

黄土高原半干旱区退耕还林对土壤微量元素的影响*

李玉婷 张建军 田宁宁 赵荣玮

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为了探明黄土高原半干旱区退耕还林对土壤微量元素(Cu、Zn、Mn、Mo、Fe)含量的影响及其与影响因子间的关系,以甘肃省关川河流域退耕还林地和农地为研究对象,使用有效性评价、通径分析等方法研究土壤微量元素与土壤环境变量间的关系。结果表明:退耕后土壤微量元素含量随土层深度增加而减少,在表层土壤中呈一定的富集现象。退耕地Cu、Mn、Mo的有效性指数高于Zn、Fe,侧柏林地有效性综合指数高于云杉林地。偏相关分析显示,退耕还林区土壤微量元素有效态含量的主要影响因素为土壤有机质、全钾、全氮与土壤含水率;回归分析显示,土壤环境因子可解释38.1%~73.8%有关土壤微量元素含量的变异;通径分析表明,土壤全钾对土壤微量元素的直接作用最大,土壤全氮对微量元素的间接作用最大;决策分析表明,土壤全钾与土壤有机质是退耕还林区微量元素含量的决策变量,而土壤含水率是土壤微量元素的限制变量。

关键词: 黄土高原 退耕还林 土壤微量元素 有效性指数 通径分析

中图分类号: S157.2; S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0113-08

Effects of Grain for Green Project on Soil Microelements in Semi-arid Area of Loess Plateau

Li Yuting Zhang Jianjun Tian Ningning Zhao Rongwei

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The available soil microelements are important components of enzyme, growth hormone and vitamins in plants. A better understanding of the variability of soil microelements after Grain for Green project will improve the emphasis of afforesting during the proceeding period. However, quantitative research on the effect of Grain for Green project on soil microelements is quite scarcity. The study was conducted to ascertain the effect of Grain for Green project on soil microelements (Cu, Zn, Mn, Mo and Fe) in Guanchuan river basin of Loess Plateau by applying partial correlation analysis and path analysis. The results showed that the contents of available soil microelements were promoted as a whole but diminished with the increase of soil depth after croplands were converted into forest lands. Available Fe in the soil was at a below level and could not meet the demands of plant growth. The available indices of soil microelements in forest lands were higher than those in croplands, the available amounts of Cu, Mn and Mo were higher than those of Zn and Fe. Moreover, *Platycladus orientalis* forest lands showed a higher comprehensive index than *Picea asperata* forest lands. Partial correlation analysis and path analysis showed that principal influence factors of variation in soil microelements were soil organic matter, soil total K, soil total N and soil moisture content. Both soil K and organic matter had a significant positive correlation with available Cu, Zn and Fe. Regression analysis showed that soil environmental factors can explain 38.1%~73.8% of variation in soil microelements. Decision-making analysis showed that soil K and soil organic matter were decision variables in soil microelements, while the soil moisture content was

收稿日期: 2015-03-28 修回日期: 2015-05-06

* 国家林业公益性行业科研专项资助项目(201304308)

作者简介: 李玉婷, 博士生, 主要从事水土保持与林业生态工程研究, E-mail: xiaoxiao2006_624@126.com

通讯作者: 张建军, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与森林水文研究, E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

the limited variable in the experimental region. It was recommended that application of rainwater harvesting measurements can improve utilization efficiency of precipitation. The results provide valuable reference for implementing the Grain for Green project in semi-arid region.

Key words: Loess Plateau Grain for Green project Soil microelement Available index Path analysis

引言

微量元素是植物体内酶、生长激素和维生素等的关键组成成分,对植物体生长发育具有重要作用^[1-2]。植物体生命活动所需的锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、钼(Mo)和铁(Fe)等微量元素主要来源于土壤,土壤供给微量元素的丰缺程度会直接影响植物的生理功能,还可能诱发各种病症^[3]。土壤微量元素主要来源于成土母质,但相同母质上的微量元素含量受气候、地上植被和土壤理化环境等因素的影响^[4-6]。国内外学者对微量元素的作用机理^[7-9]和不同土地利用方式^[10-11]对土壤微量元素的影响等进行了大量研究。刘庆等^[12]认为山东省寿光市表层土壤微量元素的空间分布结构优于深层土壤,且有效态Cu的空间自相关性较强;李海峰等^[13]指出塔里木盆地绿洲农田的利用强度和开垦年限越长,微量元素的有效性越高;史文娇等^[14]的研究结果表明影响黑龙江南部黑土区土壤微量元素含量的主要因子是土壤全量元素、pH值、有机质及土地利用类型;陈超等^[15]认为草地开垦使微量元素有效含量整体下降甚至低于当地微量元素的临界值。但目前,针对黄土高原退耕还林对土壤微量元素影响方面的研究仍鲜见报道。

