

网络出版时间:2012-06-08 16:03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120608.1603.023.html>

# 黄土丘陵区土壤磷有效性与植物适应性研究

王恒威<sup>1a,2</sup>, 许明祥<sup>1a,2</sup>, 王爱国<sup>1b,2</sup>, 马昕昕<sup>1a,2</sup>

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 林学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** 【目的】研究黄土丘陵区不同植被类型下土壤磷素有效性、植物叶片磷含量及土壤-植物磷素营养关系, 以期揭示植被恢复对土壤磷素的影响, 明确植物群落对土壤磷素环境的适应性。【方法】以农地为对照, 采集了黄土丘陵区 125 块样地中不同植物(包括草本植物茵陈蒿、长芒草、铁杆蒿及人工林柠条、沙棘、刺槐)的叶片及其生长的土地表层(0~20 cm)的土壤样品, 测定了土壤全磷、有效磷、pH 和叶片磷含量, 分析了土壤与植物磷素营养特征以及土壤有效磷与叶片磷含量、土壤 pH 之间的相关性。【结果】研究区土壤有效磷含量极低(1.54 mg/kg), 全磷含量较高。不同植被类型下土壤全磷含量差异不显著, 但土壤有效磷含量差异显著, 土壤有效磷含量由大到小依次为农地>茵陈蒿>沙棘、刺槐、柠条>长芒草、铁杆蒿, 土壤 pH 在不同植被类型样地间差异不明显; 不同植被类型叶片磷平均含量为 1.43 mg/g, 其中茵陈蒿和沙棘叶片磷含量较高, 与其他植物差异显著 ( $P<0.05$ ); 不同植被类型(除沙棘外)样地土壤有效磷与叶片磷含量间相关性不显著。【结论】黄土丘陵区土壤有效磷含量和植物叶片磷含量均低于全球平均水平, 且叶片磷含量与土壤有效磷含量之间无显著相关性; 随着植被的恢复, 土壤有效磷占全磷含量的比例升高, 土壤磷素营养状况逐步得到改善, 且人工林植被对土壤有效磷的改善作用优于退耕自然恢复草本植被; 不同种类植物叶片磷含量不会随着土壤有效磷含量的变化发生较大的变动, 人工林植被对土壤有效磷的需求高于退耕自然恢复的草本植被, 在黄土丘陵区人工加速植被恢复过程中, 可对人工林地适当增施磷肥。

**[关键词]** 黄土丘陵区; 土壤有效磷含量; 叶片磷含量; 植物适应性

**[中图分类号]** Q948.1; S158.3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2012)07-0149-07

## Study on availability of soil phosphorus and plants adaptability in the Loess Hilly Region

WANG Heng-wei<sup>1a,2</sup>, XU Ming-xiang<sup>1a,2</sup>, WANG Ai-guo<sup>1b,2</sup>, MA Xin-xin<sup>1a,2</sup>

(1 a College of Natural Resource and Environment, b College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】The paper studied the characteristics of soil available phosphorus and leaf phosphorus of typical vegetation communities in loess hilly region. The objective was to explore the effect of vegetation restoration on soil phosphorus availability, and to understand the suitability of vegetation communities to soil phosphorus condition. 【Method】Different plants of the 125 plots in Zhifanggou watershed of loess hilly region were selected, including *Artemisia capillaris*, *Stipa bungeana*, *Artemisia gmelinii*, *Caragana intermedia*, *Hippophae rhamnoides*, *Robinia pseudocacia*, taking the crop land as the control. Leaf

\* [收稿日期] 2011-12-26

[基金项目] 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目; 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050504); 国家自然科学基金项目(40971174, 41171422)

