

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复模式 土壤无机磷形态分布特征

齐雁冰, 常庆瑞*, 田 康, 刘梦云, 刘 京, 陈 涛

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以地处黄土丘陵沟壑区的宁夏海原县南华山为研究区域,采用蒋柏藩、顾益初的土壤无机磷分级体系,对不同植被恢复类型(灌木、草地、乔木、乔灌混交)下土壤无机磷形态分布特征进行研究。结果表明:除草地外的植被恢复模式下土壤有机质、全氮含量明显高于农田,其中乔木林地和乔灌混交林地高于灌木和草地,土壤 pH、全钾和全磷在不同恢复模式下无明显差异。黄土丘陵沟壑区土壤总无机磷含量在 225.19~322.75 mg·kg⁻¹ 之间,占全磷的比例在 36.18%~72.39%之间,其中以 Ca₁₀-P 含量最高,其他形态含量顺序为 Ca₈-P>Fe-P>Al-P>Ca₂-P>O-P。4 种植被恢复模式下土壤无机磷总量、占全磷的比例及 Ca₁₀-P 均高于农田, Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 则低于农田;灌木和草地无机磷总量和占全磷比例高于乔木林地和乔灌混交林地。对各无机磷形态与速效磷相关性分析表明, Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 与速效磷呈极显著正相关关系,无机磷形态的生物有效性顺序为 Al-P>Ca₈-P>Fe-P>Ca₂-P。因此,黄土丘陵沟壑区不同植被恢复模式对土壤养分和无机磷分布的影响存在一定的差异,植被恢复应以草地和低矮灌丛作为先锋植被,后以乔木代替灌草丛。

关键词:植被恢复;黄土丘陵沟壑区;土壤无机磷形态

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0056-07 doi:10.11654/jaes.2013.01.009

Inorganic Phosphorus Fractions Distribution in Different Vegetation Restoration in Gully Region of Loess Plateau

QI Yan-bing, CHANG Qing-rui*, TIAN Kang, LIU Meng-yun, LIU Jing, CHEN Tao

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Phosphorus (P) has generally been assumed to be one of the limiting factors for plant growth in Loess plateau. This study selects shrub, grass, forest and shrub-forest cross fields in gully region of Nanhua mountain, Haiyuan County of Loess plateau as the research objects to investigate the distribution of inorganic P affected by vegetation restoration. The results showed that the contents of soil organic matter and total nitrogen in the restoration system were higher than cultivated land except in grassland, whereas their content in forest and shrub-forest cross field were higher than in shrub and grass field. Soil pH, total potassium and total P content were similar among the restoration system. The content of total inorganic P in the research area was varied from 225.19 mg·kg⁻¹ to 322.75 mg·kg⁻¹, which accounted for 36.18% to 72.39% of the total P. Ca₁₀-P was the dominant fraction in the total inorganic P. The order of other inorganic P fractions showed as Ca₈-P>Fe-P>Al-P>Ca₂-P>O-P. The content of total inorganic P and their proportion of total P, as well as Ca₁₀-P in the restoration system were higher than that in the cultivated land, and that Ca₈-P, Al-P and Fe-P were lower than cultivated land. The content of total inorganic P and their proportion of total P were higher in shrub and grass field than that in forest and shrub-forest cross field. The relationships of all the contents of inorganic phosphorus fraction versus available P showed that there were significant positive correlations between Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P and Fe-P and available P. The bioavailability of the inorganic fractions showed as Al-P>Ca₈-P>Fe-P>Ca₂-P. Therefore, vegetation restoration had different effects on soil nutrients and soil inorganic P fractions distribution in the gully region of Loess plateau. Grassland and low shrub should be as pioneer vegetation during vegetation restoration process, and a few years later they should be replaced by the forest in the gully region of Loess plateau.

