、有机肥+无机肥(NPK+M)对土壤理化性状、土壤磷分级的影响。结果表明: 试验结束后, 不同施肥处理土壤的pH、容重、全氮、全磷含量差异均不显著; 单施有机肥处理的有机质含量显著高于单施化肥处理; 有机肥+无机肥处理土壤速效磷含量高于其余处理, 但处理间差异不显著。有机肥+无机肥处理能够明显提高土壤无机磷组分 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量; 不同施肥处理均显著提高了 Fe-P , 处理间差异不显著; 各处理的 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 增幅不明显; 对照处理的不同无机磷组分含量总体保持下降趋势, 其中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 降幅较为明显。有机肥处理对活性、中活性组分, 有机肥+无机肥处理对活性、中稳性有机磷效果明显, 无机肥对有机磷组分效果不显著。相关性分析表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、中活性、中稳性有机磷与速效磷均呈显著正相关性, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、中活性有机磷与速效磷极显著相关。

关键词: 复垦土壤; 培肥; 无机磷; 有机磷; 磷分级

中图分类号: S144.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0229-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.037

Influence of Fertilization on Physicochemical Properties and Phosphorus Fractions of Reclaimed Soil in Coal-mining Subsidized Land

FENG Pengyan, LIANG Libao

(College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: Taking reclaimed soil of the subsided land resulting from coal-mining as the research object in Jincheng, Shanxi province, the experiment studied the effects of organic manure (M), inorganic fertilizer (NPK) and organic+inorganic fertilizer (NPK+M) application for 3 years on soil physical and chemical properties, phosphorus fractions. The results showed that: there was no significant difference in soil pH, bulk density, total nitrogen and total phosphorus among different fertilization treatments, and the content of organic matter in M treatment was significantly higher than that of single fertilizer treatment, and the content of soil available phosphorus in NPK+M treatment was higher than that in the rest treatments, but the difference was not significant. NPK+M treatment could significantly increase $\text{Ca}_8\text{-P}$ content of the soil inorganic phosphorus fractions, and all fertilization treatments significantly improved the content of Fe-P , while the difference was not significant. The growth of O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ was not obvious in all treatments. The contents of different inorganic phosphorus components in the control treatment generally declined, and $\text{Ca}_8\text{-P}$ and Fe-P declined more obviously. M treatment had significant effect on active and medium active organophosphorus, NPK+M treatment impacted active and medium stable organophosphorus more obviously, and NPK treatment had no significant effect on organophosphorus. The correlation analysis showed that $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , Fe-P , medium activity, medium stable organophosphorus and available phosphorus had significant positive correlation, and $\text{Ca}_8\text{-P}$, medium active organophosphorus and available phosphorus were very significantly correlated.

Keywords: reclaimed soil; fertilization; inorganic phosphorus; organic phosphorus; phosphorus fractions

磷是作物生长的三大必需元素之一, 主要来源于土壤。施肥是土壤磷素增加最主要的途径, 磷肥在土壤中当季利用率很低(15%~25%)^[1], 大部分的磷以不同形态积累在土壤中, 难以被作物利用。磷在土壤

中以有机磷和无机磷两种形式存在, 无机磷是土壤中主要存在形态, 包括 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 形态; 然而施入土壤中的磷素不仅是无机磷肥, 还包括有机磷肥, 有机磷的作用也不容轻

视,包括活性、中活性、中稳性、高稳性有机磷。土壤不同形态磷素活性差异明显。目前,关于不同类型土壤(黄土、潮土、褐潮土、黑土、壤土、红壤)^[2-7]无机磷分级的影响的研究较多,关于黄土丘陵区采煤塌陷区复垦土壤上无机磷分级的研究较少,土壤有机磷分级的研究则尚未报道。采煤塌陷区复垦土壤属于典型的石灰性土壤,磷素缺乏现象十分严重,该试验研究了有机肥、无机肥对复垦土壤无机磷、有机磷分级的影响效果和机理,试图寻找合理的施肥模式,以达到减弱磷素的固定、提高活性磷的含量、利于作物吸收的目的,也是培肥复垦土壤的一项重要内容,旨在提高土壤磷素的利用率,加快复垦土壤熟化速度。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选择玉米(泽玉 41 号)作为供试作物。供试化肥则选用尿素(N 46%),过磷酸钙(P₂O₅ 12%),硫酸钾(K₂O 43%);有机肥选用腐熟鸡粪,其养分含量分别为 N 1.28%,P₂O₅ 1.12%,K₂O 1.18%。

