

典型黑土区不同水土保持林表层土壤 磷素形态及有效性^{*}

杨小燕 范瑞英 王恩姮 夏祥友 陈祥伟^{**}

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要 以典型黑土区人工营造的落叶松林、水曲柳林、樟子松林和美青杨林表层土壤(0~10 cm)为对象,研究不同类型水土保持林土壤磷素的形态和有效性。结果表明:水曲柳林和美青杨林土壤全磷、速效磷和磷各组分含量均显著高于落叶松林和樟子松林;4种林地土壤磷主要以有机磷形式存在,并且中活性有机磷 NaOH-P_o含量最高,占土壤磷素总量的58.9%;对植物有效性相对较高的 H₂O-P_i 和 NaHCO₃-P 含量较低,分别占土壤磷素总量的 1.2% 和 6.6%;除 NaHCO₃-P_o 外,土壤中不同磷素形态之间以及磷各组分与土壤有机质、全磷和有效磷之间具有显著相关关系。表明研究区内阔叶林比针叶林能够显著地提高土壤磷的有效性。

关键词 黑土 水土保持林 磷组分 磷有效性

文章编号 1001-9332(2014)06-1555-06 **中图分类号** S151, S157 **文献标识码** A

Topsoil phosphorus forms and availability of different soil and water conservation plantations in typical black soil region, Northeast China. YANG Xiao-yan, FAN Rui-ying, WANG En-heng, XIA Xiang-you, CHEN Xiang-wei (School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(6): 1555–1560.

Abstract: Aiming to understand soil phosphorus status of plantations in typical black soil region of Northeast China, the topsoil (0–10 cm) phosphorus fractionations and its availability were examined in four soil and water conservation plantations dominantly composed of *Larix gmelini*, *Fraxinus mandshurica*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Populus nigra* var. *italica* × *P. cathayan*, respectively. The results showed that total P, Olsen-P and the concentration of different P fractionations in *F. mandshurica* and *P. nigra* var. *italica* × *P. cathayan* plantations were significantly higher than that of the other two coniferous plantations. Organic P was the major fractionation in the four plantations' topsoil, and sodium hydroxide extractable organic P (NaOH-P_o) representing moderately labile organic phosphorus was predominant, which accounted for 58.9% of total P. The contents of H₂O-P_i and NaHCO₃-P which were more labile to plant were lower, only accounting for 1.2% and 6.6% of total P, respectively. Except for NaHCO₃-P_o, all the other P fractions of four plantations correlated with each other, and they also had significant correlations with soil organic matter, total P, Olsen-P. Compared with the coniferous plantations, the broadleaf plantations presented higher availability of phosphorus.

Key words: black soil; soil and water conservation plantation; phosphorus fractionations; phosphorus availability.

磷是植物生长发育必需的营养元素之一。由于受土壤粘粒和其他土壤组分如无定型铁铝氧化物等的吸附与化学固定,大部分磷转化为无效的形态,从而限制了植物生长^[1-2]。由于土壤磷素的化学形态

很难测定,因此,一般采用磷素分级的方法来定量描述土壤磷素形态^[3]。由 Hedley 等^[4]提出的基于土壤磷素生物有效性将土壤磷分为有机磷和无机磷的一种连续提取技术——Hedley 分组法,已广泛应用于描述土壤磷素状况。Tiessen 等^[5]对此方法作了改进,省去了 Hedley 磷素分级中含量较低的土壤微生物磷和土壤团聚体内磷。Sui 等^[6]和 Guppy 等^[3]进

* 国家自然科学基金项目(41271293)和中央高校基本科研业务费专项(2572014AA38)资助。

** 通讯作者。E-mail: chenxwnefu@163.com

2013-09-13 收稿, 2014-03-27 接受。

行了修正,使得测试更方便、应用更广泛、成本更低。该方法主要优点是不仅广泛应用于探讨自然和管理生态系统内土壤磷的动态变化^[7-9],而且通过包括对植物有效程度不同的有机磷组分在内的不同磷组分的量化获得长期和短期内磷的有效性^[10]。

