

黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有效态微量元素演变特征

张超^{1,2}, 刘国彬^{1,2}, 薛蕙^{1,2}, 肖列¹

(¹西北农林科技大学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; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】探索农耕地撂荒对土壤微量元素演变特征的影响, 为该地区植被恢复中土壤质量评价和生态恢复的持续健康发展提供科学依据。【方法】以黄土丘陵区不同撂荒年限的坡耕地为研究对象, 分析农耕地撂荒后不同坡向土壤 4 种有效态微量元素的变化趋势。【结果】黄土丘陵区坡耕地撂荒后, 阴坡由于土壤温度较低, 含水量较大, 植被生长旺盛。有机碳、全氮、有效锰、有效铁、有效锌含量变化规律性较强, 表现为在演替前期变化较小, 而后期随撂荒年限的延长而显著增加, 有效铜则随撂荒年限呈降低趋势。阳坡土壤有机碳、全氮及 4 种有效态微量元素含量则随年限呈波动变化。不同演替阶段土壤微量元素密度变化不同, 阳坡土壤有效铁和有效锌密度在演替前 10 年明显高于阴坡, 而在 10 年后显著低于阴坡; 有效铜密度在前 5 年略低于阴坡, 5 年后明显高于阴坡。【结论】黄土丘陵区坡耕地撂荒 20 年后, 虽然 4 种土壤有效态微量元素含量有所提高, 但仍处于低或极低水平, 因此黄土丘陵区通过自然演替来改善土壤微量元素状况还需要较长的时间。

关键词: 坡耕地; 撂荒演替; 有效态微量元素

Characteristic of Soil Available Trace Elements on Abandoned Cropland in the Loess Hilly Region

ZHANG Chao^{1,2}, LIU Guo-bin^{1,2}, XUE Sha^{1,2}, XIAO Lie¹

(¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】 The research was made to provide a scientific guidance for the sustainable development of ecological restoration and the evaluation of soil quality by studying the effect of abandoned cropland on soil trace elements in the hilly-gully region of the Loess Plateau. 【Method】 The present study investigated the changes of four available trace elements at different slope aspects during succession on abandoned cropland in the loess hilly region. 【Result】 The results showed that during the vegetation succession on abandoned cropland, the content of organic C, total N, available Mn, available Fe, available Zn in this shady slope presented a significant regular variation due to the high soil moisture favorable vegetation conditions, showing no significant difference at the early stage of succession while increased with the increasing years at the later stage. Available Cu exhibited a decrease trend with years. Organic C, total N, and four available trace elements in the sunny slope fluctuated with the increasing years. The density of four trace elements differed significantly at different succession stages. Compared with the shady slope, available Fe and Zn density in the sunny slope was higher in the first 10 years while was lower 10 years later, available Cu density was slightly lower in the first 5 years and was higher thereafter. 【Conclusion】 Although the content of four soil trace elements in the cropland increased after abandoned for 20 years, it is still in the extremely lower level, thus natural recovery to improve the status of trace elements in this region probably need more time.

收稿日期: 2012-10-29; 接受日期: 2013-08-22

基金项目: 中国科学院战略科技先导项目(XDA05060300) 陕西省科技基础研究项目(2011KJXX63)