1.2 试验设计

山西省晋城市北石店镇的采煤塌陷复垦区农田土壤复垦前塌陷深度约 1.5~2.3 m,2014 年 5 月左右采用混推模式就地平整法对该区域进行了工程复垦,并休闲 1 年后开始种植玉米。该试验区(35°32′38.0″ N, 112°52′46.3″ E)处于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 5~10 ℃,年降水量 600 mm 左右,当地常年种植玉米、小麦等大田作物。土壤类型为石灰性褐土,质地为壤土,pH 7.85,容重 1.53 g/cm³,土壤有机质、全磷、全氮含量分别为 6.37,0.50,0.54 g/kg,速效磷含量为 7.83 mg/kg。试验采用完全随机的区组设计,小区面积 5 m×4 m=20 m²,试验共设 4 个处理:(1)不施肥;(2)单施化肥;(3)单施有机肥;(4)有机肥(50%)+化肥(50%)。每个处理重复 3 次,而且每个施肥处理还要施入等量的氮 N

120 kg/hm²,磷 P₂O₅ 60 kg/hm²,钾 K₂O 98 kg/hm²。播种前所有化肥、有机肥一次性施入土壤。试验分别在 2015 年 4 月 4 日至 2015 年 9 月 30 日,2016 年 4 月 8 日至 2016 年 10 月 3 日,2017 年 4 月 5 日至 2017 年 9 月 29 日进行,分别在每年玉米成熟期采集土壤样品,不同处理每个土样多点采 0—20 cm 表层土壤,混匀后进行分析。

1.3 测定指标与方法

土壤 pH 采用 pH 计测定,容重采用环刀法测定,土壤有机质采用油浴加热 K₂Cr₂O₇ 容量法测定,土壤全氮采用凯氏法测定,土壤全磷和速效磷采用钼锑抗比色法测定^[8]。由于磷酸钙盐占石灰性土壤中无机磷的比重较大,故无机磷组分采用顾益初等的方法测定^[9]。有机磷组分测定采用 Bowman-Cole 法测定^[10]。数据处理采用 SPSS 13.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同培肥处理对复垦土壤理化性质影响

由表 1 可知,试验过程中复垦土壤 pH 变化始终不明显,不同培肥处理间差异也不显著,在不同年份变化也没有规律。含有机肥的 2 个处理(NPK+M、M)的容重要略低于单施化肥处理,M 处理最低,处理间差异不显著。土壤的养分含量增幅较为明显,土壤有机质较对照提高了 20.3%~33.3%,M 处理效果最明显,显著高于 NPK 处理,NPK+M 处理与 NPK 处理差异则不显著,显然是因为有机肥的施入量不同造成的差异。这与前期在不同复垦年限土壤上研究结果基本一致^[11]。与对照相比,施肥处理的土壤全氮、土壤全磷较对照分别提高了 6.0%~14.1%,7.5%~12.5%,处理间差异并不显著;各施肥处理的速效磷含量较对照提高了 7.20%~16.8%,在第 1 年 NPK 处理含量高于其余处理,以后逐年下降,但处理间差异不显著;到了第 3 年 NPK+M 处理速效磷含量显著高于 NPK 处理,M 处理则居中。

表 1 不同施肥处理对复垦土壤理化性质的影响

年份	处理	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
2015	CK	7.83a	1.50a	6.42b	0.52ab	0.46b	7.80b
	NPK	7.80a	1.53a	6.85b	0.54a	0.50a	8.90a
	M	7.84a	1.48a	7.44a	0.55a	0.52a	8.25a
	NPK+M	7.79a	1.52a	7.04ab	0.54a	0.50a	8.24a
2016	CK	7.88a	1.50a	6.30b	0.50ab	0.42b	7.56c
	NPK	7.83a	1.52a	6.78b	0.53a	0.48a	8.60a
	M	7.75ab	1.54a	7.60a	0.55a	0.47a	8.06b
	NPK+M	7.80a	1.46ab	7.16ab	0.56a	0.47a	8.23ab
2017	CK	8.02a	1.52a	6.44b	0.50b	0.40b	7.48c
	NPK	7.86ab	1.53a	6.90b	0.53ab	0.43ab	8.04b
	M	7.98a	1.53a	7.48a	0.57a	0.45a	8.58ab
	NPK+M	8.02a	1.50a	7.02ab	0.54ab	0.43ab	8.85a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 不同培肥处理对复垦土壤无机磷分级影响

