

不同土地利用方式对农田黑土剖面磷形态分布的影响

谷思玉¹, 张一鹤¹, 陆欣春^{2,3}, 韩晓增^{2,3}, 邹文秀^{2,3}, 郝翔翔^{2,3}

(1.东北农业大学资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030;2.中国科学院东北地理与农业生态研究所,中国科学院黑土区农业生态重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150081;3.海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站,黑龙江 哈尔滨 150081)

摘 要:不同土地利用方式影响土壤磷形态分布,从而决定土壤潜在供磷能力。本文对 4 种土地利用方式下(裸地、自然草地、苜蓿地、农田)的黑土土壤剖面磷素分布进行测定分析,结果表明,不同利用方式持续 12 a 对黑土剖面磷形态分布影响较大,黑土中有机磷含量随土层深度增加而降低,而无机磷、有效磷含量及磷素活化系数随土层深度增加而呈增加趋势,在同一土层磷素活化系数表现为自然草地>裸地>苜蓿地>农田。农田不施肥处理经过 12 a 玉米种植后,土壤中全磷、有效磷含量均低于其他利用方式,玉米植株主要吸收土壤中无机磷,与裸地相比,农田土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量依次降低了 29.4%~75.3%、45.7%~59.5%、72.1%~83.3%、13.3%~36.1%、7.0%~33.2%、19.3%~41.6%。自然草地和苜蓿地比裸地无机磷含量分别降低 11.5%~28.5%、2.2%~31.0%;与裸地相比,农田、自然草地和苜蓿地有机磷所占比例分别增加 7.0~16.4、1.5~9.0、0.8~13.9 个百分点。总之,不施肥农田作物吸收消耗了土壤中无机磷,使有机磷所占比例有所增加;自然草地和苜蓿地可使土壤中无机磷向有机磷转化,使有机磷比例有所增加。

关键词:黑土;利用方式;磷含量;磷活化系数;磷形态

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A

The effect of land use on the distribution of soil phosphorous forms in black soil profile

GU Si-yu¹, ZHANG Yi-he¹, LU Xin-chun^{2,3}, HAN Xiao-zeng^{2,3}, ZOU Wen-xiu^{2,3}, HAO Xiang-xiang^{2,3}

(1. College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;
2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin, Heilongjiang 150081, China;
3. National Observation Station of Hailun Agroecology System, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstracts: Different land uses influence soil phosphorous (P) forms in soil profiles that determines soil P supply capacity. The distribution of soil P forms in different land uses including bare land, natural land, alfalfa land, farmland were studied based on a twelve-year field experiment located in National Observation Station of Hailun Agroecology System. Different land uses had influences to some extent on the distribution of soil P forms in black soil profiles. It showed that soil organic P content decreased as soil depth increased, and the content of inorganic P and available P and P activation coefficient (PAC) increased with increasing soil depth. Soil PAC in a given soil layer showed a decreasing trend in the order of natural land > bare land > alfalfa land > farmland. Soil total P and available P contents in farmland were lower than those in other treatments due to that the maize mainly absorbed inorganic P. Compared with bare land, the contents of $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , Fe-P , O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ in farmland were decreased by 29.4%~75.3%, 45.7%~59.5%, 72.1%~83.3%, 13.3%~36.1%, 7.0%~33.2% and 19.3%~41.6%, respectively. The contents of inorganic P in natural land and alfalfa land were decreased by 11.5%~28.5% and 2.2%~

收稿日期:2018-03-30 修回日期:2019-05-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300605, 2016YFD0300806, 2016YFD0200309,);黑龙江省应用技术与开发计划(GY2017ZB006);公益性行业(农业)科研专项(201503120);中国科学院东北地理与农业生态研究所青年科学家小组项目(DLSXZ1605)

作者简介:谷思玉(1964-),女,黑龙江肇源人,教授,研究方向为土壤肥力修复。E-mail:gsyneau@163.com

通信作者:陆欣春(1982-),男,内蒙古赤峰人,博士,主要从事土壤肥力与调控方面的研究。E-mail:luxinchun@iga.ac.cn

31.0%, respectively. Compared the proportion of the organic P of bare land, the farmland, natural land and alfalfa land increased by a percentage of 7.0~16.4, 1.5~9.0, 0.8~13.9, respectively. Therefore, crop in farmland absorbed more inorganic P, which resulted in the percentage increase of organic P. However, natural land and alfalfa land enhanced the conversion from inorganic P to organic P, which also resulted in the percentage increase in organic P.

Keywords: black soil; land uses; phosphorus content; phosphorous activation coefficient; phosphorous forms

中国陆地系统自然土壤磷含量为 0.05~1.73 g·kg⁻¹[1], 土壤中的磷主要由有机磷和无机磷两部分组成。有机磷是土壤磷库的重要组成部分, 约占土壤总磷的 25%~90%[2], 土壤有机磷含量受土壤母质、土壤类型、土壤特性、土壤质地、植被类型、气候季节变化及土地管理措施等因素影响; 黑土中有机磷含量相对较高, 采用³¹P 核磁共振技术分析表明, 正磷酸盐和磷酸单酯各约占黑土土壤可浸提总磷的一半[3]。无机磷种类较多, 成分较复杂, 大体上可以分为矿物态磷、吸附态磷和水溶态磷 3 种形态。土壤中大部分磷被土壤固相吸附, 作物主要吸收利用水溶态磷, 但其含量极低, 它的补充主要靠无机磷的溶解和解吸以及有机磷的矿化。土壤中有机磷的矿化主要包括受微生物活性影响的生物学过程和胞外酶所介导的生物化学过程[4]。矿化速率受水分、温度和基质的影响, 这些因素主要影响微生物活性而影响有机磷矿化[5-6]。土壤有机磷的年矿化率在 2%~4% 范围内, 虽然数量较少, 但其提高了土壤速效磷水平[7]。土壤中有机磷及无机磷的形态分布决定了土壤供磷能力和潜在供磷能力。