[作者简介] 王恒威(1985-), 男, 河北邢台人, 在读硕士, 主要从事土壤质量演变与调控研究。E-mail: whengwei@126.com

[通信作者] 许明祥(1972-), 男, 陕西吴起人, 副研究员, 博士, 主要从事侵蚀环境土壤质量演变及土壤-植被互动效应研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

and surface soil (0—20 cm) samples were collected, the soil total P, available P, pH and leaf P content were determined. The characteristics of soil and plant P nutrient, the relativity among soil P, soil pH and leaf P in different vegetation communities were analyzed. 【Result】 The results showed a great shortage of soil available P content (1.54 mg/kg) and a relatively high content of soil total P in the loess hilly region. Significant difference was observed in soil available P content and soil pH among different plants, which was not observed in soil total P content. The soil available P in proper order was crop land > *Artemisia capillaris* > *Hippophae rhamnoides*, *Robinia pseudocacia*, *Caragana intermedia* > *Stipa bungeana*, *Artemisia gmelinii*. The average leaf P content was 1.43 mg/g and the leaf P content of *Artemisia capillaris*, *Hippophae rhamnoides* was significantly higher than other plants ( $P < 0.05$ ). There was no obvious correlation among soil available P content, soil pH and leaf P content in different plants (except *Hippophae rhamnoides*). 【Conclusion】 Leaf P content and soil available P content in studied area were lower than the average value in the world. Non-significant correlation was found between P content of soil and plant leaf. The ratio of soil available P content in soil total P content increased with vegetation succession progress, suggesting that soil P status was also enhanced, artificial forest communities appeared to be higher demand of soil available P content than herbage communities of natural restoration. Plants P content of specific species did not change as much as soil P. Therefore, the vegetation restoration progress could be accelerated through application of P fertilizer addition in this area. Thus, the plants adaptive mechanism under low P stress should be attached more attention in future research.

**Key words:** loess hilly region; soil available P content; leaf P content; plant adaptability

磷素作为植物必需的营养元素,对植物生长发育起着重要作用,同时其也是生态系统的常见限制因子和土壤的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。但是土壤中的磷素并不能全部被植物吸收利用,大部分磷素以缓效态或迟效态存在,只有土壤有效磷是植物可以直接吸收利用的,其更能反映土壤的供磷状况<sup>[3]</sup>。在黄土丘陵区,长期的水土流失造成土壤质量严重退化,加之该区石灰性土壤的影响,使得土壤磷的有效性极低,其可能已成为该区植被恢复的限制性因子之一。植物体内的磷素大部分是通过根系从土壤中获得,而土壤中的磷素绝大部分是植物不能吸收利用的,土壤磷素与植物体内磷素间存在何种关系,目前还没有统一的结论<sup>[4]</sup>。

土壤磷的有效性影响着森林生态系统微生物的活动,进而可能改变生态系统植物的演替动态和物种组成<sup>[5]</sup>。对于黄土丘陵区有效磷含量极低的侵蚀退化土壤,磷素可能是“最小养分”而限制着植被的生长发育及恢复进程。目前有关土壤磷含量及其有效性的研究多针对农作物,而关于林草植被对土壤磷素有何需求、如何响应土壤磷素变化等问题尚不清楚。因此,本研究探索了黄土丘陵区不同植被类型下土壤磷素特征、土壤磷素有效性以及土壤-植物磷素营养关系,以期揭示植被恢复对土壤磷素的影响,明确土壤磷环境对植物的影响,为黄土丘陵区植

被恢复重建提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究主要在位于陕西省安塞县的纸坊沟小流域(109° 13' 46" ~ 109° 16' 03" E, 36° 42' 42" ~ 36° 46' 28" N)进行。纸坊沟小流域属黄土丘陵沟壑区,流域面积 8.27 km<sup>2</sup>,海拔 1 010~1 431 m,年平均气温 8.8 °C,年降水量 549 mm,日照时间 2 300~2 400 h,无霜期 160 d 左右,在气候区划上属暖温带半干旱气候,在植被分区上属于暖温带森林草原带,土壤类型为黄绵土。流域内天然植被破坏殆尽,从 1973 年开始进行生态环境综合治理,植被逐步得到恢复,目前乔木主要以刺槐(*Robinia pseudocacia*, RP)为主,灌丛主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*, HR)、柠条(*Caragana intermedia*, CI)等,草本主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*, AG)、长芒草(*Stipa bungeana*, SB)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*, BI)、狗尾草(*Setaria viridis*, SV)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*, AC)等。