黄土高原是世界最大的黄土沉积区,降水量少且集中,植被稀疏,水土流失十分严重^[16]。甘肃省于1999年在黄土高原地区率先开展了大规模的退耕还林工程,以期恢复和保护脆弱的生态环境^[17],至2014年甘肃省累计实施退耕还林189.7万 hm^2 (包括荒山荒地和封山育林),是退耕还林的重点工程区^[18]。退耕还林工程区域的土地利用、覆盖度已

发生明显变化,这必将影响土壤微量元素的含量与分布。本文选择甘肃省定西市的关川河流域,调查并分析退耕还林区和农地中的土壤微量元素,以期作为黄土高原地区土壤微量元素定量评估提供基础数据,为我国制定与改善退耕还林还草政策提供基本依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市关川河流域($35^{\circ}17' \sim 36^{\circ}14'N$, $104^{\circ}11' \sim 105^{\circ}01'E$),海拔高度1 671.3 ~ 3 941 m,属典型的黄土高原丘陵沟壑区,为中温带干旱半干旱大陆性季风气候。年均太阳辐射 $141.4 \text{ kJ}/\text{cm}^2$,年均气温为 $5.5 \sim 7.5^{\circ}\text{C}$,无霜期120 ~ 170 d,年均降水量400 mm左右,多集中在秋季,年均蒸发量高达1 500 mm,关川河流域是黄河一级支流祖厉河的支流,流域面积 $3\,535 \text{ km}^2$,土壤为黄绵土。该区沟壑纵横,植被稀疏,水土流失严重,年均土壤侵蚀模数为 $5\,257 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。1999年开始实施退耕还林工程,植被恢复树种主要为侧柏(*Platycladus orientalis* Franco.)、云杉(*Picea asperata* Mast.)、山杏(*Armeniaca sibirica* Lam.)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)等。

1.2 试验设计与分析方法

图1为试验样地分布及取样示意图,以关川河流域主要退耕树种、退耕年限和地形差异为布设样地的依据,选择云杉、侧柏样地各4块,相邻农地各1块,共10块样地,各样地间距大于等于1 km,样地面积 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,退耕年限为15 a。2014年7月开始调查样地内树种的树高、胸径、冠幅、植物多样性

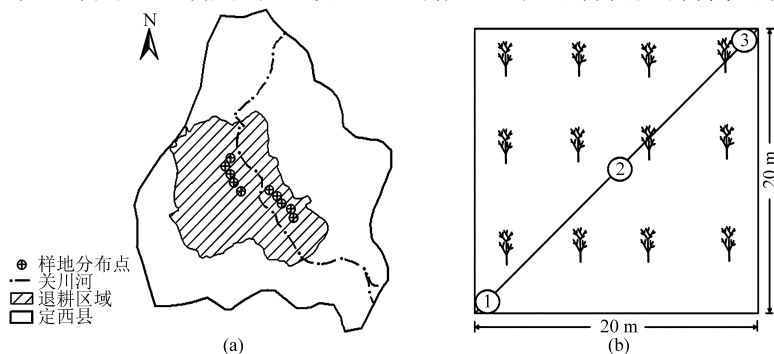


图1 采样样地及样点示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling plots and sites

等林分信息。土壤样点设置时主要沿样地对角线进行均匀取样,每一样地共取3个土壤样点,样点分0~10 cm(表层)、10~30 cm(第2层)、30~50 cm(第3层)取样,土壤样品取1 kg左右,共计30块土壤样地,90个土壤样本。样本经自然风干、压碎、剔除石砾与植物根茎后过2 mm筛用于室内化学分析;土壤含水率、土壤容重均通过环刀法测定。

土壤有效态铜、铁、锌、锰含量采用二乙三胺乙酸(DTPA)浸提,土壤有效钼采用草酸-草酸铵浸提,原子吸收分光光度法分析;有机质采用重铬酸钾-浓硫酸油浴法分析;土壤全氮采用半微量开氏法分析;土壤全磷采用钼锑抗比色法分析;土壤全钾采用原子吸收分光光度法分析^[19-20]。

1.3 研究方法

采用单项指数法(P_i)、综合指数法(P_t)计算土壤微量元素的有效性指数及综合指数^[21];使用通径分析表征微量元素与土壤环境因子间的相互关系,决策系数用于通径分析中的决策判断,表示各因素对目标结果的相对决定程度。

1.4 统计分析

利用单因素分析方法(One-way ANOVA)对不同林地土壤微量元素的含量进行差异显著性检验,使用最小显著极差法进行多重比较。土壤养分与土壤微量元素的相关性通过Pearson相关系数和双尾检验方法进行检验,基础数据处理在Microsoft Excel 2007中完成,数据分析检验均在SPSS 17.0中进行,并使用Origin 8.0完成作图。