经过 3 年连续培肥,各培肥处理的复垦土壤不同无机形态磷含量均有不同程度增加,但不同无机磷组分占总无机磷的比例变化不大(表 2)。第 1 年,施肥处理的复垦土壤无机磷总量较对照增幅不明显,贡献较为明显的组分是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,各处理分别较对照增加了 0.23~3.83,2.31~3.53 mg/kg,其余组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 贡献相对较少, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 组分增幅却最小。复垦土壤无机磷以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 为主,其次为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量很低,说明磷素积累大部分以缓效态形式存在。NPK+M 处理对 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 效果最显著高于 M 处理最低,NPK 处理居中;NPK 处理较其他处理更好地促进了 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 组分的积累。除了 M 处理 Fe-P 显著高于 NPK 处理外,其余处理间差异性均不显著。各处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 含量差异均不显著。

第 2 年,无机磷总量较对照增加了 2.47%~4.38%,各施肥处理同比上年变化不明显,由于对照处理含量有所降低,因此第 2 年增幅还是要高于第 1 年。活性无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 组分增幅(10.52%~13.35%)更加明显,NPK+

M、NPK、M 处理均显著高于对照处理,尤其是 NPK 处理显著高于 CK 处理,因此效果要高于第 1 年。NPK+M 处理对 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 效果依然最明显,与 M 处理差异变得更加显著,说明随着时间地延长,施肥处理间差异性趋于明显。M 处理对 Fe-P 效果仍为最明显,NPK 处理效果逐渐加强,处理间的差异性消失了。含有机肥 NPK+M、M 和无机肥 NPK 处理的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量分别表现出少量地下降、上升,说明无机肥易于积累活性较低的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,有机肥则相反。

第 3 年,无机磷总量较对照的增幅(3.88%~5.82%)持续加大,各组分对无机磷的贡献同前 2 年。NPK 处理的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量较第 2 年有所“回落”,但并没有与其余处理形成显著差异;该处理 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量则要分别高出其余处理 1.61%~3.28%,1.75%~2.92%,虽未达到差异显著水平,但是能够看出无机肥较有机肥更能促进磷素向缓效态转化。M 处理对 Fe-P 的促进效果则依然明显,不过与 NPK+M、NPK 处理效果差异不显著。NPK+M 处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 显著高于 NPK 处理,与 M 处理则不显著。各处理对 Al-P 效果始终较为稳定,含量差异也不显著。

表 2 不同施肥处理对复垦土壤无机磷组分的影响 单位:mg/kg

年份	处理	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	总无机磷
2015	CK	3.77b(1.02)	60.57b(16.41)	17.02ab(4.61)	11.18b(3.03)	66.03ab(17.89)	210.52a(57.04)	369.09
	NPK	3.85ab(1.02)	62.44ab(16.56)	18.07a(4.79)	11.86b(3.15)	68.71a(18.23)	214.05a(56.25)	378.98
	M	4.05a(1.07)	60.80b(16.09)	17.34ab(4.59)	13.47a(3.56)	67.66a(17.90)	212.64a(56.79)	375.96
	NPK+M	3.94a(1.04)	64.39a(17.04)	18.76a(4.96)	12.23ab(3.24)	67.82a(17.94)	212.83a(55.78)	379.97
2016	CK	3.82b(1.05)	58.45c(16.01)	17.08ab(4.68)	10.29b(2.82)	67.36ab(18.45)	208.19ab(57.01)	365.19
	NPK	4.20a(1.10)	63.38ab(16.62)	18.76a(4.92)	12.62a(3.31)	68.16a(17.88)	214.15a(56.17)	381.27
	M	4.33a(1.16)	61.50b(16.53)	17.86ab(5.10)	12.85a(2.92)	65.76b(17.67)	212.03ab(56.97)	374.33
	NPK+M	4.28a(1.20)	65.74a(17.52)	18.34a(4.89)	11.07ab(2.95)	67.30ab(17.94)	208.25ab(55.50)	375.20
2017	CK	3.80b(1.05)	57.34c(15.89)	17.15ab(4.75)	10.54b(2.92)	67.09b(18.59)	206.03ab(56.80)	361.95
	NPK	4.10ab(1.06)	60.54b(15.84)	17.80ab(4.66)	12.16a(3.44)	71.22a(18.37)	216.52a(56.64)	384.29
	M	4.28a(1.15)	62.60ab(16.78)	18.02a(4.83)	12.55a(3.10)	70.09ab(18.26)	208.43ab(55.88)	375.97
	NPK+M	4.40(1.16)	64.33a(16.98)	18.36a(4.84)	12.38a(3.27)	68.96ab(18.20)	210.84ab(55.66)	379.27