土地利用方式不同可以引起陆地生态及生物地球化学循环过程的变化, 导致土壤性质变化和土地生产力改变[8]。而黑土自然生态系统的植被类型为草原化草甸植被, 以杂类草群落为主, 开垦为农田过程中, 植被改变、土壤扰动及施肥等人类农业活动均影响其土壤性质和土地生产力。关于施肥对黑土磷形态变化影响已进行了研究[9], 但对于黑土由荒地开垦为农田过程中土壤磷形态的变化还鲜有报道。由于已无法找到荒地开垦为农田的研究材料, 为此我们拟通过监测其逆向过程, 即农田恢复至荒地过程中土壤磷形态变化, 推断出黑土由荒地开垦为农田过程磷形态变化。土壤中磷主要来源于母质及外源磷肥施入, 如果没有外源磷肥的施入, 土壤中的磷主要来源于母质。对于成熟的黑土, 其成土过程是独具特点的: 黑土有季节性冻层, 质地粘重, 透水不良, 黑土水分和随水分运行的成土产物除一部分由地表和侧透排走外, 绝大部分只运行于 1 m 或 2~3 m 土层内, 很难淋溶到地下水层[10]。并且磷素在土壤中移动性较弱, 为此我们重

点关注黑土中磷在 1 m 土层内运移。本文依托设在中国科学院海伦农业生态系统国家野外科学观测研究站的长期定位试验, 通过探讨 4 种没有外源磷肥投入的土地利用方式下(自然草地、裸地、苜蓿地、农田)土壤剖面磷形态分布, 分析黑土供磷能力及其供磷潜力。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在中国科学院海伦农业生态系统国家野外科学观测研究站进行。该站位于黑龙江省海伦市(47°26'N, 126°38'E), 平均海拔为 234 m, 属温带大陆性季风气候区; 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 雨热同季, 全年降水量为 500~600 mm, 主要集中在 5~9 月, 年平均气温 1.5℃。作物有效生长期为 120~130 d, 供试土壤类型为中厚层黑土, 是第四纪形成的黄土状母质上发育的地带性土壤, 土壤质地比较粘, 渗透能力弱, 毛管水运移速率较慢, 土壤持水能力和保水性较强, 地下水埋深 20~30 m。

1.2 试验设计

试验从 2003 年开始, 为长期定位试验, 设 4 个处理: (1) 农田: 玉米种植时间在 5 月初, 常规耕作, 不施用任何肥料, 也不进行灌溉。秋季将玉米地上部收获、称重、移出小区, 人工翻地, 深度 20 cm, 起垄待第二年播种; (2) 自然草地: 尽量减少人工干扰, 让其自然长草, 秋季草类植物枯萎自然掉落在土壤表层, 翌年春天杂草自然发芽生长; (3) 苜蓿地: 2003 年春季人工播种苜蓿, 让其自然生长, 如有杂草将其拔除, 秋季枯萎的苜蓿自然覆盖在土壤表层, 以后每年苜蓿自然生长; (4) 裸地: 土壤表层不生长任何作物, 人工除去生出的杂草。小区面积: 4.2 m×5 m=21 m²。在 2014 年 10 月玉米收获后, 采集土壤剖面(0~100 cm)土样, 间隔 20 cm 为一层, 每小区取 3 个点, 同层次土样混匀后, 四分法取 1 kg 左右土样。