2 结果与分析

2.1 不同土地类型土壤微量元素特征

研究区不同地类土壤有效态微量元素含量变化如表1所示,云杉林地、侧柏林地与农地的有效态

Cu、Zn、Mn、Mo、Fe含量随土层深度的增加呈现降低趋势,各土壤微量元素含量变异系数在1.9%~46.6%之间。

0~30 cm土壤剖面中云杉及侧柏林地的微量元素含量无显著差异,而30~50 cm土层中两林地微量元素含量差异显著($P < 0.05$)。云杉林地10~30 cm与30~50 cm土层中有效态Cu、Mn、Mo、Fe含量差异显著($P < 0.05$);侧柏林地0~10 cm与10~30 cm、30~50 cm土层有效态Cu、Zn、Mo、Fe含量差异较显著($P < 0.05$)。

与农田相比退耕林地土壤微量元素含量得到不同程度地提高,增幅在8.03%~41.49%之间。其中云杉林地土壤有效态含量增幅的顺序为:Zn > Cu > Mo > Fe > Mn,Zn含量增幅较大,是农田的2.3倍,明显高于农田;侧柏林地有效态微量元素的增幅顺序为:Mo > Zn > Cu > Fe > Mn,其中,有效态Mo含量是农田的1.89倍,而有效态Mn增幅最低,仅为农田的1.03倍。云杉林地、侧柏林地0~10 cm土层有效态Cu、Zn、Mo含量不仅高于农田,还分别高于10~30 cm、30~50 cm土层微量元素含量,这表明实施退耕还林后土壤微量元素呈现出一定的表层聚集现象,其中有效态Cu、Zn表层聚集现象较明显。

将研究区土壤有效态微量元素含量与全国农业系统土壤速效微量元素丰缺指标和甘肃省土壤有效态微量元素评价指标体系中的临界值进行对比发现,林地中土壤有效态Cu、Zn、Mn、Mo含量均高于临界值,仅土壤有效态Fe含量低于甘肃省土壤微量元素含量的临界值5.60 mg/kg,而农地中有效态Zn、Mn、Fe均低于临界值,由此推断退耕还林区土壤有效态Zn、Mn含量得到提高,但有效态Fe含量仍处于缺乏状态。

表1 不同土地类型土壤微量元素含量的剖面分布特征

Tab.1 Profile distribution of soil microelements in different forest stands and farm lands

土地类型	土层/cm	Cu	Zn	Mn	Mo	Fe	mg/kg
云杉	0~10	2.44 ± 0.16 ^{Aa}	1.21 ± 1.74 ^{Aa}	4.15 ± 1.84 ^{Aa}	0.42 ± 0.12 ^{Aa}	3.29 ± 0.18 ^{Aa}	
	10~30	2.42 ± 0.86 ^{Ab}	1.13 ± 1.87 ^{Bb}	4.09 ± 0.87 ^{Ab}	0.40 ± 0.03 ^{Ab}	3.25 ± 0.23 ^{Ab}	
	30~50	1.95 ± 0.91 ^{Bb}	1.04 ± 1.54 ^{Bb}	4.01 ± 0.67 ^{Bc}	0.23 ± 0.19 ^{Bb}	3.01 ± 0.30 ^{Bb}	
侧柏	0~10	2.58 ± 1.46 ^{Aa}	0.97 ± 1.17 ^{Aa}	4.14 ± 1.07 ^{Aa}	0.39 ± 0.50 ^{Aa}	3.38 ± 0.09 ^{Ab}	
	10~30	2.41 ± 1.05 ^{Bb}	0.64 ± 0.45 ^{Bc}	4.11 ± 1.02 ^{Ab}	0.35 ± 0.48 ^{Bb}	3.32 ± 0.08 ^{Bb}	
	30~50	2.33 ± 2.13 ^{Bc}	0.65 ± 1.47 ^{Bc}	4.04 ± 1.79 ^{Bc}	0.34 ± 0.52 ^{Bc}	3.27 ± 0.07 ^{Bc}	
农地	0~10	1.85 ± 0.08	0.55 ± 2.61	3.84 ± 1.15	0.30 ± 0.14	3.46 ± 1.08	
	10~30	1.68 ± 0.93	0.52 ± 1.61	4.06 ± 0.95	0.29 ± 0.14	2.11 ± 1.15	
	30~50	1.33 ± 1.03	0.41 ± 2.23	4.03 ± 1.55	0.26 ± 0.14	2.06 ± 1.44	
S_i		1.30	0.80	4.00	0.15	5.60	

注:不同小写字母表示同一土层不同林种在 $P < 0.05$ 水平差异显著;不同大写字母表示相同林种不同土层在 $P < 0.05$ 水平差异显著; S_i 表示土壤微量元素有效态含量的临界值。