注:括号内数据表示占总无机磷比例(%)。下同。

2.3 不同培肥处理对复垦土壤有机磷分级影响

经过 3 年培肥,复垦土壤的有机磷组分也得到了不同幅度地增长(表 3),各有机磷组分所占份额基本没有明显变化。第 1 年,各处理的总有机磷较对照增加了 1.19%~5.94%,活性、中活性、中稳性有机磷较对照增幅分别为 2.67%~9.62%,1.70%~6.85%,2.02%~3.05%,虽然中活性有机磷增幅低于活性有机磷,但它对总有机磷贡献最大,各处理高稳性有机磷增幅不明显。较对照而言,M 处理的活性、中活性有机磷增幅为 9.62%,6.85%,NPK+M 处理的中稳性有机磷增幅为 3.05%,处理间差异不显著,但它们均与对照达到差异显

著水平;此外,M 处理中活性有机磷还显著强于 NPK 处理,其余处理间差异不显著。各施肥处理对中稳性、高稳性有机磷效果基本相当,差异均不显著。第 2 年,各处理的总有机磷较对照增加了 3.68%~7.37%,略高于第 1 年水平,但是各处理含量普遍却低于第 1 年。M 和 NPK+M 处理分别对中活性、中稳性有机磷组分仍表现出一定的效果,较对照分别提高了 8.92%,3.08%。高稳性有机磷则变化仍旧不明显。各处理中只有 M 处理较对照明显提高了活性、中活性有机磷,但是施肥处理间差异并不显著。各施肥处理对中稳性、高稳性有机磷效果仍然不显著。

表 3 不同施肥处理复垦土壤有机磷组分含量

单位:mg/kg

年份	处理	活性	中活性	中稳活性	高稳性	总有机磷
2015	CK	3.74ab(4.44)	58.40b(69.28)	9.70ab(11.51)	12.46a(14.78)	84.30
	NPK	3.85ab(4.51)	59.04b(69.22)	9.90ab(11.61)	12.5a(14.66)	85.29
	M	4.10a(4.61)	62.46a(70.16)	9.85ab(11.06)	12.62a(14.17)	89.03
	NPK+M	3.90ab(4.49)	60.4ab(69.57)	10.08a(11.61)	12.44a(14.33)	86.82
2016	CK	3.70b(4.55)	55.42b(68.11)	9.75ab(11.98)	12.65a(15.36)	81.37
	NPK	3.90ab(4.51)	56.84ab(68.59)	9.82ab(11.64)	12.87a(15.26)	82.43
	M	4.12a(4.73)	60.1a(69.04)	9.95ab(11.66)	12.68a(14.57)	87.05
	NPK+M	3.85ab(4.55)	58.2ab(68.80)	10.15a(11.76)	12.59a(14.88)	84.59
2017	CK	3.66b(4.46)	54.16c(68.39)	9.70b(11.81)	12.60ab(15.34)	80.12
	NPK	3.82ab(4.54)	58.70b(68.54)	9.85ab(11.70)	12.82ab(15.23)	84.02
	M	4.20a(4.75)	61.20a(69.16)	10.05ab(11.36)	13.04a(14.74)	88.49
	NPK+M	4.05a(4.68)	59.3ab(68.55)	10.40a(12.02)	12.75ab(14.74)	86.50

第 3 年,各处理的总有机磷较对照增加了 2.43%~7.40%,活性、中稳性有机磷与对照增幅基本与上年持平,基本没有明显变化。M 处理的活性、中活性、高稳性有机磷含量分别是所有处理中含量最高的,NPK+M 处理次之,NPK 含量最低。由此看来,无机磷直接转化为有机磷的数量较低,各组分较对照也有少量增加。NPK+M 处理的中稳性有机磷则要显著高于 NPK 处理。各处理的中活性有机磷显著高于对照处理,施肥效果明显。除 NPK 外,NPK+M、M 处理的活性有机磷与对照差异显著。