Keywords: vegetation restoration; the gully region of Loess plateau; soil inorganic phosphorus

收稿日期:2012-07-02

基金项目:国家自然科学基金(31100516, 30872073)

作者简介:齐雁冰(1976—),男,河南周口人,副教授,主要从事植被恢复及土壤质量效应研究。E-mail:ybqi@nwsuaf.edu.cn

*通信作者:常庆瑞 E-mail:changqr@nwsuaf.edu.cn

作为植物生长必需的大量营养元素之一,磷素影响着植物的生长发育状况及植物的品质^[1],因此土壤中磷素的植被有效性对植物生长具有重要的作用。磷素的生物有效性较低,大部分的磷进入土壤后成为固定形态而难以被作物吸收利用^[2-3]。受地球化学过程、生物作用和人类活动的影响,磷素在土壤存在着多种形态,各形态间也存在复杂的转换关系^[4],只有从其他形态转化为有效态后,磷素才能被作物吸收利用,不同形态磷的含量、形态及转化等直接影响磷的生物有效性^[5]。研究磷素的形态及其有效性对于评价土壤有效磷库大小、土壤磷素供应情况、了解土壤-植被系统磷素的转化及合理的磷素管理具有重要的意义。

磷在土壤中以无机态和有机态的形式存在,无机磷包括可溶性磷、吸附态磷和矿物态磷,有机磷主要是被 Fe、Ca 和 Al 等固持的磷^[6]。无机磷素的形态分级最早是由 Fisher 和 Dean 分别于 1935 和 1938 年提出来的,之后经过 Jackson 的改进形成了一套完善的分级体系,从而得到广泛应用^[7]。之后我国学者蒋柏藩又加以改进使其能够适合我国石灰性土壤无机磷素的分级^[8],从而使无机磷形态的研究在我国逐渐得到应用。

近年来,国内外很多学者对于土壤无机磷形态及其有效性方面进行了大量有意义的探索,不同土壤类型下由于受到土壤性质的长期影响,无机磷形态具有明显差异^[9];长期施肥,特别是有机肥可以明显提高土壤无机磷的含量^[10],施用腐殖质可明显提高土壤有效磷的含量^[11];水田有利于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的转化^[11]。这些研究对于揭示磷素在土壤-作物系统中的运移及转化,指导合理施肥具有重要的参考价值。植被恢复是黄土高原区退化生态重建的关键,而在不同的植被恢复模式下,土壤中养分的高低及形态变化是影响植被恢复重建成功与否的重要因素,而在以往的研究中,有关不同植被恢复模式下土壤磷素形态的变化研究甚少^[12]。本文对黄土丘陵沟壑区不同植被恢复模式下土壤中无机磷形态及其分布进行研究,以期生态脆弱区生态恢复实践提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南华山自然保护区位于宁夏回族自治区海源县城南 7.5 km 处(105°36'47"E,36°27'54"N),呈东南-西北走向,总面积约 950 km²,平均高度 2600 m,主峰

马万山海拔 2955 m。该区属北温带大陆性季风气候,受东南季风的影响和干冷的蒙古高压控制,春暖迟、夏热短、秋凉早、冬寒长。年均气温 7℃,≥10℃积温 2398℃,无霜期 149~171 d。平均降水量 400~600 mm,平均蒸发量 2136 mm。南华山属黄河中游黄土丘陵沟壑区,境内丘陵起伏,沟壑纵横,土壤类型包括黑垆土、灰钙土及黄绵土、灰褐土等,以黄绵土为主。在植被重建之前,该区植被稀疏,水土流失严重,阔叶林以白桦林为主,落叶灌木丛包括银露梅、沙棘、灰栒子、黄瑞香、高山绒线菊等,并有大面积的大针茅草原和草甸草原,自 20 世纪 90 年代开始,南华山开始大规模的植被恢复工程,经过 20 年的植被建设,大面积的人工林、草地使该区生态环境得到极大改善。

1.2 样品采集与分析

2011 年 7 月在南华山自然保护区选择一处 1999 年开始退耕还林的区域(5 km²)设置样地,为将造成土壤特性空间异质性因子最小化,样地均选择在阳坡上,坡度相近(10°~15°),选择的植被恢复模式有草地、灌木林地、乔木林地、乔灌混交林地,草地主要为冰草、针茅等,灌木林地主要包括柠条、沙棘,乔木林地主要包括桃树、杏树,乔灌混交林地包括柠条、桃树、杏树,农田作为对照,种植作物为油菜(图 1)。每种植被恢复模式下按照 S 型采集表层(0~20 cm)土样,采用 5 点混合法取样,四分法每处取 2 kg 左右土样,每种植被类型下均采集 5 个样点。样品阴干后去除根系、石块,研磨过 2 mm 筛,装袋备用。