2.2 土壤微量元素有效性评价

图2为退耕还林后林地及农地的5种土壤微量元素的有效性指数及临界值。云杉林地、侧柏林地各微量元素有效性指数均高于农田,说明能被植物吸收利用的微量元素有效性得到提升,其中云杉林地有效态Cu(1.75)、Zn(1.13)、Mo(1.02)的有效性指数均高于临界值,有效态Fe的有效性指数低于临界值且小于1;侧柏林地仅Cu的有效性指数(1.88)高于临界值,有效态Zn、Fe的有效性指数小于1,均低于临界值。

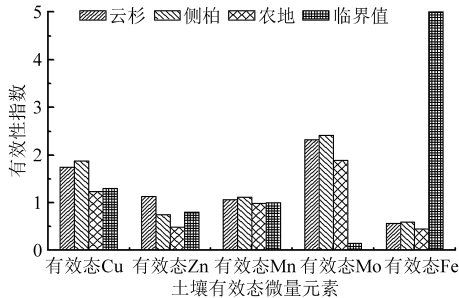


图2 退耕林地土壤微量元素有效性指数

Fig.2 Available index of soil microelements in Grain for Green lands

计算得侧柏林、云杉林及农地的微量元素综合指数分别为2.27、2.23、1.31,可见实施退耕还林提

高了该区域土壤微量元素的综合利用效率。但关川河流域内侧柏林土壤中仍缺乏有效态Zn、Fe,云杉林地缺乏有效态Fe,农地缺乏有效态Mn、Zn、Fe,Cu含量虽接近临界值,但不充足。

2.3 通径分析

2.3.1 相关性分析

采用Person法对研究区域土壤微量元素及其土壤理化因子进行相关性分析(表2),使用K-S检验方法对土壤微量元素及土壤理化因子进行非参数检验,结果表明有效态Cu、Zn、Mn、Fe及有机质、土壤容重等呈正态分布,而有效态Mo、全氮不符合正态分布,对其进行对数转化处理呈正态分布后参与相关性分析。相关性分析结果表明,有效态Cu、Zn、Mn、Mo、Fe与有机质、全钾、全氮、土壤含水率之间有一定相关性但相关关系各异;土壤全氮、全钾、有机质与有效态Cu、Fe呈极显著正相关($P < 0.01$),土壤含水率与有效态Fe之间呈极显著正相关($P < 0.01$),全氮、全钾分别与有效态Zn、Mn之间呈显著正相关($P < 0.05$),而全磷、土壤容重分别与有效态Zn、Mn呈负相关($P < 0.05$),与土壤微量元素相关性系数最大的土壤理化因素是土壤全钾,相关性系数为0.866。

表2 土壤微量元素与理化性质指标相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between soil microelements and physicochemical factors

	Cu	Zn	Mn	Mo	Fe	SOM	N	P	K	VM
Zn	0.882 **									
Mn	0.269	0.210								
Mo	0.459 *	0.213	-0.072							
Fe	0.841 **	0.765 **	0.519 **	0.297						
SOM	0.559 **	0.362	0.277	0.198	0.514 **					
N	0.588 **	0.431 *	0.435 *	0.059	0.624 **	0.890 **				
P	-0.267	-0.392 *	0.230	-0.269	-0.271	0.259	0.332			
K	0.789 **	0.654 **	0.395 *	0.353	0.866 **	0.673 **	0.731 **	0.052		
VM	0.210	0.069	-0.482 *	0.572 **	0.072	0.310	0.110	-0.230	0.199	
SW	0.209	0.144	-0.371	0.020	0.626 **	0.455 *	0.374	0.274	0.378	0.273

注:**表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著,*表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。SOM:土壤有机质,N:全氮,P:全磷,K:全钾,VM:土壤容重,SW:土壤含水率。

2.3.2 逐步回归分析

土壤微量元素与土壤理化因子的线性回归方程如表3所示。通过逐步回归分析从土壤理化因子中筛选出与有效态Cu(Y_1)、Zn(Y_2)、Fe(Y_3)相关性较大的因子:土壤有机质、全氮、全钾、土壤含水率。有效态Cu、Zn、Fe回归模型显著性水平达到 $P < 0.001$,使用分半信度分析4种土壤理化因子与有效态Cu、Zn、Fe的相关性,相关系数 r 都在0.7以上。方程中土壤含水率与全钾对微量元素的回归系数均

为正值,而土壤有机质对有效态Zn、Fe的回归系数为负值,由于土壤有机质与土壤含水率、土壤全钾相关性较高($P < 0.05$),土壤含水率与全钾含量增大同时提高有机质含量,由于土壤含水率与全钾的回归系数中有一部分土壤有机质的贡献,故不能认为土壤有机质的回归系数为负时,其含量的升高会使有效态Zn、Fe的含量降低。表3中Fe的回归方程中土壤理化因子对有效态Fe含量变异的贡献率为73.8%,而有效态Zn变异的环境解释量较低,仅为38.1%。