### 1.2 研究方法

于 2010-08 植物生长旺盛期,在纸坊沟小流域选择处于稳定生长阶段的人工植被和自然植被样地,各样地均由农地退耕发展而来。随机选择不同

立地条件及植被恢复年限的样地,以反映不同植被类型的总体性和代表性(表 1)。其中草本植物包括铁杆蒿、长芒草、茵陈蒿。由于该区自然恢复、演替到灌木和乔木阶段的植被较少且面积较小,因而选择人工林中的柠条、沙棘、刺槐作为研究对象,同时以农地为对照。共调查样地 125 个,每个样地按照“S”取样法用土钻采集表层 0~20 cm 土壤,每 5 钻混合为 1 个土样;同时每个样地选择 5 个植株,每个植株采集 5~10 片成熟、完整的叶片,草本植株叶片采集于中部向阳部位,人工林中的灌木、乔木植株叶片采集于冠层中部向阳部位。土壤样品采集后风干分别过孔径为 0.25,1 mm 筛备用;植物叶片在 70

℃条件下烘干后粉碎,然后过孔径 0.1 mm 筛备用。

### 1.3 测定项目与方法

土壤 pH 采用电极法测定(水(mL)土(g)比 2.5:1),土壤有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,土壤全磷含量采用氢氧化钠碱溶-钼锑抗比色法测定,叶片磷含量采用双氧水-硫酸消煮-钼锑抗比色法测定<sup>[6]</sup>。

### 1.4 数据处理

数据采用软件 SPSS 18.0 中的 ANOVA 进行方差分析,选择最小差数法(LSD)进行显著性检验,用 Pearson 相关分析指标之间的相关性。

表 1 样地的基本概况

Table 1 General condition of sampling plots

植被群落 Plant communities	恢复方式 Restoration measures	样地数 Sample plots	海拔/m Altitude	坡度/ (°) Gradient	坡位 Position	坡向 Aspect	恢复时间/年 Restoration years	主要植物种类 Dominant plant species
沙棘 HR	人工林 Artificial forest	20	1 117~1 386	5~37	U7,M4,L9	U11,SA7, SU2	23~30	沙棘 HR
柠条 CI	人工林 Artificial forest	20	1 171~1 263	2~27	M15,U4,L1	U7,SA9, SU4	20~30	柠条 CI
铁杆蒿 AG	退耕自然恢复 Natural restoration	20	1 119~1 259	3~38	M9,U6,L5	A4,U2, SA8,SU6	8~25	铁杆蒿、芨蒿、达乌里胡枝子 AG, <i>Artemisia giralaui</i> , <i>Lespedeza davurica</i>
刺槐 RP	人工林 Artificial forest	20	1 084~1 234	5~33	U10,M3,L7	A3,U4, SA4,SU9	18~40	刺槐 RP
长芒草 SB	退耕自然恢复 Natural restoration	20	1 110~1 383	3~23	U11,M3,L6	A3,U6, SA5,SU6	7~18	长芒草、茵陈蒿、狗尾草 SB, AC, SV
茵陈蒿 AC	退耕自然恢复 Natural restoration	5	1 101~1 189	20~32	U2,L3	SA5	2~5	茵陈蒿 AC
农地 Cropland	—	20	1 131~1 369	5~30	U6,M12,L2	A5,U5, SA8,SU2	—	玉米、大豆、马铃薯 <i>Zea mays</i> , <i>Glycine max</i> , <i>Solanum tuberosum</i>

注:坡位中的 U、M、L 分别表示上、中、下坡位;坡向中 A、U、SA、SU 分别表示阳坡、阴坡、半阳坡及半阴坡;坡位、坡向中字母后的数字代表样点数。

Note: U, M, L means upper, middle, and lower position; A, U, SA, SU in the column of aspect means adret, udbac, semi-adret, and semi-udbac; The numbers in the description of position, aspect is the number of samples.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型下土壤全磷、有效磷含量的变化