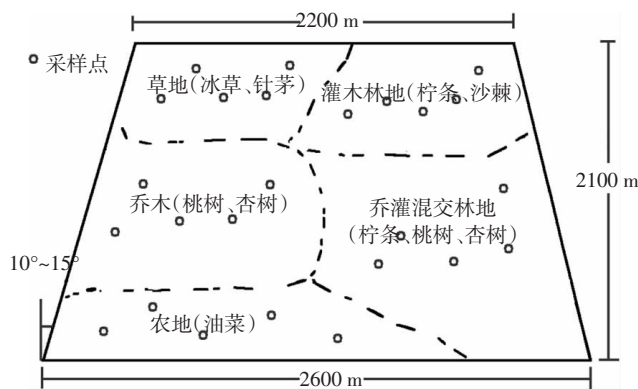


图 1 采样点示意图

Figure 1 Sketch map of sample sites

土壤有机质采用硫酸-重铬酸钾外加热法,pH 采用电位法测定(水土比 2.5:1),全氮采用凯氏定氮法,全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法,速效磷采用 Olsen 法,均按照《土壤农化分析方法》^[13]进行。

无机磷组分级采用蒋柏藩-顾益初^[14-15]无机磷形态分级体系,将土壤无机磷分为:Ca₂-P(NaHCO₃ 溶性磷)、Ca₈-P(NH₄OAc 溶性磷)、Ca₁₀-P(H₂SO₄ 溶性磷)、Fe-P(NaOH-Na₂CO₃ 溶性磷)、Al-P(NH₄F 溶性磷)和O-P(闭蓄态磷)。所有磷素组分采用磷钼蓝比色法进行测定。

方差分析(ANOVA)及相关分析(CORR)用 SPSS 13.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 对土壤理化性质的影响

由表 1 可以看出,4 种植被恢复模式下土壤 pH 在 8.33~8.48 之间,呈微碱性,无明显差异。有机质含量在 12.24~21.24 g·kg⁻¹ 之间,平均为 16.53 g·kg⁻¹,全氮、全钾和全磷的平均含量分别为 1.02、19.59、0.60 g·kg⁻¹,速效磷平均为 7.09 mg·kg⁻¹。从颗粒组成来看土壤质地为轻壤,从变异系数看,除速效磷达到 68.67%以外,其余性质变异系数均较低,空间变异较小。除草地外,不同植被恢复模式和农田相比土壤有机质明显升高,乔木林地和乔灌混交林最高,含量达 21 g·kg⁻¹ 以上,其次为灌木林地,含量为 15.07 g·kg⁻¹,草地较低。土壤全氮与土壤有机质有基本一致的趋

势。土壤全钾和全磷在不同植被恢复模式下不具有明显的差异,全钾含量在 18~20 g·kg⁻¹ 之间,全磷在 0.5~0.7 g·kg⁻¹ 之间。不同植被恢复模式之间土壤有效磷含量具有明显差异,农田有效磷含量达 15.52 mg·kg⁻¹,其他土地利用土壤速效磷含量较低,灌木林地、乔木林地和乔灌混交林地含量在 5~6 mg·kg⁻¹ 之间,草地为最低,不足 3 mg·kg⁻¹,不同植被恢复模式下土壤质地无明显差异。

2.2 不同植被恢复模式下土壤无机磷形态的分布

由表 2 可以看出,研究区无机磷总量在 225.2~322.8 mg·kg⁻¹ 之间,占全磷总量的 36.2%~72.4%。按照蒋柏藩磷素分级标准,无机磷可以分为 Ca₂-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P、Al-P、Fe-P、O-P 6 种形态,研究区土壤无机磷以 Ca₁₀-P 占绝对优势,含量在 207.3~295.5 mg·kg⁻¹ 之间,占无机磷总量的 87.6%~93.0%。其次是 Ca₈-P,含量在 6.9~14.5 mg·kg⁻¹ 之间,占无机磷总量的 2.1%~4.7%,最低的为 O-P,含量不足 2 mg·kg⁻¹,占无机磷总量仅 0.6%左右。