表 3 退耕地土壤微量元素多元线性回归方程

Tab. 3 Multiple linear regression equations for soil microelements in Grain for Green lands

微量元素	回归方程	R^2	F	Sig.
有效态 Cu	$Y_1 = 29.706 + 0.099X_1 - 0.037X_2 + 0.791X_3 + 0.111X_4$	0.634	9.543	0.000 1
有效态 Zn	$Y_2 = 264.47 - 0.246X_1 + 0.012X_2 + 0.781X_3 + 0.137X_4$	0.381	3.384	0.000 7
有效态 Fe	$Y_3 = 0.503 - 0.012X_1 + 0.314X_2 + 1.423X_3$	0.738	19.284	0.000 1

注: X_1 : 土壤有机质, X_2 : 土壤全氮, X_3 : 土壤全钾, X_4 : 土壤含水率。

2.3.3 通径分析

由于土壤理化因子之间具有相互作用(表 2), 简单相关系数并不能完全反映出各因子对土壤微量元素的真实作用, 如全氮与有效态 Cu、Fe 呈显著正相关, 而在偏回归系数中对有效态 Cu 为负值, 说明各土壤环境因子对微量元素作用十分复杂。为进一步了解土壤微量元素及其土壤环境因子之间的具体作用, 在相关分析和回归分析的基础上, 使用通径分析对回归系数进行分割, 得到土壤理化因子对微量元素的直接和间接通径系数(表 4)。结果表明, 全钾对有效态 Cu、Zn、Fe 的直接通径系数最大且为正值, 分别达到 0.791、0.781、1.423; 全氮通过有机

质、全钾对有效态 Cu、Zn、Fe 表现出较高的间接作用(间接通径系数为 0.578、0.571、1.04), 全钾对微量元素的总间接通径系数较小, 这可能是由于全钾通过有机质、全氮的间接作用为负值, 直接通径系数与间接通径系数符号相反出现了削减效应。全氮对有效态 Cu、Zn 的间接通径系数在众因子中最高, 分别为 0.708、1.032, 但由于其直接通径系数为负(-0.037), 抵消了一部分促进作用, 有机质对有效态 Fe 的间接通径系数最大(1.342), 但其直接通径系数亦为负, 导致有机质对有效态 Fe 的促进作用不明显。土壤含水率对各土壤微量元素有正面效应, 但无论直接作用还是间接作用表现都较低。

表 4 土壤微量元素与土壤理化因子的通径系数

Tab. 4 Path coefficients of soil microelements and soil physicochemical factors

微量元素	变量	直接作用	间接作用				\sum	决策系数 R^2
			SOM	N	K	SW		
有效态 Cu	SOM	0.099	—	-0.033	0.532	0.039	0.538	0.102
	N	-0.037	0.088	—	0.578	0.042	0.708	-0.389
	K	0.791	0.067	-0.027	—	0.042	0.082	0.622
	SW	0.111	0.035	0.014	0.299	—	0.348	-0.058
有效态 Zn	SOM	0.246	—	0.219	0.526	0.049	0.794	0.117
	N	0.012	0.410	—	0.571	0.051	1.032	0.010
	K	0.781	0.166	0.009	—	0.052	0.227	0.412
	SW	0.137	0.087	0.004	0.295	—	0.386	0.058
有效态 Fe	SOM	-0.012	—	0.279	0.958	0.105	1.342	-0.012
	N	0.314	-0.010	—	1.040	0.111	1.141	0.491
	K	1.423	-0.008	0.229	—	-0.002	0.219	0.440
	SW	0.296	-0.004	0.117	-0.003	—	0.110	-0.222

注: “ \sum ”代表 SOM、N、K、SW 间接作用的总和。

2.3.4 决策系数

对土壤理化因子与微量元素进行决策分析(表 4), 按绝对值大小排列, 有效态 Cu 含量的决策系数大小为: $R^2_{(K)} > R^2_{(N)} > R^2_{(SOM)} > R^2_{(SW)}$, 有效态 Zn 含量的决策系数顺序为: $R^2_{(K)} > R^2_{(SOM)} > R^2_{(SW)} > R^2_{(N)}$, 有效态 Fe 为: $R^2_{(N)} > R^2_{(K)} > R^2_{(SW)} > R^2_{(SOM)}$ 。由此可知, 研究区土壤微量元素含量的主要决策变量是土壤全钾, 限制变量为土壤含水率。