不同形态磷含量的测定参考鲁如坤的土壤农业化学分析法[11]。有机磷分组及无机磷分组方法分别见图 1 和图 2。

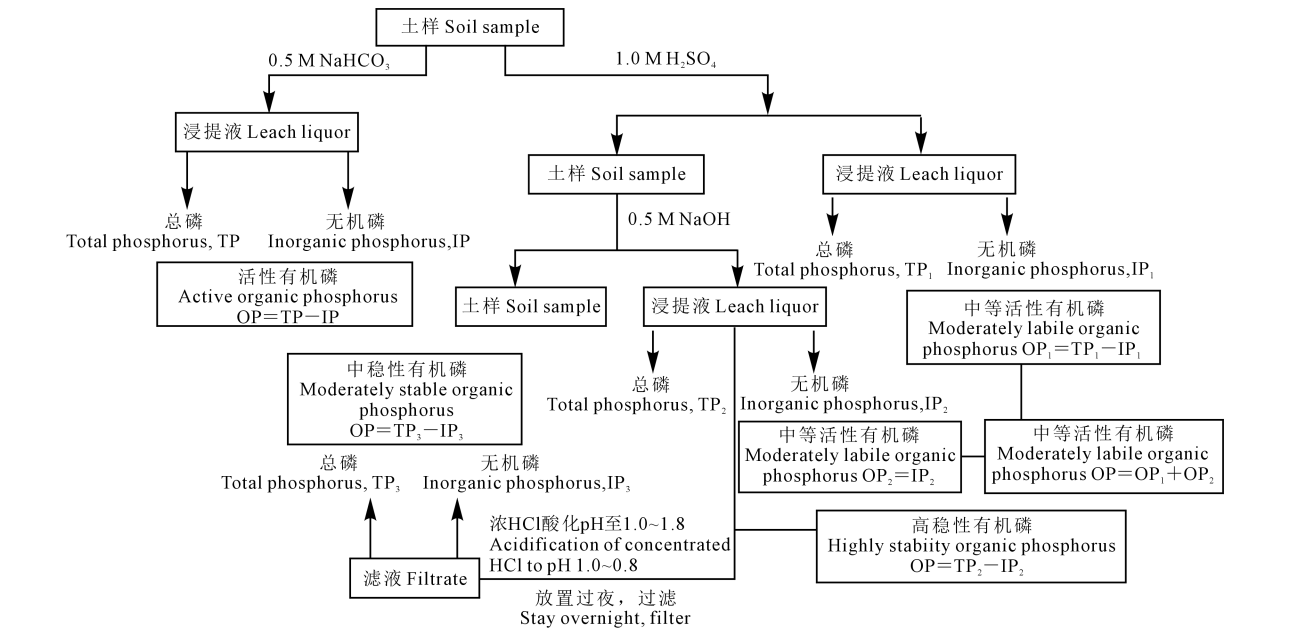


图 1 土壤有机磷分组方法
Fig.1 Method to classify soil organic phosphorus

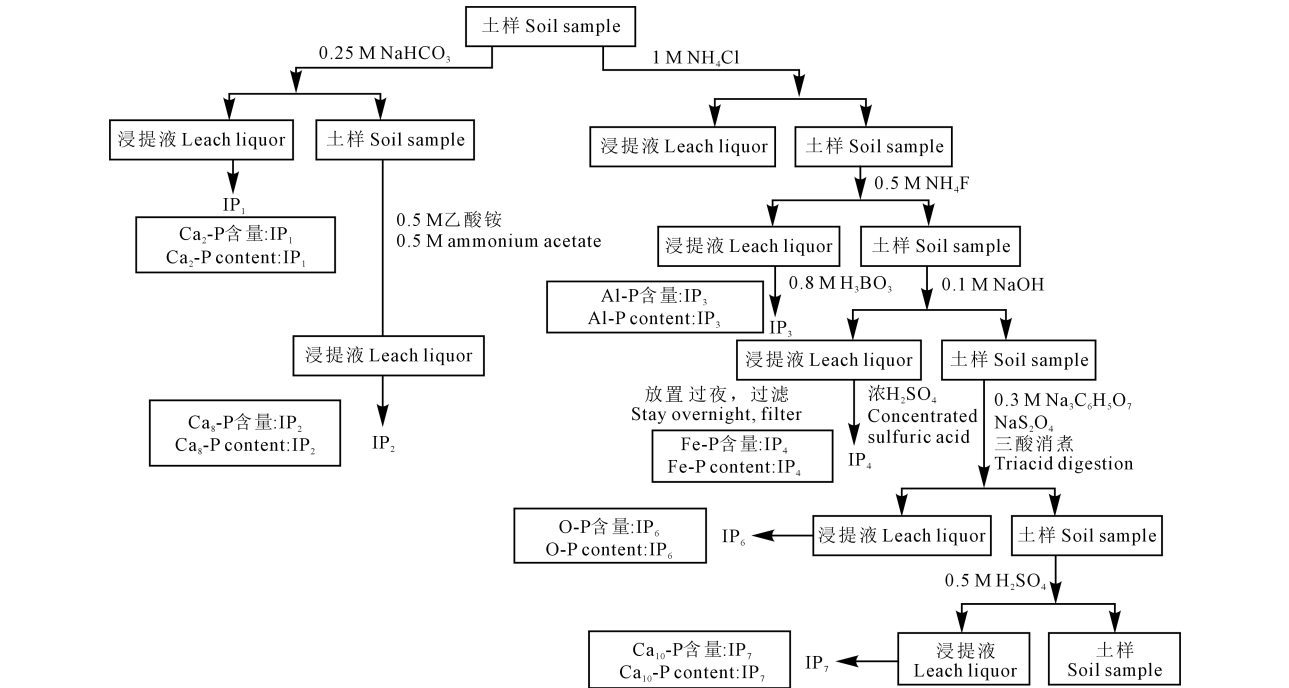


图 2 土壤无机磷分组方法
Fig.2 Method to classify soil inorganic phosphorus

1.3 数据处理

磷素活化系数计算: 磷素活化系数 (PAC) = $\frac{\text{有效磷含量}}{\text{全磷含量}} \times 100\%$

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 软件进行处理, Origin 8.0 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式对土壤全磷和有效磷含量的影响

从黑土剖面全磷含量分布可以看出 (图 3 (A)), 黑土剖面全磷含量从上至下差异不大, 其中

苜蓿地随剖面深度增加全磷含量有所降低;与无作物的裸地相比,农田、自然草地、苜蓿地黑土剖面土壤全磷含量均有所降低,并且以农田最低。由图 3 (B)可看出,在 0~100 cm 剖面随土层深度增加,土壤有效磷含量呈先降低后逐渐增加的趋势,在 20~40 cm 土层含量最低;不同利用方式间比较,也以农田最低,其次为苜蓿,自然草地仅 20~40 cm 土层有效磷含量低于裸地,其余层次与裸地相近。

2.2 不同土地利用方式对土壤剖面磷素活化系数的影响

土壤磷素活化系数结果(图 4)表明,供试黑土磷素活化系数可达 2.1%~8.6%;随着土层深度增加土壤磷素活化系数逐渐增加,80~100 cm 土层磷素活化系数最高,而 20~40 cm 土层磷素活化系数最低;不

同利用方式间比较可以看出,在同一土层除 20~40 cm 呈现为裸地>自然草地、苜蓿地>农田,其余土层均呈现为自然草地>裸地>苜蓿地>农田。

2.3 不同土地利用方式对土壤总无机磷和总有机磷分布的影响

由图 5 可知,土壤总无机磷含量分布随土层深度增加逐渐增加,而土壤有机磷含量随土层深度的增加而逐渐降低。不同利用方式间,农田土壤无机磷含量最低,裸地最高,裸地有机磷含量最低,自然草地处理土壤 0~40 cm 土层有机磷含量最高,而 60~100 cm 土层苜蓿地有机磷含量相对较高,这可能是由于苜蓿根系能生长至土壤更深层次,从而增加了一定数量的有机磷。而可能是由于没有外源磷肥的投入,农田玉米根系吸收的无机磷因玉米移出