从土壤无机磷各形态占无机磷总量的百分比可以看出(表 2),无机磷占全磷的比例在 4 种植被恢复模式下均高于农田,Ca₁₀-P 占无机磷总量百分比在 4 种植被恢复模式下均高于农田,Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P

表 1 不同土地类型土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in different restoration system

植被类型	pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	砂粒/g·kg ⁻¹	粉粒/g·kg ⁻¹	粘粒/g·kg ⁻¹
灌木林地	8.48ab	15.07b	0.938bc	20.88ab	0.68ab	5.36b	539.46a	287.52ab	173.02ab
草地	8.41a	13.03ab	0.807a	19.02ab	0.52a	2.88a	560.51a	248.97a	190.52b
乔木林地	8.39a	21.24c	1.236c	20.00ab	0.53a	5.92b	531.52a	278.36ab	190.12b
乔灌混交林地	8.33a	21.09c	1.202c	18.15a	0.60ab	5.78b	558.65a	240.82a	200.53b
农田	8.37a	12.24a	0.904b	19.92ab	0.67ab	15.52c	578.59a	221.53a	199.88b
平均	8.40	16.53	1.02	19.59	0.60	7.09	553.75	255.44	190.85
标准差	0.06	4.35	0.19	1.04	0.08	4.87	18.61	27.20	11.11
变异系数/%	0.66	26.32	18.73	5.32	12.53	68.67	3.36	10.65	5.82

注:同列数据后标不同字母者表示在 5%水平上的差异显著性。

表 2 不同植被恢复类型下土壤无机磷形态含量

Table 2 Fractions and its proportion of inorganic phosphorus in different restoration lands

植被类型	无机磷组分/mg·kg ⁻¹							无机磷总量/ mg·kg ⁻¹	占全磷比例/%
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Ca-P	Al-P	Fe-P	O-P		
灌木	2.6(0.8)	11.2(3.5)	295.5(91.5)	309.3(95.8)	3.8(1.2)	8.6(2.7)	1.1(0.4)	322.8	72.4
草地	2.1(0.7)	9.5(3.1)	289.6(91.8)	291.1(95.5)	3.8(1.2)	8.0(2.6)	1.9(0.6)	314.8	66.6
乔木	3.1(1.1)	7.5(2.8)	258.7(92.9)	269.2(96.8)	3.3(1.2)	3.7(1.4)	1.7(0.6)	277.9	55.3
乔灌混交	3.4(1.5)	6.9(2.1)	207.3(93.0)	217.6(96.6)	3.8(1.7)	2.4(1.0)	1.5(0.6)	308.2	48.4
农田	3.6(1.2)	14.5(4.7)	270.1(87.6)	288.2(93.5)	6.5(2.1)	11.8(3.9)	1.7(0.6)	225.2	36.2

注:表中括号内数值为各无机磷组分占无机磷总量的百分比,单位为%。

低于农田, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 O-P 与农田差异不明显。

灌木林地和草地与乔木林地和乔灌混交林地相比较,前者的无机磷总量分别为 322.8、314.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占全磷比例分别为 72.4% 和 66.6%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 分别为 11.2、9.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Fe-P 分别为 8.6、8.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 明显高于后者, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 则表现为后者高于前者, 而 Al-P 和 O-P 二者差异不明显。

2.3 速效磷与无机磷形态的相关性

由表 3 不难看出, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与速效磷均呈正相关关系, 且达到极显著水平, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 与速效磷呈负相关, 但不明显。其中 Al-P 的相关系数达到 0.897, 其次为 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 相关系数为 0.867, 然后为 Fe-P , 相关系数为 0.653, 最低的为 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 相关系数为 0.565, 表明无机磷形态中植物的有效性顺序为 $\text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。不同形态无机磷之间的相关性表现为除 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 Fe-P 之间相关性不显著之外, 有效磷源 (Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$) 之间相关性均达到显著水平, 无效磷源 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P) 之间相关性不显著。