在生态系统中,土壤磷的数量以及动态不仅取决于母质、气候、地形和时间等土壤形成因素^[11-12],而且受土地利用类型和经营管理方式等的影响^[13-14]。在东北黑土区,由于长期不合理的土地利用及对植被的破坏,导致土壤质量下降,表现出有机质含量降低、磷素亏缺明显^[15]。水土保持林的建设,不仅能够有效改善土壤理化性质,提高N、P等养分含量^[16-17],而且会影响土壤磷的组分及含量的变化。目前,关于黑土区土壤磷分级的研究主要集中在种植、施肥管理的农田土壤方面^[18-19],而有关水土保持林土壤磷素组分的变化尚不明确。因此,采用土壤磷连续提取方法对典型黑土区不同水土保持林土壤的磷素组分进行研究,旨在了解黑土土壤的磷素形态,进而探明不同水土保持林类型对土壤供磷能力的影响,为科学评价黑土区土壤磷的有效性提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

研究地点位于黑龙江省西北部克山县境内的克山农场(48°12'—48°23' N, 125°8'—125°37' E),土壤类型以粘化湿润均腐土为主,属典型黑土区^[20]。在克山农场26连队,选择立地条件相似地段上的人工营造的落叶松(*Larix gmelini*)林、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林和美青杨林(*Populus nigra* var. *italica* × *P. cathaya*),设置20 m×20 m标准样地各3块,于2011年10月在样地内按照“S”型5点取样法采集0~10 cm土样,除去石块、植物根系等杂质后等量混合,自然风干后过2 mm备用。样地基本特征见表1。

表1 样地基本特征

Table 1 General characteristics of plots

样地类型 Plot type	林龄 Stand age (a)	密度 Stand density (trees · hm ⁻²)	容重 Bulk density (g · cm ⁻³)	pH (1 : 2.5 H ₂ O)	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N (g · kg ⁻¹)	水解氮 Hydrolyzable N (g · kg ⁻¹)
A	46	850	1.27	5.87	57.63	3.10	0.56
B	44	875	1.09	6.60	71.74	4.23	0.54
C	48	775	1.19	5.91	50.83	3.16	0.47
D	45	825	0.98	6.01	78.03	4.34	0.84

A: 落叶松人工林 *L. gmelini* plantation; B: 水曲柳人工林 *F. mandshurica* plantation; C: 樟子松人工林 *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation; D: 美青杨人工林 *P. nigra* var. *italica* × *P. cathaya* plantation. 下同 The same below.

1.2 测定项目与方法

土壤磷组分分析采用Sui等^[6]修正后的磷素分级方法,即运用连续浸提的方法,逐级加入去离子水、0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃-P、0.1 mol · L⁻¹ NaOH、1 mol · L⁻¹ HCl和H₂SO₄-HClO₄,提取出土壤中稳定性由弱到强的各级土壤磷素形态,即H₂O-P_i、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o、NaOH-P_i、NaOH-P_o和残留-P。无机磷总量 P_i=H₂O-P_i+NaHCO₃-P_i+NaOH-P_i,有机磷总量 P_o=NaHCO₃-P_o+NaOH-P_o+HCl-P_o+残留-P。磷素活化系数(PAC, %)=土壤速效磷含量×100/(全磷×1000)^[21]。C/P_o=土壤有机碳/P_o^[22]。

土壤容重采用环刀法测定,土壤有机碳含量用Multi EA400型元素分析仪测定,土壤pH值用水浸提(水土比为2.5:1)电位法测定,全氮含量采用半自动凯氏定氮仪测定,水解性氮含量采用碱解扩散法,全磷含量采用硫酸-高氯酸消解钼锑抗比色法,土壤速效磷含量采用氟化铵-盐酸浸提钼锑抗比色法测定^[23]。重复3次。

1.3 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 13.0软件对数据进行统计分析,通过单因素方差分析(one-way ANOVA)的LSD法对数据进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤全磷和速效磷的变化