表 2 显示,不同植被类型下土壤全磷含量变化不大,为 577.60~616.38 mg/kg,其中农地土壤全磷含量最高(616.38 mg/kg),各样地土壤全磷含量间无显著差异。研究区不同植被类型下土壤全磷的变异系数较小,说明黄土丘陵区土壤全磷含量主要受黄土母质影响。不同乔灌草植被下土壤有效磷含量平均为 1.26 mg/kg,约是该区农地有效磷含量(3.67 mg/kg)的 1/3,按照黄土高原地区土壤有效磷水平的分级标准<sup>[7]</sup>,可知研究样地土壤有效磷含量均处极低水平(<3 mg/kg)。

表 2 还显示,不同植被类型下土壤有效磷含量

间存在显著差异,土壤有效磷含量由小到大依次为铁杆蒿、长芒草<柠条、刺槐、沙棘<茵陈蒿<农地。由于受农地土壤有效磷含量较高的影响,处于退耕初期阶段的茵陈蒿样地的土壤有效磷含量也较高(2.21 mg/kg),但随着植被的恢复,草本植被铁杆蒿和长芒草样地土壤有效磷含量反而显著低于农地( $P<0.05$ ),降幅达 60%~70%;柠条、沙棘、刺槐样地的土壤有效磷含量相当,均高于铁杆蒿、长芒草样地,但明显低于茵陈蒿样地。总体而言,农地土壤有效磷含量最高,其次为林地,草地有效磷含量较低(茵陈蒿除外)。

对于不同植被类型而言,土壤全磷含量无显著差异,而有效磷含量差异显著,说明不同植物对磷的活化、利用存在差异,这可由有效磷占全磷含量的比

例(有效磷/全磷)得到印证。

表 2 不同植被类型下土壤的全磷、有效磷含量

Table 2 Soil total P content and available P content under different vegetation types

植被类型 Vegetation types	土壤全磷 Total P		土壤有效磷 Available P	
	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Mean	变异系数/% CV	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Mean	变异系数/% CV
沙棘 HR	577.60±59.00	10.21	1.48±0.77 bc	51.83
柠条 CI	593.39±41.59	7.01	1.21±0.58 cd	48.40
铁杆蒿 AG	584.38±61.11	10.46	0.64±0.21 e	33.31
刺槐 RP	581.08±28.08	4.83	1.21±0.40 cd	33.27
长芒草 SB	595.66±60.13	10.09	0.89±0.23 de	25.93
茵陈蒿 AC	579.66±19.03	3.28	2.21±0.75 b	33.86
农地 Crop land	616.38±22.19	3.60	3.67±1.56 a	42.60
平均值 Average	591.71±44.67	7.55	1.54±1.25	80.90

注:同列数据后标不同字母者表示差异达到  $P=5\%$  显著水平,下表同。

Note: Different letters showed in the same row mean significant at  $P=5\%$  level, the same below.

表 3 显示,不同植被下土壤有效磷占土壤全磷含量的比例差异达到显著水平( $P<0.05$ ),由小到大依次为铁杆蒿<长芒草<刺槐、柠条<沙棘<茵陈蒿<农地,其中人工林植被沙棘、柠条、刺槐样地

土壤有效磷占全磷含量的比例明显大于退耕自然恢复植被铁杆蒿和长芒草,表明随着植被的恢复土壤磷素营养状况得到改善,且人工林植被对土壤有效磷的改善作用基本优于退耕自然恢复草本植被。

表 3 不同植被类型下土壤有效磷占全磷含量的比例

Table 3 Ratio of soil available P content in total P content under different vegetations types %

植被类型 Vegetation types	沙棘 HR	柠条 CI	铁杆蒿 AG	刺槐 RP	长芒草 SB	茵陈蒿 AC	农地 Crop land
有效磷/全磷 Soil available P/total P	0.31±0.13 bc	0.22±0.12 cd	0.11±0.05 d	0.21±0.07 cd	0.15±0.05 d	0.38±0.12 b	0.60±0.26 a