表 3 无机磷形态与土壤速效磷之间的相关性

Table 3 Relationship between inorganic fractions and available phosphorus

	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	Olsen-P
$\text{Ca}_2\text{-P}$	1.000						
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.490*	1.000					
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	-0.248	0.214	1.000				
Al-P	0.634**	0.915**	-0.001	1.000			
Fe-P	0.115	0.835**	0.381	0.658**	1.000		
O-P	0.011	-0.041	0.017	-0.118	0.156	1.000	
Olsen-P	0.565**	0.867**	-0.021	0.897**	0.653**	-0.096	1.000

注: * 和 ** 分别表示相关系数达到统计显著 ($P=0.05$) 和极显著 ($P=0.01$)。

3 讨论

3.1 植被重建对土壤理化性质的影响

植被的恢复与重建是遏制黄土高原地区土壤退化以及加速该地区退化生态系统恢复的关键。自上世纪 90 年代以来, 国内外学者对黄土高原地区植被恢复对土壤质量影响方面的关注度持续升高。合理的植被恢复措施可以改善土壤结构, 增强土壤对外界环境变化的抵抗力, 而不合理的恢复方式则会导致土壤质量下降, 加速土壤侵蚀, 导致土壤退化^[16-18]。在黄土高原地区的植被恢复研究中, 虽然在研究结果上并未完全一致, 但总体认为植被恢复后每年都有大量枯枝落

叶进入土壤, 经微生物腐解后形成较多腐殖质, 使土壤有机质增加, 并将大气中的氮素固定进入土壤, 使土壤质量不断提高^[19]。在本研究区域, 除速效磷外, 4 种植被恢复模式的养分含量均高于农田, 原因在于农田连年收获, 归还土壤的有机物质和养分较少。由于黄土高原气候环境条件和退耕还林措施对土壤理化性状和土壤生物环境变化影响特殊, 使得各种植被恢复模式土壤质量变化有一定的差异。本研究中, 乔木林地和乔灌混交林地的有机质和全氮含量明显高于灌木林地和草地, 这与张笑陪等^[20]的研究结果一致, 主要是由于枯枝落叶等凋落物含量通常表现为乔木 > 灌木 > 草地, 根系分泌物的分解, 释放养分归还土壤的数量也表现出同样的趋势所致。而全磷在不同的恢复模式上未发现明显的差异, 则是由于几种土地利用方式的土壤类型一致, 均为黄绵土, 全磷含量更多的是受土壤母质的影响, 而受植被生长及施肥影响不是很大。速效磷表现为农田显著高于其他土地利用方式, 则是由于农田耕种过程中磷肥的施入造成的。

3.2 黄土丘陵沟壑区土壤无机磷形态分配

土壤中的无机磷是植物所需营养的主要来源, 酸性土壤中磷与 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 结合, 碱性土壤中磷与 Ca^{2+} 结合, 致使他们的生物有效性明显降低^[21]。在本研究区域, 土壤无机磷总量占全磷的比例为 36.18% ~ 72.39%。有研究表明, 石灰性土壤中无机磷占全磷总量的 60% ~ 80%^[11, 12], 本研究的结果与大多数学者报道的结果基本一致。4 种植被恢复类型的无机磷总量占全磷的比例均明显高于农田, 这与张素霞等的研究结果一致, 表明植被恢复能使更多的磷转化为无机磷, 植物根系分泌的有机酸可以作为配体与金属离子如 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 形成配合物或螯合物, 从而降低阳离子的浓度而释放出无机磷^[22-23]。