从表2可以看出,黑土区4种水土保持林0~10 cm土层土壤全磷含量为0.74~0.86 g · kg⁻¹,平均0.80 g · kg⁻¹,其中,水曲柳林和美青杨林土壤全磷含量显著高于落叶松林和樟子松林。4种林地土壤速效磷含量在1.94~4.31 mg · kg⁻¹,平均3.47 mg · kg⁻¹,其中,水曲柳林和美青杨林土壤速效磷含量显著高于落叶松林和樟子松林。

土壤磷素活化系数(phosphorus activation coefficient, PAC)是土壤速效磷含量占全磷含量的百分比,可反映土壤磷素转化为速效磷的潜在能力或水

表 2 不同样地土壤全磷和速效磷含量

Table 2 Soil total phosphorus and Olsen phosphorus contents in different plots

样地类型 Plot type	全磷 Total P (g · kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P (mg · kg ⁻¹)	磷素活化系数 PAC (%)
A	0.74±0.03b	1.94±0.12c	0.26±0.02b
B	0.85±0.04a	4.09±0.11a	0.47±0.03a
C	0.74±0.04b	3.54±0.06b	0.48±0.03a
D	0.86±0.01a	4.31±0.21a	0.50±0.03a

不同字母表示样地间差异显著($P<0.05$)。Different letters meant significant difference among different plots at 0.05 level. 下同 The same below.

平^[21]。4种水土保持林土壤磷活化系数为0.26%~0.50%,<2.0%,表明黑土区土壤全磷活化能力较低,其中,以美青杨林土壤磷活化系数最高,落叶松林最低,并与其他3种林地差异显著。

2.2 土壤磷各组分含量的变化

研究表明,土壤H₂O-P_i是对植物最有效的无机磷^[7]。从表3可以看出,4种水土保持林土壤H₂O-P_i平均含量为5.00 mg · kg⁻¹,占土壤磷素总量的1.2%,其中,水曲柳林和美青杨林土壤H₂O-P_i含量显著高于落叶松林和樟子松林。

0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃提取的无机磷(NaHCO₃-P_i)和有机磷(NaHCO₃-P_o)是由吸附于多晶磷化合物、倍半氧化物或碳酸盐表面的磷组成,为土壤活性磷^[13]。NaHCO₃-P_i可以被植物直接吸收利用,对植物生长的有效性较高。4种水土保持林土壤NaHCO₃-P_i含量平均为6.74 mg · kg⁻¹,其中,以美青杨林土壤NaHCO₃-P_i含量最高,水曲柳林次之,落叶松林和樟子松林最低,并且水曲柳林和美青杨林土壤NaHCO₃-P_i含量分别与落叶松林和樟子松林差异显著。NaHCO₃-P_o是可溶性有机磷,在微生物的作用下可迅速分解成植物可吸收利用的形态。与NaHCO₃-P_i相比,NaHCO₃-P_o含量较高,占磷素总量的6.0%,表现出较高的黑土易溶性有机磷库,但4种林地土壤NaHCO₃-P_o含量差异不显著。

0.1 mol · L⁻¹ NaOH提取的磷与无定形结晶铝、铁磷酸盐以及胡敏酸和富里酸结合的磷有关,是中

活性磷,用于磷的长期转化,对植物有一定的有效性^[24]。4种水土保持林土壤中活性磷含量在162.86~332.90 mg · kg⁻¹,占磷素总量的49.5%~54.3%,在土壤中的比例最高,其中,NaOH-P_o占中活性磷总量的81.4%~84.0%,表明黑土区林地土壤潜在、可供转化的有机磷数量较多,是土壤磷主要的储存库。4种林地中,水曲柳林土壤NaOH-P_o含量显著高于落叶松林和樟子松林;水曲柳林土壤NaOH-P_o含量最高,占土壤磷素总量的62.9%,是落叶松林的2.0倍。表明水曲柳林土壤NaOH-P作为补充土壤有效磷的潜在磷源贮量较高。

1 mol · L⁻¹ HCl提取的磷主要是钙结合磷^[14],对植物的有效性较低。黑土区不同水土保持林土壤HCl-P_i含量极低,可以忽略不计。4种林地土壤钙结合磷含量较低,HCl-P_i仅占磷素总量的4.9%。水曲柳林和美青杨林土壤HCl-P_i含量显著高于落叶松林和樟子松林。