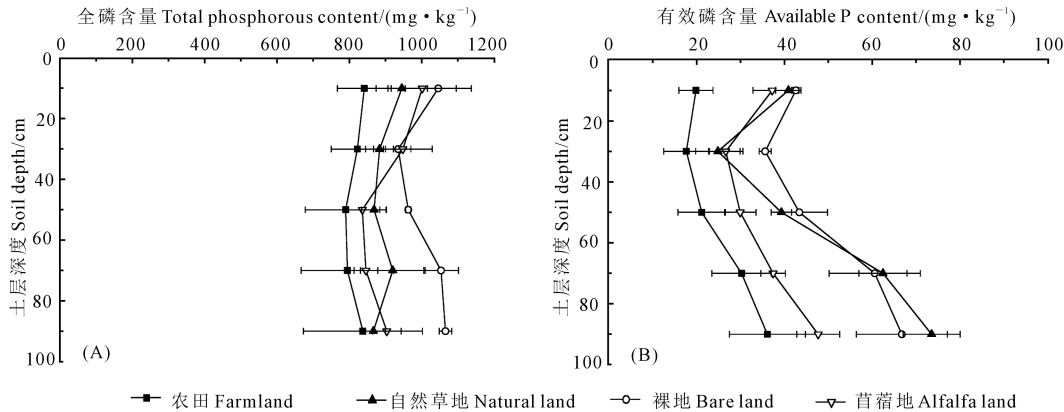


图 3 不同土地利用方式对黑土剖面全磷和有效磷含量分布的影响

Fig.3 Effects of land uses on the contents of total phosphorous and available P in black soil profiles

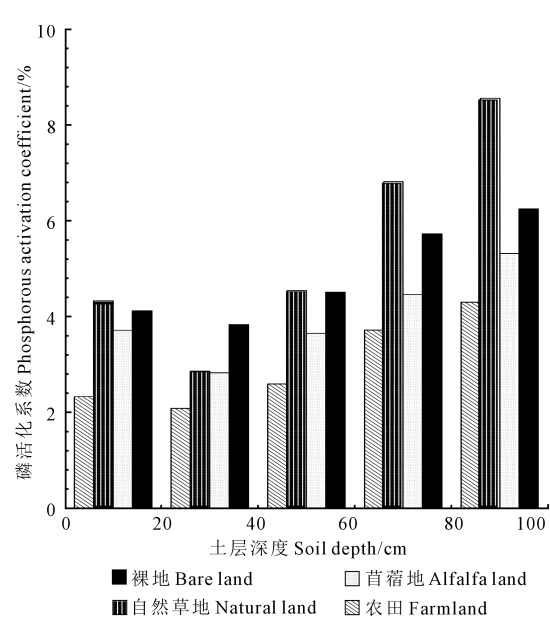


图 4 不同土地利用方式对黑土剖面磷活化系数的影响

Fig.4 The effect of land uses on the contents of phosphorous activation coefficient in black soil profiles

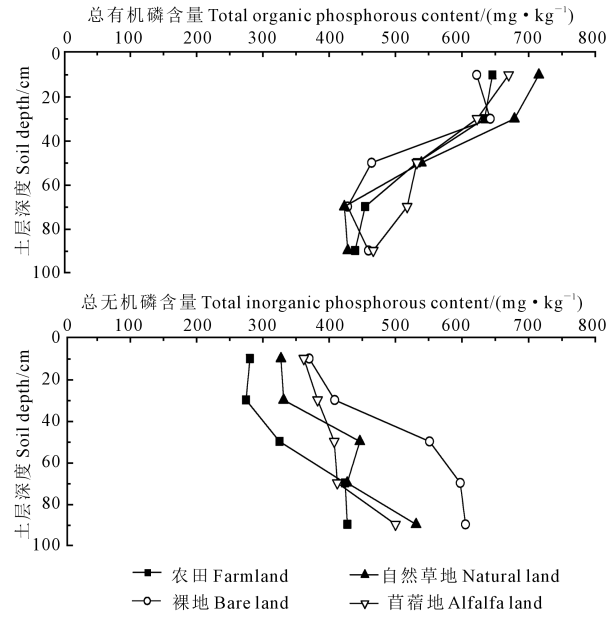


图 5 不同土地利用方式对黑土剖面总有机磷和无机磷含量分布的影响

Fig.5 The effect of land uses on the contents of total organic and inorganic phosphorous contents in black soil profiles

农田而得不到补充,与裸地相比,农田无机磷含量降低了 24.1%~41.0%;而自然草地和苜蓿地中,其无机磷含量亦有所下降,与裸地相比降低了 11.5%~28.5%、2.2%~31.0%。

从不同利用方式下土壤全磷储量可以看出(表 1),0~100 cm 土层裸地的全磷储量最高,其次为苜蓿地、自然草地和农田土壤。与裸地相比,农田、自然草地和苜蓿地土壤全磷储量分别降低 18.9%、

15.5%、13.3%;农田土壤从上到下每层全磷储量分别降低 15.4%、19.2%、20.3%、18.9%、20.4%;自然草地土壤从上至下每层全磷储量分别降低了 19.7%、4.7%、14.5%、15.5%、21.3%;苜蓿地土壤从上至下每层全磷储量分别降低了 5.3%、0.1%、17.7%、22.3%、17.9%。综上可以看出:与裸地相比,农田、自然草地及苜蓿地各土层全磷储量均呈不同程度降低。