为了深入理解磷素在土壤中的转化和生物有效性, 蒋柏潘和顾益初^[14]把石灰性土壤中无机磷划分为 6 种形态。Ca-P 通常被认为是土壤中呈惰性的磷组分, 生物难以利用, 主要包括自生成因或生物成因的磷灰石及碳酸钙沉淀物。Ca-P 含量取决于区域地质——地球化学背景。黄土高原地区均为分布范围较广的变质岩组成, 磷主要以磷灰石的形式存在于地质背景中, 这是北方固有的碱性土壤地球化学特点所决定的^[9]。众多研究表明, 黄土高原地区由于 CaCO_3 含量较高, 土壤无机磷含量以 Ca-P 为主^[12], 其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ ^[11], 本研究也证实了这一点。在研究区 Ca-P 占无机磷总量的 93% 以上, 其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占到近 90%, 远高

于 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 这与张素霞等^[12]的研究结果一致。 Fe-P 和 Al-P 指被 Al 、 Fe 、 Mn 的氧化物及其水合物所结合的磷酸盐, 是土壤中主要的活性磷组分, 对土壤-植物系统磷的循环起着主要的作用。但他们易受土壤环境的影响, 含量在不同区域差异很大, 在南方水稻土及红壤区, Fe-P 占到无机磷总量的 30%~40%, Al-P 占 5%~10%^[24-26], 而在北方地区, 受土壤含水量、 pH 等的影响, 其含量则明显降低^[27-28], 在本研究区域, Fe-P 占无机磷总量比例不足 3%, Al-P 不足 2%, 这与众多学者报道的结果一致。 O-P 则是被氧化铁胶膜包被的磷酸盐, 在除去外层铁质包膜前, 很难发挥其效用, 被视为闭蓄态磷。其含量则明显受到土壤中氧化铁铝含量的影响, 一般情况下北方地区磷有效性的释放主要受 Ca^{2+} 的影响, 而南方地区则主要受铁铝氧化物的影响。因此, 在南方地区, O-P 是无机磷的主要形态^[26], 而在北方地区由于铁铝氧化物含量较低, O-P 占无机磷总量比例往往低于 5%, 而在本研究 O-P 所占比例仅在 1%~2% 之间。

3.3 不同植被恢复模式下土壤无机磷形态及其有效性

石灰性土壤中无机磷形态的分布还受到植被类型的影响。不同植被类型下土壤中各形态磷的差异主要有两方面的原因: 一是不同植被类型, 它们的根系形态不同, 导致对土壤中各形态磷的利用机制不同, 引起了利用能力和形态的差异^[29]。如草地的根系发达, 可促进土壤中稳性、高稳性有机磷的转化^[30]。本研究中草地中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 含量及无机磷总量和占全磷的比例明显高于乔木也证明了这一点。二是作物根系分泌物和不同作物根际微生物群落的差异所引起的。植物根系分泌的有机酸可以作为配体与金属离子如 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 形成配合物或螯合物, 从而降低阳离子的浓度而释放出无机磷^[21-22]。有研究报道, 柠条作为豆科灌木, 根系发达, 根部大量的根瘤菌, 可以固定空气中的游离态氮, 并且存在大量根系分泌物, 根系分泌物主要为小分子的有机酸^[1], 从而导致根际 pH 下降, 根际土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 得到活化, 转变为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 使磷的有效性提高。本研究的结果也表明, 以柠条为主的灌木林地 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 及无机磷总量明显高于其他植被恢复类型。乔木林地由于树高、枝繁、根深, 生物量明显高于灌木和草地, 消耗的有效性磷较多, 从而使无机磷总量和比例低于灌木和草地, 这与大多数学者的研究结果一致。农田虽然长期施用速效性磷肥, 但由于其他速效养分如氮肥的施入, 使得农作物生长消耗更多的速效性磷素, 从而使无机磷总量