3 讨论

3.1 退耕地土壤微量元素变化特征

实施退耕还林后能被植物吸收利用的有效态

土壤微量元素的含量出现不同程度的提升。云杉和侧柏林地的土壤微量元素含量与农地相比均表现较大增幅, 随着土层深度增加, 土壤有效态微量元素含量整体上逐渐降低, 并呈现出表层富集现象, 这与漆良华等和陈超等的研究结果相似^[3,14], 与安玉亭等的研究结果有差别^[22], 这种差别可能由于研究区域的成土母质、土地利用方式不同, 从而影响了土壤微量元素的变异程度及分布。研究区云杉及侧柏林下灌木与草本密度较低, 伴生树种稀少, 有研究表明, 长时间对结构单一的人工林进行抚育有可能导致土壤的生物化学物质及养分表现出不均匀富集化等土壤极化现象, 长此以往

可能导致低效低产林分的形成^[23]。云杉与侧柏是关川河流域退耕还林区主要建群树种,有效态微量元素因不同植物的生理特性表现出不同的含量差异,研究发现,有效态 Cu、Fe 在侧柏林地的含量较高,有效态 Zn、Mn、Mo 则在云杉林地表现出较高水平,这些差异可能与不同林种在半干旱区的抗旱能力与抗旱策略不同等植物生理特性有关^[24]。植物主要通过根毛区吸收植物营养元素,云杉根系分布浅,对深层土壤改良作用微弱,而侧柏根系分布较深且耐旱能力强,根系分泌物对根际土壤有改良作用,进而影响黄土区微量元素在土壤剖面的分布^[25]。因此,建议在后续退耕还林实施过程中可选择深根耐旱型树种及对根系有协同作用的伴生树种进行混交造林,促进退耕林正向演替,并维持该区域森林生态系统的稳定及可持续发展。

3.2 微量元素有效性评价

研究表明,林地各微量元素的有效性高于农地,侧柏林地土壤微量元素综合有效性优于云杉林地,但各林地 Fe 的有效性指数均小于 1。实施退耕还林后,林地土壤微量元素有效性指数明显提升;Mo 的有效性指数较高,表明退耕还林地中可供植物吸收利用的水溶态 Mo 含量较丰富;退耕林地中有效态 Fe 含量与农地相比无显著差异,植被恢复措施对当地有效态 Fe 的含量没有显著提高作用。研究区土壤有效态 Fe 含量低于全国农业系统和甘肃省土壤速效微量元素丰缺临界值,表明该区域的土壤有效态 Fe 较缺乏。可溶态 Fe 能够满足植物生长发育的需求,其含量主要受土壤 pH 值、Fe 的形态、粘粒土壤以及有机质等因素的综合影响,苟文平等^[26]研究表明,土壤有效态 Fe 不足会导致植物缺 Fe 黄叶症,在半干旱区这种现象尤为突显,而土壤有机质和粘土对有效态 Fe 的含量影响较大,这与有机质和粘粒均为吸附性阳离子的载体有关。黄土高原气候干旱,土壤质地主要组成成分为砂土和壤土,粘粒含量低,且有机质含量有限,这解释了研究区有效态 Fe 缺乏的原因,长期缺乏植物所需的微量元素将导致植物出现不可逆转的损伤。目前研究区土壤有效态 Cu、Mn、Mo 的含量基本处于丰富水平,对植被生长而言暂不会出现缺乏的威胁,而土壤有效态 Fe 含量存在严重不足,建议后续退耕作业中注重对有效态 Fe 的补充并加强整地措施充分利用深层土壤的微量元素。

3.3 微量元素影响因子分析

本研究通过简单相关分析得出微量元素与土壤

有机质、全钾、全氮、土壤含水率有相关性。回归分析及通径分析表明,土壤有机质、全钾对土壤微量元素的影响较大,有研究表明有机质能与微量元素络合,成为可被植物吸收的简单络合态微量元素^[27],而全钾对微量元素的作用很大程度上是通过有机质来发挥作用,故在植物利用微量元素方面有机质起着极大促进作用。林地枯落物腐解过程与根系分泌物对土壤的酸化也是提高土壤微量元素含量的重要因素,在下一研究阶段中将林地枯落物、根系分泌物、土壤 pH 值及土壤粒径对土壤微量元素的作用作为研究目标进行深入探析^[28]。王昌全等^[29]研究表明土壤有机质含量小于 35 g/kg 时,有机酸在土壤中流动时会溶解大量微量元素,避免这些微量元素与土壤颗粒接触而被固定,可提高植被吸收微量元素的含量。本研究中有有机质含量范围在 10.2 ~ 25.3 g/kg 之间,有机质络合作用将提高该区域植被利用微量元素的含量,这解释了该区域微量元素含量与退耕前的农地相比普遍提高的现象。决策分析表明(表 4),土壤含水率是土壤微量元素含量的限制因子,由于植物吸收土壤中微量元素主要通过质流、扩散等途径^[30],半干旱区土壤的干旱特性决定了土壤中质流过程缓慢,这在很大程度上影响了微量元素的有效性,从而使土壤含水率成为该区域退耕还林土壤微量元素的限制因素。由于黄土高原地区降水贫乏,可通过集雨保水措施等改造下垫面性质的方式提高降水利用率、减少土壤水分损失,从而促进土壤含水率对土壤微量元素的正面作用^[31]。