2.2 不同植被类型叶片磷含量的变化

研究区不同植被类型叶片磷的平均含量为1.43 mg/g(表 4)。不同植物叶片磷含量间存在较大差异,处于退耕初期阶段的茵陈蒿叶片磷含量最高

(3.08 mg/g),与其他植物差异达到显著水平( $P<0.05$ ),其次为沙棘;茵陈蒿和沙棘叶片磷含量均显著高于柠条、铁杆蒿和刺槐;长芒草叶片磷含量最低(0.69 mg/g),与其他植物差异显著( $P<0.05$ )。

表 4 不同植被类型叶片的磷含量

Table 4 Leaf P content of different vegetation types

指标 Index	沙棘 HR	柠条 CI	铁杆蒿 AG	刺槐 RP	长芒草 SB	茵陈蒿 AC	平均值 Average
磷含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) P content	2.14±0.90 b	1.22±0.13 cd	1.48±0.27 c	1.18±0.23 d	0.69±0.08 e	3.08±0.14 a	1.43±0.73
变异系数/% CV	42.03	11.00	18.22	19.83	11.75	4.65	51.03

2.3 不同植被类型下土壤 pH 的变化

由表 5 可以看出,6 种植被样地和农地土壤均呈弱碱性,pH 为 8.67~8.87。其中铁杆蒿和茵陈蒿的土壤 pH 均较高,分别为 8.85 和 8.87;其次为

长芒草、沙棘、柠条、刺槐,以上 6 种植被样地的土壤 pH 均显著高于农地。总体而言,不同植被类型下土壤 pH 大小顺序为草地>林地>农地。

表 5 不同植被类型下土壤的 pH 值

Table 5 Soil pH value under different vegetation types

指标 Index	沙棘 HR	柠条 CI	铁杆蒿 AG	刺槐 RP	长芒草 SB	茵陈蒿 AC	农地 Crop land
pH	8.75±0.09 b	8.77±0.06 b	8.85±0.08 a	8.77±0.08 b	8.77±0.06 b	8.87±0.06 a	8.67±0.13 c
变异系数/% CV	8.51	5.67	7.67	8.49	5.86	6.18	12.62

2.4 土壤有效磷含量与土壤 pH 和叶片磷含量的相关关系

表 6 显示,就不同植物而言,茵陈蒿、长芒草、铁杆蒿样地土壤有效磷与 pH 的相关性均不显著,而

沙棘、柠条和刺槐样地土壤有效磷与 pH 呈现极显著负相关关系( $P<0.01$ )。沙棘土壤有效磷与叶片磷含量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),其余植物样地土壤有效磷与叶片磷含量之间无显著相关性。

表 6 不同植被类型下土壤有效磷与土壤 pH、叶片磷含量的相关性

Table 6 Correlations between soil pH value, leaf P content and soil available P content under different vegetation types

指标 Index	茵陈蒿 AC	长芒草 SB	铁杆蒿 AG	沙棘 HR	柠条 CI	刺槐 RP
土壤 pH	0.310	-0.374	0.134	-0.722**	-0.519**	-0.606**
叶片磷 Leaf P	0.071	0.213	0.286	0.703**	-0.291	0.001

注:“\*\*”表示相关性达到 1% 水平。

Note:“\*\*” means correlation at 1% level.

就各植物群落总体而言,土壤有效磷与植物叶片磷(铁杆蒿除外)之间、土壤 pH 与土壤有效磷(茵陈蒿除外)之间呈极显著的相关关系,其中人工林植

被沙棘、柠条、刺槐样地的土壤有效磷含量均高于退耕自然恢复的草本植被样地(图 1,2)。

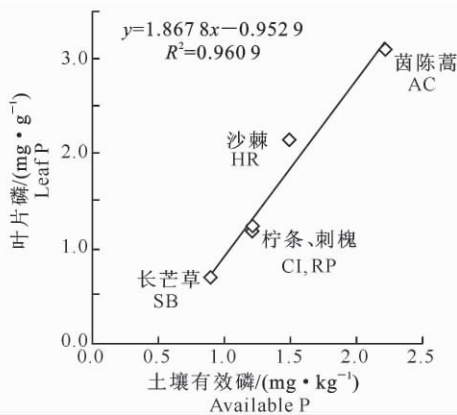


图 1 不同植被类型样地土壤有效磷与叶片磷含量间的相关性

Fig. 1 Correlations between soil available P content and leaf P of different vegetation types