表 1 不同土地利用方式对土壤全磷储量的影响

Table 1 The effect of land uses on the storage of total phosphorous in black soil profiles within 0~100 cm

土层深度 Soil depth/cm	容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)				全磷储量 Total phosphorous storage/(kg·hm ⁻²)			
	农田 Farmland	裸地 Bare land	自然草地 Natural land	苜蓿地 Alfalfa land	农田 Farmland	裸地 Bare land	自然草地 Natural land	苜蓿地 Alfalfa land
0~20	1.20	1.14	1.01	1.12	2014	2381	1913	2254
20~40	1.11	1.21	1.22	1.19	1824	2258	2151	2255
40~60	1.26	1.30	1.23	1.22	1991	2497	2134	2055
60~80	1.38	1.28	1.24	1.23	2187	2697	2278	2095
80~100	1.39	1.37	1.33	1.32	2324	2919	2297	2396
总计 Total	—	—	—	—	10340	12752	10773	11055

2.4 不同土地利用方式对土壤不同形态有机磷含量分布的影响

在黑土土壤剖面中,不同形态有机磷含量均随着土层深度的增加呈降低趋势(图 6)。不同土地利用方式下,土壤各层不同形态有机磷含量总体上裸地最低,苜蓿和自然草地的中稳性有机磷及高稳性有机磷含量相对最高。土壤中活性有机磷含量占有机磷比例较低,其含量仅为其他形态有机磷含量的 10%左右;不同利用方式中,表层农田土壤活性有机磷含量最高,40~100 cm 土层中苜蓿地处理活性有机磷含量高于其他处理。

2.5 不同土地利用方式对土壤不同形态无机磷含量分布的影响

对于黑土剖面不同形态无机磷,裸地处理各土层各形态无机磷含量均高于其他利用方式,而农田处理相对最低(图 7)。与裸地相比,农田土壤从上至下,各土层 Ca₂-P 含量依次降低了 63.8%、57.0%、75.3%、29.4%、32.4%;Ca₈-P 含量依次降低了 56.5%、53.6%、59.5%、52.5%、45.7%;Al-P 含量依次降低了 75.2%、76.7%、72.1%、78.3%、83.3%;Fe-P 含量依次降低了 13.3%、24.3%、34.7%、36.1%、27.4%;O-P 含量依次降低了 7.0%、27.2%、33.2%、11.6%、20.2%;Ca₁₀-P 含量依次降低了 19.3%、26.6%、41.6%、24.8%、30.4%。与裸地相比,自然草地 Ca₂-P 含量降低了 14.0%~79.4%;Ca₈-P 含量降低了 5.4%~40.5%。

2.6 不同土地利用方式对土壤不同形态磷比例的影响

从不同形态磷所占比例可以看出(图 8),在所

有磷形态中,活性有机磷、Ca₂-P、Ca₈-P 和 Al-P 所占的比例非常低,这 4 个形态磷之和占全磷比例不超过 10%;高稳定性有机磷、中稳性有机磷、中等活性有机磷、O-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 所占比例均较高。随着土层深度的增加土壤有机磷所占比例逐渐降低,在 4 种土地利用方式下,表层土壤总有机磷所占比例可达 62.7%~69.7%,而在 80~100 cm 土层总有机磷所占比例为 43.1%~50.6%,降低了约 20 个百分点;与表层土壤相比,80~100 cm 土层高稳定性有机磷所占比例降低了约 10 个百分点,Fe-P 和 O-P 所占比例分别增加了约 8 个百分点。与裸地相比,自然草地中稳性有机磷所占比例增加了 3.4~4.9 个百分点,高稳性有机磷所占比例增加了 1.5~6.0 个百分点,O-P 所占比例降低了 2.5~6.9 个百分点;无肥农田中等活性有机磷所占比例增加了 1.9~6.8 个百分点,中稳性有机磷所占比例增加 0.2~3.8 个百分点,高稳性有机磷所占比例增加 1.3~6.8 个百分点,Al-P 所占比例降低了 2.4~3.4 个百分点,Fe-P 所占比例降低了 0.6~4.5 个百分点。总体上看,与裸地相比,农田、自然草地和苜蓿地 0~100 cm 土层土壤有机磷所占比例分别增加了 7.0~16.4、1.5~9.0、0.8~13.9 个百分点。

3 讨 论

根据黑龙江省第二次土壤普查时(1979~1990 年)黑土剖面磷分布资料显示,黑土表层土壤中无机磷和有机磷含量分别为 413 mg·kg⁻¹和 707 mg·kg⁻¹,而 80~100 cm 深层土壤无机磷和有机磷含量

分别为 $371\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $19\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,随土层加深有机磷含量剧减,而无机磷含量并未随土层加深出现明显变化,不过后者中水溶性磷含量随土层