4 结论

(1) 关川河流域退耕还林后林地土壤微量元素含量整体上有不同程度提升,其含量在土壤剖面上呈现随土层深度增加而减少的变化规律,并有一定的表层富集现象。

(2) Cu、Mn、Mo 的有效性指数表现为:侧柏 > 云杉 > 农地;综合指数为:侧柏 > 云杉 > 农地;研究区有效态 Fe 含量均处于缺乏水平,在后续退耕作业中需注重对有效态 Fe 的补充。

(3) 土壤有机质、全钾、全氮与土壤含水率是影响土壤微量元素含量的主要因子。土壤全钾对有效态 Cu、Zn、Fe 含量起直接作用,土壤全氮对微量元素起间接作用,有机质对微量元素有极大的促进作用,但土壤含水率则是该地区微量元素有效态含量的一个限制因子,建议在退耕还林区域增加集雨保水等措施来解决这一关键问题。

参 考 文 献

- 1 陆继龙,周永昶,周云轩. 吉林省黑土某些土壤微量元素环境地球化学特征[J]. 土壤通报, 2002,33(5):365-368.
Lu Jilong, Zhou Yongchang, Zhou Yunxuan. Environmental geochemical characteristics of some microelements in the black soil of Jilin province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(5):365-368. (in Chinese)
- 2 董国涛,罗格平,许文强,等. 三工河流域下游绿洲土壤微量元素有效含量空间变异特征[J]. 中国沙漠,2010,30(4):862-868.
Dong Guotao, Luo Geping, Xu Wenqiang, et al. Spatial variability of oasis available trace elements in the lower reaches of Sangong river watershed, North Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2010,30(4):862-868. (in Chinese)
- 3 漆良华,张旭东,彭镇华,等. 不同植被恢复模式下中亚热带黄壤坡地土壤微量元素效应[J]. 应用生态学报,2008,19(4):735-740.
Qi Lianghua, Zhang Xudong, Peng Zhenhua, et al. Soil microelements under different vegetation restoration patterns in yellow soil slope region of mid-subtropics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4):735-740. (in Chinese)
- 4 安韶山,刘梦云,李碧成,等. 宁南山区不同植被恢复措施的土壤养分效应研究[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1429-1432.
An Shaoshan, Liu Mengyun, Li Bicheng, et al. Effect of different vegetation restoration on soil nutrient changes in southern Ningxia mountain region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(8):1429-1432. (in Chinese)
- 5 Lu D, Mausel P. Linking Amazon secondary succession forest growth to soil properties [J]. Land Degradation & Development, 2002,13(4):331-343.
- 6 Lemenih M, Karlton E, Olsson M. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in smallholders forming system in Ethiopia [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005,105(1-2):373-386.
- 7 Akbas F, Günel H, Gökmen F, et al. Spatial variation of micronutrients in topsoil and subsoil of Vertic Haplustepts [J]. Agrochimica, 2009,53(2):101-116.
- 8 Reddy M V, Satpathy D, Dhiviya K S. Assessment of heavy metals (Cd and Pb) and micronutrients (Cu, Mn and Zn) of paddy (*Oryza sativa* L.) field surface soil and water in a predominantly paddy-cultivated area at Puducherry (Pondicherry, India), and effects of the agricultural runoff on the elemental concentrations of a receiving rivulet [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(8):6693-6704.
- 9 Zhou X M, Zuo Z F, Liu B. The dynamic distribution of Mn element between soil and plant in Northeast Leymus [J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012, 10(2):891-895.
- 10 黄元仿,周志宇,苑小勇,等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特质[J]. 生态学报,2004,24(12):2776-2781.
Huang Yuanfang, Zhou Zhiyu, Yuan Xiaoyong, et al. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12):2776-2781. (in Chinese)
- 11 Anaya C A, Huber-Sannwald E. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forests to traditional sugarcane agriculture in East Mexico [J]. Soil & Tillage Research, 2015,147(2015):20-29.
- 12 刘庆,夏江宝,谢文军. 半方差函数与 Moran's I 在土壤微量元素空间分布研究中的应用——以寿光市为例 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011, 36(9):1129-1133.
Liu Qing, Xia Jiangbao, Xie Wenjun. Application of semi-variogram and Moran's I to spatial distribution of trace elements in soil: a case study in Shouguang County [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(9):1129-1133. (in Chinese)
- 13 李海峰,曾凡江,桂东伟,等. 不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征[J]. 生态学报,2012,32(6):1803-1810.
Li Haifeng, Zeng Fanjiang, Gui Dongwei, et al. The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(6):1803-1810. (in Chinese)
- 14 史文娇,汪景宽,魏丹,等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例 [J]. 土壤学报, 2009,46(2):342-347.
Shi Wenjiao, Wang Jingkuan, Wei Dan, et al. Spatial variability of soil trace elements in black soil region of south Heilongjiang Province and its affecting factors—a case study of Shuangcheng City [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009,46(2):342-347. (in Chinese)
- 15 陈超,杨丰,刘洪来,等. 贵州喀斯特地区草地开垦对土壤微量元素的影响与评价 [J]. 农业工程学报,2013,29(7):230-237.
Chen Chao, Yang Feng, Liu Honglai, et al. Effects and evaluation of soil trace elements after grassland converted into cropland in Guizhou karst area [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 230-237. (in Chinese)
- 16 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响 [J]. 农业机械学报,2014,45(2):169-175.
Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water