残留-P为倍半氧化物覆盖的闭蓄态无机磷,包括其他矿物质中的Ca-P和不能提取的P_o混合物。残留-P较稳定,难以被植物吸收利用^[4]。4种林地土壤残留-P含量在85.81~131.75 mg · kg⁻¹,占土壤磷素总量的29.9%~35.9%,仅次于土壤NaOH-P_o。4种水土保持林中,阔叶林水曲柳林和美青杨林土壤残留-P含量最高,落叶松林最低,并与其他3种林地差异显著。

2.3 土壤无机磷和有机磷总量的变化

土壤中磷的存在形态分为有机磷和无机磷,能被植物吸收利用的磷为无机磷。从表4可以看出,4种水土保持林土壤无机磷含量为9.93~15.95 mg · kg⁻¹,占土壤磷素总量的2.9%~3.5%。与无机磷相比,土壤有机磷含量较高,占磷素总量的96.5%~97.1%,表明植物吸收的磷有相当一部分来自土壤有机磷的矿化。不同水土保持林土壤无机磷和有机磷含量均以美青杨林最高,水曲柳林次之,落叶松林和樟子松林最低。此外,4种水土保持林土壤P_i/P_o为3.0~3.7。

表 3 不同样地各形态土壤磷含量

Table 3 Contents of phosphorus with different forms in different plots (mg · kg⁻¹)

样地类型 Plot type	H ₂ O-P _i	NaHCO ₃ -P _i	NaHCO ₃ -P _o	NaOH-P _i	NaOH-P _o	HCl-P _i	残留-P Residual-P
A	4.80±0.02b	4.08±0.13c	25.02±3.90a	1.06±0.06b	161.80±33.01b	16.18±6.96b	85.81±2.49b
B	5.18±0.14a	7.98±0.61a	25.35±0.73a	2.26±0.65a	330.64±7.19a	26.43±6.03a	131.75±19.24a
C	4.82±0.12b	6.38±0.29b	24.23±11.27a	1.45±0.17b	193.14±27.81b	11.96±3.62b	117.04±5.15a
D	5.22±0.10a	8.53±0.45a	28.72±0.41a	2.20±0.20a	328.19±8.98a	30.27±2.33a	131.43±1.28a

表4 不同样地土壤无机磷和有机磷总量

Table 4 Amounts of organic phosphorus and inorganic phosphorus in different plots

样地类型 Plot type	P _i (mg · kg ⁻¹)	P _o (mg · kg ⁻¹)	P _i / (P _i +P _o) (%)	P _o / (P _i +P _o) (%)	C/P _o
A	9.93	288.80	3.3	96.7	117
B	15.42	514.18	2.9	97.1	82
C	12.64	346.37	3.5	96.5	86
D	15.95	518.61	3.0	97.0	88

表5 磷各组分与土壤性质之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between phosphorus fractionations and soil properties

指标 Index	全磷 Total P	速效磷 Olsen-P	H ₂ O-P _i	NaHCO ₃ -P _o	NaHCO ₃ -P _i	NaOH-P _o	NaOH-P _i	HCl-P _o	残留 P Residual-P
有机质 Organic matter	0.833 **	0.596 *	0.871 **	-0.032	0.700 *	0.833 **	0.675 *	0.754 **	0.585 *
全磷 Total P		0.691 *	0.735 **	0.108	0.747 **	0.898 **	0.636 *	0.857 **	0.716 **
速效磷 Olsen-P			0.748 **	0.182	0.963 **	0.829 **	0.793 **	0.558	0.922 **
H ₂ O-P _i				0.083	0.866 **	0.858 **	0.813 **	0.669 *	0.710 **
NaHCO ₃ -P _o					0.202	0.173	0.216	0.503	0.056
NaHCO ₃ -P _i						0.873 **	0.797 **	0.646 *	0.918 **
NaOH-P _o							0.815 **	0.760 **	0.803 **
NaOH-P _i								0.611 *	0.574
HCl-P _o									0.479

* P<0.05; ** P<0.01.