和占全磷的比例明显降低, 这与其他学者的研究结果一致。

不同形态磷酸盐的有效性差异较大, 土壤速效磷与植物吸磷相关性极显著, 通过分析各形态磷与速效磷的相关性可说明其有效性。一般认为, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 易被作物吸收, 是土壤中的第一有效磷; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 也有相当的有效性, 可作为作物的第二有效磷源; $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的有效性很低, 是作物的潜在磷源^[31]。郭智芬等采用同位素标记法在石灰性土壤不同形态无机磷上的分析表明, 不同形态无机磷有效性顺序为 Al-P 、 Fe-P > $\text{Ca}_2\text{-P}$ > $\text{Ca}_8\text{-P}$, 对植物磷营养贡献的顺序为 Al-P > $\text{Ca}_8\text{-P}$ > $\text{Ca}_2\text{-P}$ ^[32]。有研究认为土壤无机磷组分中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 对植物是高度有效的^[33], $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 也有相当高的有效性, 而 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在短时间内不能被作物吸收利用, 通常把 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 看作是植物的潜在磷源^[32]。总体而言, 无机磷形态中 Al-P 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与土壤速效磷的相关性最高, 而 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与速效磷的相关性明显较低, 本研究的结果也是如此。

4 结论

黄土高原区不同植被恢复模式对土壤养分和无机磷分布的影响存在一定的差异, 4 种植被恢复模式下土壤有机质、全氮含量及无机磷总量均有不同程度的增加, 乔木林地和乔灌混交林地土壤养分的增加量高于灌木林地和草地, 而灌木林地和草地的土壤无机磷总量增加量高于乔木林地和乔灌混交林地。因此, 黄土高原植被建设过程中, 应以草本和低矮灌木植物作为水土保持与生态环境建设的先锋植被, 待其发展到一定阶段, 土壤质量得到明显改善时, 用乔木林地代替灌草丛, 使人工植被建设符合自然植被演替规律, 更有效地提高其生态效益。

参考文献:

- [1] 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.
YANG Hui, CAO Jian-hua, SUN Lei, et al. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types of Karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 135-140.
- [2] 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 及各种形态无机磷的动态变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360-364.
LIU Jian-ling, ZHANG Fu-suo. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II: Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000,

- 11(3):360-364.
- [3] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, 84:133-144.
- [4] Sabry M S, Christos D T, Stamatis S. Inorganic phosphorus forms in some entisols and aridisols of Egypt[J]. *Geoderma*, 2007, 142:217-225.
- [5] Wang J, Liu W Z, Mu H F, et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year super phosphate application[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3):304-310.
- [6] Pavinato P S, Merlin A, Rosolem C A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105:149-155.
- [7] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7):1775-1782.
- ZHANG Lin, WU Ning, WU Yan, et al. Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7):1775-1782.
- [8] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 1992, 29(1):80-85.
- SHEN Ren-fang, JIANG Bo-pan. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1):80-85.
- [9] Selles F, Kochhann R A, Denardin J E, et al. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 44:23-34.
- [10] 江晶, 张仁陟, 索东让. 长期施肥对河西灌漠土无机磷形态的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4):783-787.
- JIANG Jing, ZHANG Ren-zhi, SUO Dong-rang. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus forms in irrigated desert soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4):783-787.
- [11] 王斌, 马兴旺, 许咏梅, 等. 腐植酸对灰漠土棉田土壤无机磷形态的影响[J]. 新疆农业科学, 2007(3):70-75.
- WANG Bin, MA Xing-wang, XU Yong-mei, et al. Effects of humic acids on inorganic phosphorus forms in gray desert soil and soil of cotton field[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007(3):70-75.
- [12] 张素霞, 吕家珑, 杨瑜琪, 等. 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.
- ZHANG Su-xia, LÜ Jia-long, YANG Yu-qi, et al. Study on inorganic phosphorus fractionation on sloping land with different vegetation in the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1):29-32.
- [13] 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, 1999.
- LU Ru-kun. Methods of agricultural chemical analysis in soil[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [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):101-102.
- GU Yi-chu, JIANG Bo-pan. Measure methods for inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Soils*, 1990, 22(2):101-102.
- [15] 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.
- JIANG Bo-pan, GU Yi-chu. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3):58-66.
- [16] 胡婵娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 等. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1):45-50.
- HU Chan-juan, FU Bo-jie, JIN Tian-tian, et al. Effects of vegetation restoration on soil microbial biomass carbon and nitrogen in hilly areas of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1):45-50.
- [17] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):218-226.
- LIU Meng-yun, CHANG Qing-rui, QI Yan-bing, et al. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2):218-226.
- [18] 从怀军, 成毅, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复措施对土壤养分和微生物量C、N、P的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):217-211.
- CONG Huai-jun, CHENG Yi, AN Shao-shan, et al. Changes of soil nutrient and soil microbial biomass C, N and P in different plant rehabilitation on the loess hilly area of Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4):217-211.
- [19] 王国梁, 刘国彬, 侯喜录. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究[J]. 山地学报, 2002, 20(2):182-187.
- WANG Guo-liang, LIU Guo-bin, HOU Xi-lu. The research of species diversity after the vegetation restoration in Loess hilly region[J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(2):182-187.
- [20] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 等. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6):64-69.
- ZHANG Xiao-pei, YANG Gai-he, REN Guang-xin, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in the gully region of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(6):64-69.
- [21] 苗淑杰, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同作物对黑土中磷素形态及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(1):105-109.
- MIAO Shu-jie, HAN Xiao-zeng, QIAO Yun-fa, et al. Effects of crop species on phosphorus forms and utilization in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1):105-109.
- [22] Garder W K, Barber D A, Parbery D C. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. III. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/root interface is enhanced[J]. *Plant & Soil*, 1983, 70:107-114.
- [23] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对不同磷源条件下土壤无机磷形态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4):474-478.
- ZHANG Ai-qun, HE Li-yuan, ZHAO Hui-e, et al. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources[J]. *Chinese Journal of Applied Biology*, 2009, 15(4):474-478.
- [24] 冯跃华, 张杨珠, 黄运湘. 不同稻作制、有机肥用量及地下水深度对红壤性水稻土无机磷形态的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10):3551-3558.