综上所述,施肥对土壤有机磷组分含量影响:有机肥>有机无机配施>无机肥,说明了不同有机磷组分含量提高主要来源于有机肥,无机肥效果不明显。

2.4 复垦土壤磷组分与速效磷相关性

复垦土壤的无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 都与速效磷均呈显著正相关性(0.688*,0.743**,0.606*,0.623*),尤其是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与速效磷达到极显著相关, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 与速效磷相关性较差(0.447,0.338),这与赵靛等^[12]研究结论较为一致。活性有机磷含量较低,因此供磷能力较差,主要依靠中活性有机磷的补助,才能保证作物生长。中活性有机磷与速效磷达极显著相关,活性、中活性与速效磷显著相关(0.680*,0.724**,0.705*),高稳性有机磷与速效磷相关性较差(0.408),史静等^[7]研究表明,高稳性有机磷与速效磷相关性系数(0.705)大于活性有机磷与速效磷相关系数(0.636),这与本试验结论不一致,原因可能是土壤性质和施肥量、试验时间不一致造成的。总之,不论是无机磷还是有机磷,活性越低(或稳定性越高)的组分与速效磷相关性越不明显。

3 讨论

3.1 施肥对无机磷组分的影响

复垦土壤自身严重缺磷,加之外源磷肥施入有

限,因此土壤不同磷组分增幅较为有限(表 2、表 3),同时复垦土壤有机质含量非常低,限制了磷素有效性^[13],这在一定程度上缩小了处理间磷组分的差异性。刘建玲等^[14]在石灰性土壤上施用磷肥明显增加了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量,其次是 Al-P 和 Fe-P 。本试验中施用化肥(NPK)处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (7.85%)、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ (5.26%)增幅均不明显, Fe-P (15.2%)增幅较为明显,出现这样结果的原因可能是根系的吸收以及 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 转变为 Fe-P ^[15]。试验中 NPK 处理 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量高于 NPK+M,M 处理含量最低,说明了无机磷大量转化为 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,有机肥能够抑制 O-P 的积累和促进 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 溶解^[16]。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 作为一种潜在磷源,首先活化转变为 Fe-P 和 Al-P ,再由 Fe-P 、 Al-P 转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$,成为有效磷^[17],在本试验中发现,NPK+M、M 处理的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在第 2 年表现出不显著的降幅,尤其是在极度缺磷的复垦土壤上,这种现象更容易发生。因此可以认为,无机肥促进了缓效磷的积累,而有机肥促进缓效磷的活化。

不施肥的对照处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量降低到一定水平后基本不再变化,同时该处理的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量逐年下降且均低于施肥处理,主要原因是没有外源磷的施入,尤其是在低磷情况下玉米根系可活化利用土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 而使其减量^[18],以此来弥补土壤磷素的亏空,作为作物磷源的一部分,另外一部分则是来自作物残茬和种子; O-P 属于根系不可利用的磷,短期内不易积累,尤其是在缺磷的复垦土壤上,不论是对照还是施肥处理, O-P 增幅均不明显。

3.2 施肥对有机磷组分的影响

由于腐熟鸡粪本身不但含有较多的活性和中度活性的有机磷,而且其中还含有大量的功能微生物,它们能吸收固定化肥中的磷,在增加土壤有机磷的同时,也促进了化肥磷向有机磷的转化,这种转化被称为“微生物固定”现象。因此,不论是单施有机肥

(M),还是有机无机处理 NPK+M 的有机磷组分都要高于单施无机肥处理 NPK,土壤微生物对土壤 Al-P、Fe-P、Ca-P 和 O-P 的利用可能是促进其向有效磷方向转化的一条重要途径,因此施入无机肥也提高了土壤有机磷含量(表 3)。