3 讨 论

土壤全磷包括各种形态的磷素,是土壤磷素总储量的标志。黑土区4种水土保持林土壤全磷含量在0.74~0.86 g · kg⁻¹,比较充足,但速效磷含量较低,<5 mg · kg⁻¹,且土壤磷活化系数为0.26%~0.50%;PAC<2.0%^[21],表现出较低的土壤全磷活化能力,全磷中只有很小一部分被转化为有效磷供作物吸收利用。因此,全磷向植物可利用方向的转化对于植物至关重要,而在转化过程中土壤有机质起重要作用。通过对土壤有机质与速效磷、土壤磷组分的相关分析发现,土壤有机质与速效磷呈显著正相关,与H₂O-P_i、NaHCO₃-P_i、NaOH-P_i、NaOH-P_o、HCl-P_o和残留态磷均显著相关。磷各组分与土壤有机质具有显著相关性^[9,25~26],表明土壤磷素主要来自于有机物质,有机质含量的变化会引起土壤磷组分的变化。有研究表明,采用C/P_o评价土壤磷的矿化能力,C/P_o<200,会出现土壤微生物碳的增加和有机磷的矿化^[22]。本研究中,4种水土保持林土壤C/P_o为82~117,表明黑土区林地土壤有机磷易发生矿化作用,使被粘土或铁铝氧化物等固定的磷释放出来,从而增加了土壤有效无机磷的含量。

土地的利用与管理方式会影响土壤养分物质的

2.4 土壤各磷素形态与土壤性质的关系

将土壤有机质与全磷、速效磷、磷各组分进行相关分析,黑土区4种水土保持林土壤有机质与全磷、速效磷呈显著正相关(表5)。除NaHCO₃-P_o外,各种形态磷含量均与土壤有机质呈显著相关;土壤速效磷与其他5种磷组分均呈显著相关,并与NaHCO₃-P_i的相关性最强,相关系数达到0.963。土壤不同磷组分之间的相关关系达到显著水平,并以NaHCO₃-P_i与残留态磷的相关系数最大。

输入和输出,进而影响土壤养分的有效性^[9,24]。阔叶林水曲柳林和美青杨林土壤中不同形态磷组分含量高于落叶松林和樟子松林,且部分磷组分之间的差异达显著水平,并以美青杨林土壤磷活化系数最高,PAC达到0.50%,显著高于落叶松林,土壤全磷容易转化为有效磷。此外,水曲柳林和美青杨林土壤C/P_o小于落叶松人工林,表现出较强的磷素矿化能力。可见,植被类型能够影响土壤磷素形态及有效性,并以阔叶林提高土壤磷素有效性的效果最为显著。出现这种现象的原因可能是:一方面,阔叶林相对较多的凋落物归还和较高的根系生物量,导致其表层土壤有机质含量高、矿化能力强,各磷素组分含量高于针叶林;另一方面,阔叶林土壤全磷含量高、枯枝落叶分解速度快^[27],土壤磷素有效性的能力有一定的提高。这与渠开跃等^[28]、刘成刚和薛建辉^[29]的研究结论一致。

土壤速效磷是反映土壤供磷能力的指标,其含量高低主要取决于土壤磷组分之间的分布状况和转化方向。一般认为,土壤速效磷和某组分磷的相关性越显著,该组分磷的相对有效性就越高。黑土区林地土壤速效磷与H₂O-P_i、NaHCO₃-P_i、NaOH-P_i、NaOH-P_o和残留-P均呈显著正相关,表明在速效磷低的黑土区林地土壤中,不同形态磷可以通过矿化等方式

转化为有效性较高的磷形态。但它们之间的相关程度不同,其中与 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 的相关系数最大,表明土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 是植物最有效的磷源^[30]。残留-P 被认为是对大多数植物无效的磷,但 4 种林地土壤速效磷与其表现出显著相关性,表明若土壤速效磷含量降低,林地土壤可以通过难溶磷的活化提高磷的有效性,即残留-P 在较长时间内对植物是有效的^[31]。除 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 外,土壤各磷素形态之间的相关性显著,表明不同形态磷之间存在一定的相互影响与制约。