- loss in small watershed on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):169 - 175. (in Chinese)
- 17 孔忠东,徐程扬,杜纪山. 退耕还林工程效益评价研究综述[J]. 西北林学院学报,2007,22(6):165 - 168.
Kong Zhongdong, Xu Chengyang, Du Jishan. An overview of benefit evaluation of the conversion of cropland to forest project [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6):165 - 168. (in Chinese)
- 18 许明祥,王征,张金,等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. 生态学报,2012,32(17):5405 - 5415.
Xu Mingxiang, Wang Zheng, Zhang Jin, et al. Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17):5405 - 5415. (in Chinese)
- 19 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- 20 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- 21 廖琴,南忠仁,王胜利,等. 黑河流域中部土壤微量元素有效态含量的空间变异及丰缺评价[J]. 干旱区资源与环境,2012, 26(2):108 - 113.
Liao Qin, Nan Zhongren, Wang Shengli, et al. Spatial variability and abundance evaluation of available microelements in the middle reaches of Heihe River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2): 108 - 113. (in Chinese)
- 22 安玉亭,薛建辉,吴永波,等. 喀斯特山地不同类型人工林土壤微量元素含量与有效性特征[J]. 南京林业大学学报,2013, 37(3):65 - 70.
An Yuting, Xue Jianhui, Wu Yongbo, et al. The contents and availability of soil microelements in different types of plantations in karst mountainous site [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2013, 37(3):65 - 70. (in Chinese)
- 23 刘增文,段而军,付刚,等. 秦岭北山几种典型人工纯林土壤性质极化问题研究[J]. 土壤,2008,40(6):997 - 1001.
Liu Zengwen, Duan Erjun, Fu Gang, et al. Soil polarizations of several typical artificial pure forests in north mountain of Qinling [J]. Soils, 2008, 40(6):997 - 1001. (in Chinese)
- 24 李磊,贾志清,朱雅娟,等. 我国干旱区植物抗旱机理研究进展[J]. 中国沙漠,2010,30(5):1053 - 1059.
Li Lei, Jia Zhiqing, Zhu Yajuan, et al. Research advances on drought resistance mechanism of plant species in arid area of China [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5):1053 - 1059. (in Chinese)
- 25 吴林坤,林向民,林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报,2014, 38(3):298 - 310.
Wu Linkun, Lin Xiangmin, Lin Wenxiong. Advances and perspective in research on plant - soil - microbe interactions mediated by root exudates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3):298 - 310. (in Chinese)
- 26 苟文平,刘世全,张世熔,等. 西藏土壤有效铁含量及其影响因素[J]. 山地学报,2007,25(3):359 - 363.
Gou Wenping, Liu Shiquan, Zhang Shirong, et al. Status of soil available iron and its affecting factors in Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3):359 - 363. (in Chinese)
- 27 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研究[J]. 水土保持学报,2005,19(1):93 - 96.
Gong Jie, Chen Liding, Fu Bojie, 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)
- 28 茹豪,张建军,李玉婷,等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(4):176 - 182.
Ru Hao, Zhang Jianjun, Li Yuting, et al. Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):176 - 182. (in Chinese)
- 29 王昌全,李冰,龚斌,等. 西昌市土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 有效性评价及其影响因素分析[J]. 土壤通报,2010,41(2):447 - 451.
Wang Changquan, Li Bing, Gong Bin, et al. Study on the bioavailability and impact factors of Fe, Mn, Cu and Zn in the soils of Xichang City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2):447 - 451. (in Chinese)
- 30 占丽平,李小坤,鲁剑巍,等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤,2012,44(4):548 - 553.
Zhan Liping, Li Xiaokun, Lu Jianwei, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement [J]. Soils, 2012, 44(4):548 - 553. (in Chinese)
- 31 李小英,段争虎,刘理臣,等. 黄土高原西部不同集雨保水措施下土壤水分变异措施[J]. 农业机械学报,2014,45(3):118 - 123.
Li Xiaoying, Duan Zhenghu, Liu Lichen, et al. Variation of soil moisture under different rainwater harvesting and conservation practices in the western part of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 118 - 123. (in Chinese)