加深渐增,磷酸钙盐在剖面下层增多^[10]。由此可以看出,黑土供磷潜力很大,但在生产中由于作物苗期地温较低,土壤磷有效性低,因此在实际生产中仍

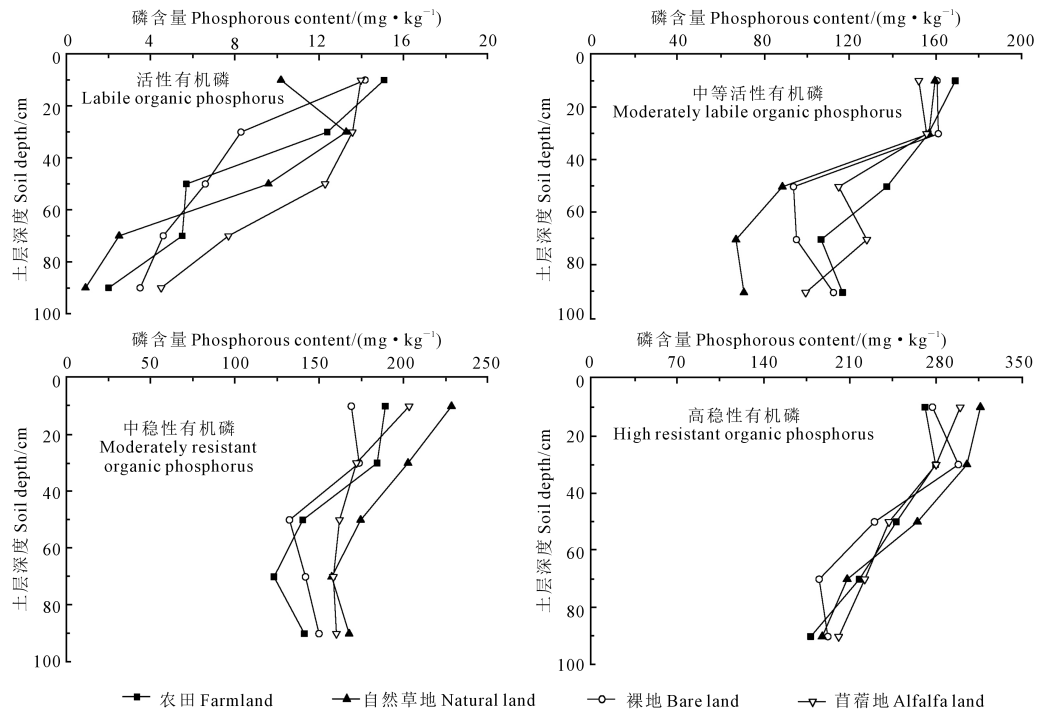


图 6 不同土地利用方式对黑土剖面不同形态有机磷含量分布的影响

Fig.6 The effect of land uses on different organic phosphorous forms in black soil profiles

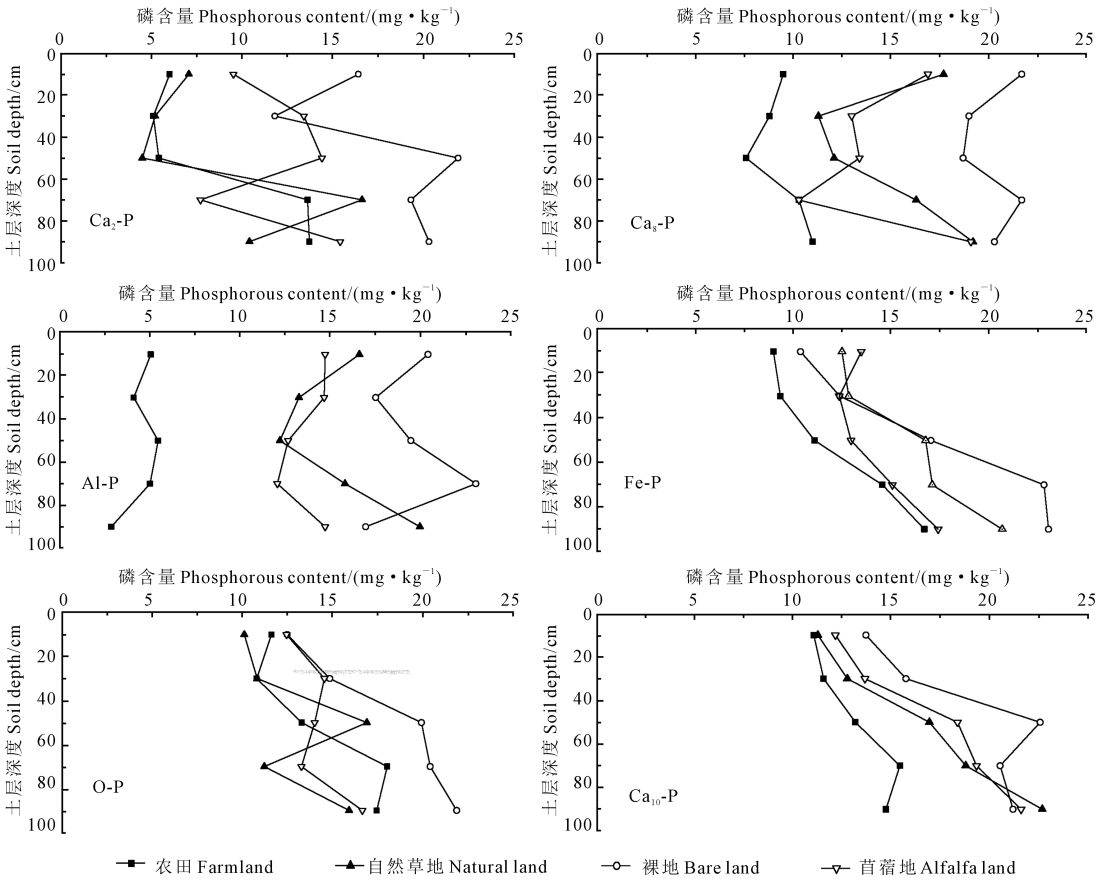


图 7 不同土地利用方式对黑土剖面不同形态无机磷含量分布影响

Fig.7 The effect of land uses on different inorganic phosphorous forms in black soil profiles