土壤磷分为有机磷和无机磷。有机磷化合物有核蛋白、植酸、核酸和磷脂等,是植物生长所需磷的重要来源,尤其是在无机磷含量低、固磷能力强的土壤上,有机磷只有经过矿化成为无机磷酸盐才能被植物所利用^[32]。黑土区 4 种水土保持林土壤有机磷含量为 $288.80 \sim 518.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占磷素总量的 $96.5\% \sim 97.1\%$,高于其他土壤类型^[11,25],林地土壤磷组分以 NaOH-P_o 为主,其中 NaOH-P_o 含量最高^[8,12,33]。4 种水土保持林土壤不同磷组分含量的大小顺序均表现为 $\text{NaOH-P}_o > \text{残留-P} > \text{NaHCO}_3\text{-P}_o > \text{HCl-P}_o > \text{NaHCO}_3\text{-P}_i > \text{H}_2\text{O-P}_i > \text{NaOH-P}_i$,表明黑土区林地土壤潜在的、可供转化的有机磷数量较多。4 种林地土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 的差异不显著,基本不受植被覆盖的影响,这与吴荣贵等^[34]的研究结论相类似。

4 结 论

黑土区 4 种水土保持林通过影响土壤磷素形态、活性及组成进而影响磷的有效性,且除 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 外,均表现出水曲柳林和美青杨林土壤全磷、有效磷和磷各组分含量均显著高于落叶松林和樟子松林。

不同林分类型土壤不同磷组分含量存在一定差异,对植物有效性相对较高的 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量很低, NaOH-P_o 和残留-P 含量较高。其中,中等活性有机磷(NaOH-P_o)是土壤磷素的主要成分,占磷素总量的 $54.2\% \sim 62.4\%$,是土壤磷供应的主要来源。

土壤有机质与土壤全磷、有效磷以及磷各组分呈显著正相关。有机质含量不同,土壤不同磷形态也存在差异。土壤不同形态磷之间的相关关系达到显著水平,反映了不同形态磷之间相互转化的内在关系。

参考文献

[1] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the

- rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 2001, **237**: 173–195
- [2] Guo Y-J (郭彦军), Ni Y (倪 郁), Han J-G (韩建国). Effects of establishing perennial artificial grasslands on the availability of soil phosphorus in agro-pastoral transitional zones, Northern China. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2010, **19**(2): 169–174 (in Chinese)
- [3] Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, et al. Analytical methods and quality assurance: A simplified, sequential, phosphorus fractionation method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, **31**: 1981–1991
- [4] Hedley MJ, White RE, Nye PH. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. Emerald) seedlings. III. Changes in L value, soil phosphate fractions and phosphatase activity. *New Phytologist*, 1982, **91**: 45–56
- [5] Tiessen H, Chacon R, Cuevas E. Phosphorus and nitrogen status in soils and vegetation along a toposequence of dystrophic rainforests on the upper Rio Negro. *Oecologia*, 1994, **99**: 145–150
- [6] Sui Y, Thompson ML, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 1174–1180
- [7] Rose TJ, Hardiputra B, Rengel Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant and Soil*, 2010, **326**: 159–170
- [8] Xavier FAS, Oliveira TS, Andrade FV, et al. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. *Geoderma*, 2009, **151**: 417–423
- [9] Teng Z-Q (滕泽琴), Li X-D (李旭东), Han H-G (韩会阁), et al. Effects of land use patterns on soil phosphorus fractions in the Longzhong part of the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2013, **22**(2): 30–37 (in Chinese)
- [10] Schmidt JP, Buol SW, Kamprath EJ. Soil phosphorus dynamics during 17 years of continuous cultivation: A method to estimate long-term P availability. *Geoderma*, 1997, **78**: 59–70
- [11] Solomon D, Lehmann J, Mamo T, et al. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma*, 2002, **105**: 21–48
- [12] McDowell RW, Stewart I. The phosphorus composition of contrasting soils in pastoral, native and forest management in Otago, New Zealand: Sequential extraction and ^{31}P NMR. *Geoderma*, 2006, **130**: 176–189
- [13] Li H, Shen J, Zhang F, et al. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) grown in monocropping and intercropping systems. *Plant and Soil*, 2008, **312**: 139–150
- [14] Song C, Han XZ, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under dif-