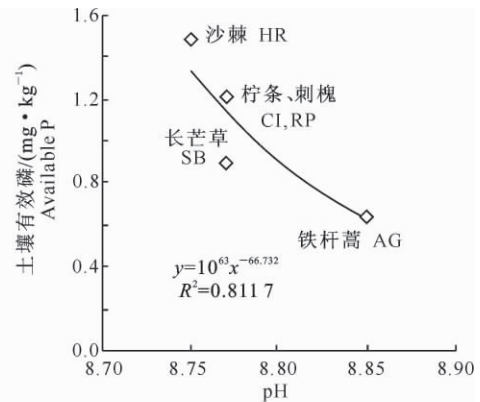


图 2 不同植被类型样地土壤 pH 与土壤有效磷含量的相关性

Fig. 2 Correlations between soil pH and soil available P content of different vegetation types

### 3 讨论

#### 3.1 黄土丘陵区土壤磷的有效性

目前对黄土丘陵区土壤磷素的研究主要集中于土壤层次、土地利用和恢复年限上。已有结果表明,随着撂荒年限的增加,土壤有效磷含量的增加幅度较小<sup>[8-9]</sup>,甚至在恢复初期还有所下降<sup>[10]</sup>;对于人工乔木林而言,随着生长年限的增加,有效磷含量逐渐增加,全磷的含量则保持相对稳定<sup>[11]</sup>,但是对于不同植被类型土壤磷素状况及不同植被对土壤磷素的适应性还缺乏系统研究。

本研究中,黄土丘陵区土壤全磷含量较高,但土壤有效磷占全磷含量的比例很低,平均为 0.3%,远低于红壤区(0.58%)和黑土区土壤(0.71%)<sup>[12]</sup>,这可能与土壤性质不同有关。黄土丘陵区土壤为石灰性土壤,存在大量的交换性钙和碳酸钙,它们对土壤磷的沉淀、吸附和固定作用降低了有效磷的含量,限制了植物对磷素的吸收和利用<sup>[13-14]</sup>。本研究中,农地中土壤有效磷占全磷含量的比例最高,茵陈蒿次之。此外,从土地利用方式来看,草本(铁杆蒿、长芒

草)植被下土壤有效磷占全磷含量的比例都小于人工林地(沙棘、柠条、刺槐)。随着植被的恢复,土壤磷的有效性呈增加趋势,人工林对土壤有效磷的需求高于天然草地,这也是植被对土壤磷素营养长期适应的结果。

#### 3.2 土壤有效磷与植物叶片磷的相关性及植物对土壤磷素营养的适应性

本研究结果显示,黄土丘陵区土壤有效磷含量平均值为 1.54 mg/kg,低于全国土壤普查的 3.83 mg/kg,更低于全球平均水平 7.65 mg/kg<sup>[12]</sup>,处于极低水平。然而该地区全磷含量却相对较高<sup>[15-16]</sup>,且在不同植被类型间变化不明显。本研究中,不同植被类型叶片磷含量的平均值为 1.43 mg/g,低于全球水平 1.77 mg/g<sup>[17]</sup>。可知黄土丘陵区植物叶片的磷含量也处于较低水平。但在长期低磷环境下,植物逐渐产生了一套适应机制,植物可以通过改变根的形态及分泌有机酸、磷酸酶类来提高根际土壤磷的有效性<sup>[18-19]</sup>,或通过提高磷在植物体内的吸收利用效率来适应低磷胁迫<sup>[20]</sup>。