在本试验中不施肥处理的增幅不明显,原因可能是复垦土壤磷素含量偏低,高稳性有机磷的积累缺乏来源。各个施肥处理的土壤高稳性有机磷增幅不明显,杨利玲等^[13]研究表明,即使不施肥也可以促进土壤中高稳性有机磷的积累,与本研究结果不一致。分析原因是复垦土壤本身严重缺磷,该试验不论是施肥处理磷的施加量,还是施肥时间均明显较少,导致了高稳性有机磷不易累积。谢林花等^[19]研究表明,施用化肥可以促进土壤中高稳性、中稳性有机磷朝着活性、中活性有机磷转化,在本试验中并未观测到高稳性、中稳性有机磷含量有递减趋势,而只有 M、NPK+M 处理的活性、M 处理的中活性有机磷有较为明显地增幅,该结论与前人的研究结论并不完全一致,这就说明了可能有部分无机磷向有机磷转化。虽然化肥本身不含有有机磷组分,单施化肥也提高了土壤中某些有机磷组分含量(表 3),前人^[20]的研究早已证明,单施化肥有利于高稳性、中稳性有机磷组分向活性、中活性组分转换。

4 结论

(1)施肥改善了复垦土壤的理化性质,降低了土壤容重,土壤氮、磷含量分别提高了 6.0%~14.1%,7.5%~12.5%;有机质提高了 20.3%~33.3%,单施有机肥显著高于无机肥处理。

(2)施肥使复垦土壤无机磷和有机磷都得到了积累,但并没有改变不同磷组分所占比例。有机+无机肥显著增加了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ (增幅 15.8%)和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (12.2%)含量,单施无机肥明显增加了 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (6.26%)、O-P(3.88%)含量,不同施肥处理都可以显著增加 Fe-P(17.44%~18.98%)。单施有机肥显著提高了土壤活性、中活性有机磷,增幅分别是 14.75%,12.9%,有机+无机肥显著提高了活性、中稳性有机磷 10.66%,7.22%,单施无机肥效果不显著。中稳性、高稳性有机磷增幅不明显。

(3)无机磷除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、O-P 组分、有机磷除高稳性组分以外与土壤速效磷相关性较差,其余组分相关性均较好, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、中活性有机磷与速效磷极显著相关,相关系数分别是 0.724**,0.743**。

参考文献:

[1] 陈欣,宇万太,沈善敏.磷肥低量施用制度下土壤磷库的

发展变化[J].土壤学报,1997,34(1):81-87.

- [2] 何晓雁,郝明德,李丽霞,等.黄土高原轮作系统苜蓿土壤磷素变化特征[J].草地学报,2014,22(5):1056-1061.
- [3] 杨军,高伟,任顺荣.长期施肥条件下潮土土壤磷素对磷盈亏的响应[J].中国农业科学,2015,48(23):4738-4747.
- [4] 李新乐,侯向阳,穆怀彬,等.连续 6 年施磷肥对土壤磷素积累/形态转化及有效性的影响[J].草业学报,2015,24(8):218-224.
- [5] 杨小燕,陈祥伟.未开垦干扰黑土土壤磷素形态垂直分布特征[J].土壤通报,2016,47(2):378-282.
- [6] 曹莹菲,张红,刘克.不同施肥方式对土壤磷素各组分含量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):115-120.
- [7] 史静,张誉方,张乃明,等.长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响[J].土壤学报,2014,51(2):351-359.
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000:114-116.
- [9] 顾益初,蒋柏藩.石灰性土坡无机磷测定的测定方法土壤[J].土壤,1990,2(2):101-102.
- [10] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Science, 1978, 125: 95-101.
- [11] 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.
- [12] 赵靛,侯振安,柴颖,等.长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):236-242.
- [13] 杨利玲,杨学云,古巧珍,等.长期施肥对旱地土壤有机磷及其组分的影响[J].土壤通报,2007,38(5):942-945.
- [14] 刘建玲,张福锁.小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II.土壤 Olsen-P 及各形态无机磷的动态变化[J].应用生态学报,2000,11(3):360-364.
- [15] 赵庆雷,王凯荣,马加清.长期不同施肥模式对稻田土壤磷素及水稻磷营养的影响[J].作物学报,2009,35(8):1539-1545.
- [16] 梁国庆,林葆,林继雄,等.长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2001,7(3):241-248.
- [17] 来璐,郝明德,王永功.黄土高原旱地长期轮作与施肥土壤微生物量磷的变化[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):546-549.
- [18] 毛璐,宋春,徐敏.栽培模式及施肥对玉米和大豆根际土壤磷素有效性的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(12):1502-1510.
- [19] 谢林花,吕家珑,张一平,等.长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II.无机磷和有机磷[J].应用生态学报,2004,15(5):790-794.
- [20] 周广业,阎龙翔.长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响[J].土壤学报,1993,30(4):443-446.