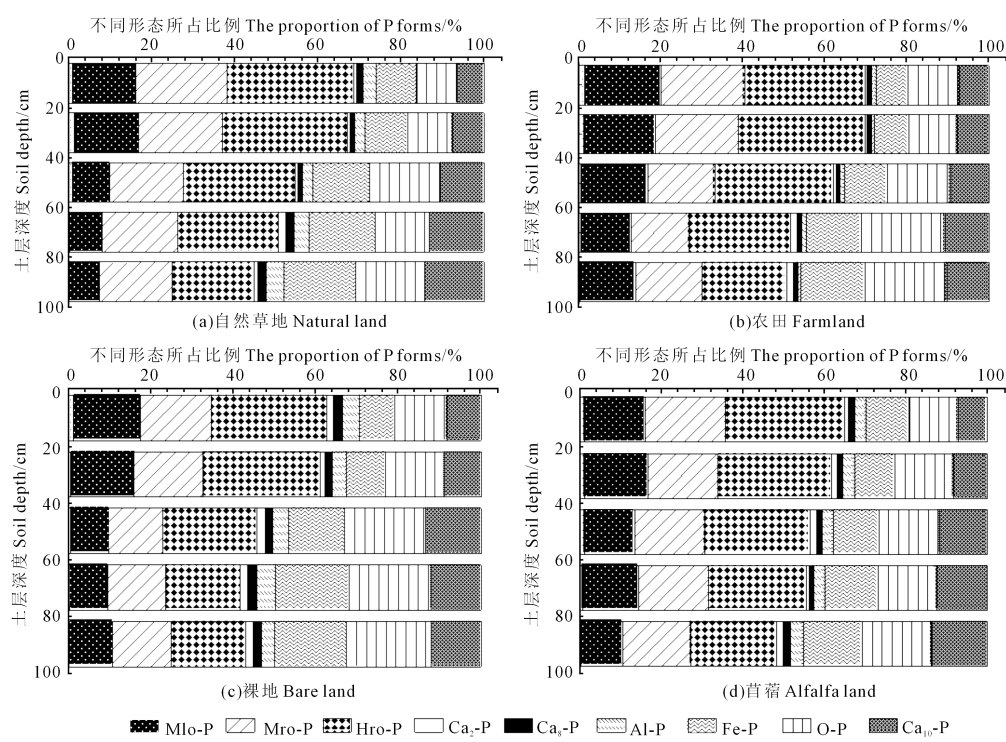


图 8 不同利用方式对黑土剖面不同形态磷所占比例影响

Fig.8 The effect of land uses on the percentages of different phosphorous forms in black soil profiles

需要大量施用磷肥,造成土壤磷出现显著盈余。磷作为植物生长必需营养元素,其土壤供应能力影响作物高产,但磷盈余又会对环境造成负面影响,因而长期施用磷肥对土壤中磷形态分布的影响引起研究者广泛关注^[12-17]。

本试验从 2003 年开始设置不同利用方式的处理(4 个处理初始土壤为同一块农田),从土壤剖面磷分布可以看出,随土层深度增加,全磷含量无明显变化,有机磷含量逐渐降低,这与大部分土壤有机磷含量分布规律一致^[18],而无机磷含量逐渐增加。本试验中各处理土壤表层(0~20 cm)无机磷含量为 280.7~369.9 mg·kg⁻¹,有机磷含量为 621.5~715.1 mg·kg⁻¹;80~100 cm 土层无机磷含量为 427.4~605.1 mg·kg⁻¹,有机磷含量为 427.3~465.7 mg·kg⁻¹。可以看出,与第二次土壤普查黑土剖面磷分布情况相比,表层无机磷含量有所降低,有机磷含量变化不大,而 80~100 cm 土层无机磷含量稍有增加,有机磷含量提高 21.5~23.5 倍。虽然本试验与第二次土壤普查不是同一地点剖面,但其差异也说明了磷盈余在土壤中存在累积趋势,并以有机磷形式累积进入土壤深层。

本试验同一田块经过 12 a 不同利用方式的影响之后,土壤剖面磷形态分布呈现出不同趋势,总体上不同土层中裸地处理无机磷含量均为最高,而有机磷含量相对最低,说明植物生长主要使无机磷向有机磷转化。对于农田处理,由于没有外源磷肥

投入,并且每年所得收获物均移出了土壤,使得每年磷素处于亏缺状态,根据每年玉米生物量及其各部分磷含量估算,12 a 玉米从土壤中携出总磷量为 302.4 kg·hm⁻²,这个数值与农田耕层与裸地总磷储量差值相近,但远低于 0~100 cm 土层总磷储量差值(表 1);从不同形态磷素在土壤中分布(图 8)可以看出,玉米主要吸收消耗了土壤无机磷,减少了无机磷含量,使土壤无机磷所占比例降低,而有机磷所占比例有所增加。贺敬滢^[19]在陕西商洛市张地沟小流域进行的试验结果显示,土壤速效磷、Ca₂-P 和 Fe-P 含量均为耕地最高,荒草地最低,主要是因为耕地有外源磷肥施入,并且其投入的磷量高于作物携出的磷量。

同一块土地不同土地利用方式下的土壤,在 5 大成土因素中除生物因素外,其他因素(气候、母质、地形和时间)相同的条件下,在没有磷肥投入也没有作物磷携出情况下,因为磷不会以气体方式损失,并且在土壤中迁移性很弱,理论上土壤全磷储量差异不大,但从 0~100 cm 土层全磷储量结果显示(表 1),自然草地、苜蓿地与裸地相比,无机磷含量降低,有机磷含量增加,即作物生长吸收无机磷转化成有机磷,无机磷所占比例降低,有机磷所占比例增加(图 8),总磷储量有所降低。秦胜金等^[20]研究三江平原不同土地利用方式下土壤 P 形态变化结果表明,农田利用方式可影响有机磷的输出和矿化,使耕地中有机磷缓慢恢复。本试验结果也表