前人通过对内蒙古草原土壤磷素与植物叶片磷

素的研究发现,植物叶片磷含量与土壤全磷和有效磷含量间没有直接关系,但是土壤有效磷含量与植物叶片磷含量的相关性高于土壤全磷,但也只能解释叶片磷含量变异的 10%<sup>[21]</sup>。故对于黄土丘陵区土壤有效磷含量低是否会导致叶片磷含量低,目前还没有定论。本研究中,除了农地外,不同植被类型下土壤有效磷含量顺序为茵陈蒿>沙棘、柠条、刺槐>长芒草、铁杆蒿,而叶片磷含量顺序为茵陈蒿>沙棘>铁杆蒿>柠条>刺槐>长芒草,表明不同植被类型下土壤有效磷和叶片磷含量变化无明显规律性,这与相关性分析结果中“植物样地土壤有效磷与叶片磷含量之间无显著相关性”的结论一致。处于退耕初期阶段的茵陈蒿,无论是其样地土壤有效磷含量还是叶片磷含量均高于其他植被,这是因为茵陈蒿属于退耕初期的先锋植被,退耕前农地由于肥料的投入,肥效犹在,故导致茵陈蒿样地土壤有效磷含量及叶片磷含量均较高,这可能是因为在土壤有效磷含量较高的条件下茵陈蒿对土壤磷素存在奢侈吸收所致<sup>[22]</sup>;处于恢复中期的铁杆蒿样地土壤有效磷含量较低而叶片磷含量却较高,可能是由于铁杆蒿存在一套高效的磷吸收利用机制,使其成为耐旱、耐贫瘠的优良植物,但是目前对于茵陈蒿、铁杆蒿的研究主要集中在药理方面,对磷的吸收和利用机理还缺乏深入的研究。

本研究结果显示,就不同植物种类而言,土壤有效磷与植物叶片磷含量之间无显著相关性(沙棘除外),但就不同植物群落整体而言,土壤有效磷与植物叶片磷含量之间却有显著相关性(铁杆蒿除外)。这表明就某种植物而言,比如长芒草,其叶片磷含量的高低并非受控于土壤磷的有效性,可能更多地由植物磷素营养基因型决定。据此判断,沙棘、柠条和刺槐属于对磷素营养需求较高的植被类型。本研究中,长芒草群落土壤有效磷与植物叶片磷含量整体处于较低水平,其次是柠条、刺槐和沙棘群落,而茵陈蒿群落土壤有效磷与植物叶片磷含量整体处于较高水平。这实质上也是土壤与植物营养长期影响与适应的必然结果。不同植被类型对土壤磷素营养状况具有不同的影响,沙棘、柠条、刺槐作为退耕还林的主要植物种,对土壤磷素营养有很大的改善作用,这 3 种植物样地的土壤有效磷含量高于草本植物铁杆蒿和长芒草,而且其土壤有效磷含量与土壤 pH 呈极显著的相关性。沙棘样地土壤有效磷含量较高,其叶片磷含量也较高,表明它对土壤磷素环境有着较强的敏感性,对土壤磷素存在一种弹性吸收机

制;而柠条和刺槐土壤有效磷与叶片磷含量变化均无明显的一致性,表明土壤磷素对其植物体磷含量影响较小,二者体内可能存在着更为高效的吸收机制,具有比沙棘更强的低磷胁迫适应性。

## 4 结 论

1)黄土丘陵区土壤全磷含量较高,且在不同植被类型下差异不显著;土壤有效磷含量极低,远低于我国及世界其他地区平均水平。不同植被类型下土壤有效磷含量差异显著,随着植被的恢复,土壤有效磷占全磷含量的比例升高,土壤磷素营养状况得到改善,人工林植被对土壤有效磷的改善作用优于退耕自然恢复的草本植被。

2)黄土丘陵区植物叶片磷含量低于全球平均水平,叶片磷含量与土壤有效磷含量间的相关性不明显,由此推测,在长期的低磷胁迫下,植物自身形成了一套适应机制,植物叶片磷含量不会随着土壤有效磷的变化发生较大变动。