- ferent ecosystems. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, **44**: 37–47
- [15] Fan H-M (范昊明), Cai Q-G (蔡强国), Wang H-S (王红闪). Condition of soil erosion in Phaeozem region of Northeast China. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(2): 66–70 (in Chinese)
- [16] Shen H (沈慧), Jiang F-Q (姜凤岐), Du X-J (杜晓军), et al. Evaluation on soil anti-erodibility of soil and water conservation forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(3): 345–348 (in Chinese)
- [17] Wang Y (王岩), Li Y-L (李玉灵), Shi J-H (石娟华), et al. Effect of different vegetation restoration measures on the species diversity and soil properties of iron tailings. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, **26**(3): 112–117 (in Chinese)
- [18] Yang J-J (杨佳佳), Li Z-J (李兆君), Liang Y-C (梁永超), et al. Effects and their mechanisms of temperature and moisture on phosphorous transformation in black soil manured with different fertilizers. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(6): 1295–1302 (in Chinese)
- [19] Zhou B-K (周宝库), Zhang X-L (张喜林). Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(2): 143–147 (in Chinese)
- [20] Gong Z-T (龚子同). *Chinese Soil Taxonomy: Theory, Methods, Practices*. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [21] Yang H (杨慧), Cao J-H (曹建华), Sun L (孙蕾), et al. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types of Karst Area. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(2): 135–140 (in Chinese)
- [22] Xiao R, Bai JH, Gao HF, et al. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient. *Catena*, 2012, **98**: 96–103
- [23] Chen L-X (陈立新). *Soil Experiment and Practice Tutorials*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2005 (in Chinese)
- [24] Redel Y, Rubio R, Godoy R, et al. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geoderma*, 2008, **145**: 216–221
- [25] Wen Q (文倩), Zhao X-R (赵小蓉), Zhang S-M (张书美), et al. Distribution characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(2): 327–332 (in Chinese)
- [26] Brandtberg PO, Davis MR, Clinton PW, et al. Forms of soil phosphorus affected by stand development of mountain beech (*Nothofagus*) forests in New Zealand. *Geoderma*, 2010, **15**: 228–234
- [27] Lin B (林波), Liu Q (刘庆), Wu Y (吴彦), et al. Advances in the studies of forest litter. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(1): 60–64 (in Chinese)
- [28] Qu K-Y (渠开跃), Dai L-M (代力民), Feng H-M (冯慧敏), et al. Soil fertility characteristics of main forest types in eastern mountain areas of Liaoning. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(3): 558–562 (in Chinese)
- [29] Liu C-G (刘成刚), Xue J-H (薛建辉). Basic soil properties and comprehensive evaluation in different plantations in rocky desertification sites of the Karst region of Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(10): 1050–1060 (in Chinese)
- [30] Zheng Z, MacLeod JA, Sanderson JB, et al. Soil phosphorus dynamics after ten annual applications of mineral fertilizers and liquid dairy manure: Fractionation and path analyses. *Soil Science*, 2004, **169**: 449–456
- [31] Wright RB, Lockaby BG, Walbridge MR. Phosphorus availability in an artificially flooded southeastern floodplain forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**: 1293–1302
- [32] Xu Y-C (徐阳春), Shen Q-R (沈其荣), Mao Z-S (茆泽圣). Influences of long-term fertilization on the contents and distributions of forms of organic P in soil and soil particle sizes. *Acta Pedologica sinica* (土壤学报), 2003, **40**(4): 593–598 (in Chinese)
- [33] Richter DD, Allen H, Li J, et al. Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: Major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest. *Oecologia*, 2006, **150**: 259–271
- [34] Wu R-G (吴荣贵), Lin B (林藻), Tiessen H. Study on the dynamic of soil phosphorus in the transitional areas of grasslands and crop field. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2003, **9**(2): 131–138 (in Chinese)

作者简介 杨小燕,女,1986年生,博士研究生。主要从事水土保持研究。E-mail: yangxy0566@163.com

责任编辑 孙菊