明,自然草地土壤有机磷在缓慢恢复(0~40 cm 土层有机磷含量有所增加)。宋春等^[21]采用 20 a 长期定位试验方法监测同一块黑土地,结果表明,天然杂草可恢复土壤磷素肥力。本试验中,对于自然草地和苜蓿地,每年植物地上部自然死亡后,凋落物掉落在土壤表层,既增厚了土层又使表层疏松,使得 0~20 cm 土层容重有所降低,全磷储量降低,深层 40~100 cm 土层裸地土壤全磷含量及储量均高于自然草地和苜蓿地,并且无机磷含量高于其他利用方式,这可能有两个原因,其一是试验起始前深层土壤磷分布不均匀,其二可能由于无作物生长,土壤中部分有机磷矿化转为无机磷,具体原因还有待进一步验证。

经耕作后荒地土壤有机磷含量下降,并且土壤中可浸提无机磷含量最初增加,数年后也下降^[4]。本试验中起始土壤为已开垦多年的农田土壤,在其恢复自然荒地过程中,土壤 0~40 cm 土层有机磷含量增加(图 4),也间接证明荒地开垦为农田过程中,有机磷矿化使其含量有所下降。在作物轮作系统中,种植红叶草是一种增加土壤磷循环和有效性的策略^[22],本试验中种植苜蓿对土壤磷形态分布的影响与自然草地处理相近,土壤无机磷存在向有机磷转化的趋势。

4 结 论

1)黑土 0~100 cm 剖面中全磷含量为 789.2~1 064.9 mg·kg⁻¹,不同利用方式间,裸地全磷含量最高,农田全磷含量最低;同一利用方式下,土壤全磷含量随土层深度分布变化较小;土壤无机磷含量随土层深度增加而增加,有机磷含量随土层加深而降低。

2)黑土 0~100 cm 剖面中有效磷含量随土层加深呈现增加趋势,不同利用方式间表现为裸地、自然草地>苜蓿地>农田;说明不施肥农田作物吸收利用降低土壤中有效磷含量,自然草地和苜蓿地处理亦吸收利用磷,降低土壤中有效磷含量。

3)黑土土壤磷素的活化系数可达 2.1%~8.6%,随着土层深度的增加呈增加趋势,同一土层呈现为自然草地>裸地>苜蓿地>农田。

4)黑土 0~100 cm 土层全磷储量表现为:裸地>苜蓿地>自然草地>农田。

5)农田连续 12 a 不施肥种植玉米,玉米主要吸收利用了土壤中的无机磷,使土壤无机磷所占比例降低,种植草地和苜蓿也吸作消耗了土壤中的无机磷,其残体腐解后增加有机磷含量。

参 考 文 献:

[1] 卢同平,张文翔,武梦娟,等.干湿度梯度及植物生活型对土壤氮磷空间特征的影响[J].土壤,2017,49(2):364-370.

[2] 汪洪,宋书会,张金尧,等.土壤磷形态组分分级及³¹P-NMR 技术应用研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):512-523.

[3] 张广娜,陈振华,陈利军,等.东北地区三种典型土壤磷组分的³¹P 核磁共振研究及其土壤磷酸酶活性的关系[J].土壤通报,2013,44(3):617-623.

[4] Frossard E, Condron L M, Oberson, et al. Processes governing phosphorus availability in temperate soils[J]. Journal of Environmental Quality,2000,29(1):15-23.

[5] Soon Y K, Arshad M A. Comparison of the decomposition and N and P mineralization of canola, pea and wheat residues[J]. Biology and Fertility of Soils,2002,36(1):10-17.

[6] Chen C, Condron L, Davis M, et al. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand[J]. Forest Ecology and Management,2003,177(1-3):539-557.

[7] 赵少华,字万太,张璐,等.土壤有机磷研究进展[J].应用生态学报,2004,15(11):2189-2194.

[8] Braimah A K, Vlek P L G. The impact of land-cover change on soil properties in Northern Ghana[J]. Land Degradation and Development,2004,15(1):65-74.

[9] 陆欣春,邹文秀,韩晓增,等.长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1537-1543.

[10] 何万云.黑龙江土壤[M].北京:农业出版社,1992.

[11] 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.

[12] 李想,刘艳霞,刘益仁,等.无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响[J].土壤,2013,45(4):641-647.

[13] 安志装,介晓磊,李有田,等.不同水分和添加物料对石灰性土壤无机磷形态转化的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(1):58-64.

[14] 黄欣欣,廖文华,刘建玲,等.长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J].土壤学报,2016,53(3):779-789.

[15] 邢璐,王火焰,陈玉东,等.施加粪肥对潮土有机磷形态转化的影响[J].土壤,2013,45(5):845-849.

[16] 杨艳菊,王改兰,张海鹏,等.长期施用不同肥料对栗褐土有机磷组分的影响[J].土壤,2013,45(3):426-429.

[17] Ostrofsky M L, Stolarski A G, Dagen K A. Export of total particulate and apatite phosphorus from forested and agricultural watersheds[J]. Journal of Environmental Quality,2018,47(1):106-112.

[18] Kitayama K, Majalap-Lee N, Aiba S. Soil phosphorus fractionation and phosphorus-use efficiencies of tropical rainforests along altitudinal gradients of Mount Kinabalu, Borneo[J]. Oecologia,2000,123(3):342-349.

[19] 贺敬滢.土地利用与景观部位对土壤磷分布的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.

[20] 秦胜金,刘景双,王国平,等.三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化[J].环境科学,2007,28(12):2777-2782.

[21] 宋春,韩晓增.不同土地利用下黑土磷素肥力特征的研究[J].土壤通报,2007,38(5):928-933.

[22] Almeida D S, Penn C J, Rosolem C A. Assessment of phosphorus availability in soil cultivated with ruzigrass[J]. Geoderma,2018,312:64-73.