3)人工林植被对土壤有效磷的需求高于退耕自然恢复的草本植被,故在黄土丘陵区人工加速植被恢复过程中,可对人工林地适当增施磷肥。在低磷环境下铁杆蒿能够活化吸收较多的磷而在植株体内富集,有必要对其适应低磷胁迫机制展开深入的研究。

## [参考文献]

- [1] Lajtha K, Schlesinger W H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert chronosequence [J]. *Ecology*, 1988, 69: 24-39.
- [2] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87-115.
- [3] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China [J]. *Global Biogeochem*, 2005, 19, GB1020. Doi: 10. 1029/2004GB002296.
- [4] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-67.
- [5] Stevenson B A. Changes in phosphorus availability and nutrient status of indigenous forests in Pastoral New Zealand Hill country [J]. *Plant and Soil*, 2004, 262: 317-325.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 154-157.  
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 154-157. (in Chinese)
- [7] 王恒俊, 张淑光. 黄土高原地区土壤资源及其合理利用 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 160-173.

- Wang H J, Zhang S G. The soil resources and utilization in the loess plateau [M]. Beijing: China Science Press, 1991: 160-173. (in Chinese)
- [8] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响 [J]. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23.
- Wen Z M, Jiao F, He X H, et al. Spontaneous succession and impact on soil nutrient on abandoned farmland in the northern edge of forest zone on the loess plateau [J]. Acta Pratac Sin, 2007, 16(1): 16-23. (in Chinese)
- [9] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒地群落生物量及植被土壤养分效应 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1673-1683.
- Du F, Liang Z S, Xu X X, et al. The community biomass of abandoned farmland and its effects on soil nutrition in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi, China [J]. Acta Ecol Sin, 2007, 27(5): 1673-1683. (in Chinese)
- [10] 焦菊英, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵区沟壑区不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 667-674.
- Jiao J Y, Jiao F, Wen Z M. Soil water and nutrients of vegetation communities under different restoration thypes on the hilly-gullied Loess-Plateau [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2006, 12(5): 667-674. (in Chinese)
- [11] 许明祥, 刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 40-46.
- Xu M X, Liu G B. The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest land in the hilly Loess Plateau [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2004, 10(1): 40-46. (in Chinese)
- [12] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及影响因素 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(6): 945-952.
- Wang T, Yang Y H, Ma W H. Storage, patterns and environmental controls of soil phosphorus in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(6): 945-952. (in Chinese)
- [13] Tiessen H, Stewart J W B, Moir J O. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60-90 years of cultivation [J]. Journal of Soil Science, 1983, 34: 815-823.
- [14] Tiessen H, Stewart J W B, Cole C V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48: 853-858.
- [15] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- Gong J, Chen L D, Fu B J, et al. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in Hilly Loess Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 93-96. (in Chinese)
- [16] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应 [J]. 水土保持通报, 2002, 2(1): 1-5.
- Wang G L, Liu G B, Xu M X. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in zhifanggou watershed on Loess Hilly Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 2(1): 1-5. (in Chinese)
- [17] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005, 168: 377-385.
- [18] Foulds W. Nutrient concentrations of foliage and soil in southwestern Australia [J]. New Phytologist, 1993, 125: 529-546.
- [19] Hinsinger P, Gilkes R J. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of lupins grown in alkaline Soil [J]. Aust J Soil Res, 1995, 33: 477-489.
- [20] Wright I J, Westoby M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: Leaf traits of Australian sclerophyll species [J]. Functional Ecology, 2003, 17: 10-19.
- [21] 耿燕, 吴漪, 贺金生. 内蒙古草地叶片磷含量与土壤有效磷的关系 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 1-8.
- Geng Y, Wu Y, He J S. Relationship between leaf phosphorus concentration and soil phosphorus availability across Inner Mongolia grassland [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(1): 1-8. (in Chinese)
- [22] Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants [J]. Annual Review of Ecology and Sytematics, 1980, 11: 233-260.