- FENG Yue-hua, ZHANG Yang-zhu, HUANG Yun-xiang. Effects of rice-based cropping system, application rate of organic manure and ground water level on inorganic phosphorus forms in paddy soil derived from red earth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10):3551-3558.
- [25] 赵海涛, 封克, 汪晓丽, 等. 连续施磷条件下渗育性水稻土无机磷土层分布及移动特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1):33-38.
- ZHAO Hai-tao, FENG Ke, WANG Xiao-li, et al. Distribution and movability of inorganic phosphorous on the percogenic paddy soil under continuously phosphorous fertilizer application[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1):33-38.
- [26] 林德喜, 范晓晖, 胡锋, 等. 长期施肥后简育湿润均腐土中磷素形态特征的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4):605-610.
- LIN De-xi, FAN Xiao-hui, HU Feng, et al. Forms of phosphorus in hapli-udic isohumosols soil after long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4):605-610.
- [27] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 等. 黑土无机磷形态及其有效性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3):85-89.
- WANG Yan-ling, WANG Jie, ZHAO Lan-po, et al. Study on forms of inorganic phosphates and their usefulness in black soils in Jilin Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3):85-89.
- [28] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究[J]. 土壤通报, 1994, 25(6):259-260.
- LI Xue-min, ZHANG Jin-miao. Distribution of soil phosphate in Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6):259-260.
- [29] Yonathan D R, Rosa R, Juan L R, et al. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol[J]. *Geoderma*, 2007, 139:388-396.
- [30] 张林, 吴彦, 吴宁, 等. 林线附近主要植被类型下土壤非生长期磷素形态[J]. 生态学报, 2010, 30(13):3457-3464.
- ZHANG Lin, WU Yan, WU Ning, et al. The soil phosphorus forms under different vegetation types near timberline during non-growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13):3457-3464.
- [31] Wong J W C, Chan C W Y, Cheung K G. Nitrogen and phosphorus leaching from fertilizer applied on golf course: Lysimeter study[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1998, 107:335-345.
- [32] 郭知芬, 涂书新, 李晓华, 等. 石灰性土壤不同形态无机磷对作物磷营养的贡献[J]. 中国农业科学, 1997, 30(1):26-32.
- GUO Zhi-fen, TU Shu-xin, LI Xiao-hua, et al. Contribution of soil inorganic phosphorus on plant nutrition in lime soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(1):26-32.
- [33] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- SHEN Shan-min. Soil fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1997.