联系方式: 张超, E-mail: zhangchaolynn@163.com. 通信作者薛蕙, E-mail: xuesha100@163.com

Key words: slope cropland; succession; available trace elements

0 引言

【研究意义】土壤中的 Cu、Zn、Fe、Mn 是植物正常生长发育必需的微量元素，它们是组成酶、维生素和生长激素的成分，直接参与有机体的代谢过程，对植物的生长发育有重要意义^[1]。例如，锰在植物体内作为某些酶的活化剂参与氧化作用而参加氮及无机酸的代谢，铜和铁在电子传递和酶促反应中起作用，是植物光合作用和电子传递的重要因子^[2-3]。研究表明，植物从土壤中吸收利用的并不是元素的总量，而只是其中的某些形态，这些形态一般被称之为有效态^[4]。目前，全球范围内有数百万公顷耕地土壤缺乏微量元素^[5]。而在中国，土壤中除了铜的供给比较充足，铁、锰和锌的供给在不同区域不同土壤都很不平衡^[6-7]。土壤中任何一种微量元素过量或缺乏都会影响植物的正常生长，甚至威胁到人和动物的健康。因此，微量元素的循环及其与土壤养分、植被恢复之间的相互关系开始越来越多的受到国内外生态学者的关注^[8-10]。【前人研究进展】近年来，关于影响微量元素循环的研究主要集中在森林生态系统^[10-12]、农田生态系统^[13-14]以及植被演替过程^[15-16]方面，包括土壤微量元素的生物有效性、微量元素的提取技术及分析方法等，这为土壤微量元素的深入研究奠定了基础。黄土高原丘陵区地处干旱半干旱气候区，环境条件恶劣，加之长期的人为活动干扰，自然植被稀少，土壤侵蚀较为严重。近年来，水土保持工作的开展极大改善了该区的生态环境。在黄土高原治理中，使原已开垦耕种的陡坡退耕还草，人为撂荒使其自然恢复是该地区生态建设和植被恢复的重要措施之一^[17]。【本研究切入点】目前，对于黄土丘陵区坡耕地撂荒的研究大多集中在土壤物理结构^[18-19]、养分组成^[20]以及生物特性^[21]，而对于土壤中有效态微量元素的研究较少。据报道，黄土高原有 11% 的土壤缺铁，48% 的土壤缺锰，56% 的土壤缺锌，21% 的土壤缺铜，土壤微量元素供应不足已经影响到了该区的植物生长，而有效态微量元素缺乏是其主要原因^[22]。【拟解决的关键问题】掌握黄土丘陵区坡耕地自然演替中土壤有效态微量元素的演变趋势，对于研究该地区的植被恢复与生态建设具有重要作用。因此，本文以黄土丘陵区不同撂荒年限的坡耕地为研究对象，分析不同坡向土壤有效态微量元素 (Mn、Fe、Cu、Zn) 的变化特征，以期

为合理利用土地和制订切实可行的水土保持措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持实验站的墩山，地理位置为东经 109°19'23"，北纬 36°51'30"，海拔 1 330 m。属干旱半干旱气候区，年气温为 8.8℃，年均降雨量为 510 mm，多集中于 7、8、9 月，占全年降雨量的 60%；年蒸发量 1 500—1 800 mm。土壤为黄土母质上发育的黄绵土，砂粒含量占 19.0%，粉粒含量占 65.2%，黏粒含量占 15.8%，流域植被属于暖温带落叶阔叶林区向暖温带草原区过渡的森林草原植被。该地区属于黄土高原丘陵沟壑地貌，为典型的侵蚀环境，土壤植物组成主要以草本、半灌木、灌木为主，多年生禾本科和豆科植物较多，主要建群植物包括柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 等人工灌木，柳枝稷 (*Panicum virgatum*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*)、苜蓿 (*Medicago sativa*) 等人工草地，以及坡耕地退耕后通过自然演替所形成的天然草地，主要优势种为茵陈蒿 (*Artemisia capillaries*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) 和白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)。

1.2 样地选择与土壤采集

研究方法：时空互代法，该方法可以取得较长时间尺度的研究结果，是生态学领域中普遍采用的研究方法^[17]。

研究对象：阴坡、阳坡上土壤与成土母质类型相同、坡向坡位相近的不同年限的撂荒地。不同年限的撂荒地撂荒之前均为坡耕地，种植模式为谷子和大豆轮作。

样地选择及土壤采集：根据查阅历史资料以及长期观测记录，在阴坡和阳坡选择撂荒年限分别为 1 年、5 年、10 年、15 年和 20 年的土壤为样点，样地基本特征见表 1。在各样地选取 3 个小区 (20 m × 20 m)，采用土钻法在每个取样区域采集表层 (0—20 cm) 土壤样品多点混合，样品充分混匀、风干后测定土壤有机质、全氮及各种微量元素有效态含量。

1.3 分析方法与数据处理

土壤有机碳：采用重铬酸钾氧化外加加热法测定；

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of sampling plots

坡向	撂荒年限	坡度	海拔	主要植被	
Slope aspect	Abandoned year (a)	Slope gradient	Altitude (m)	Main vegetation	
阴坡 Shady slope	N 15°W	1	25°	1274	茵陈蒿, 猪毛菜
	N 10°W	5	25°	1298	茵陈蒿, 阿尔泰狗娃花
	N 30°E	10	24°	1312	茵陈蒿, 阿尔泰狗娃花, 二裂委陵菜
	N25°W	15	28°	1256	铁杆蒿, 长芒草, 兴安胡枝子, 糙隐子草, 猪毛菜
	N35°E	20	22°	1287	长芒草, 铁杆蒿, 兴安胡枝子, 糙隐子草
阳坡 Sunny slope	S18°E	1	25°	1266	茵陈蒿
	S15°E	5	25°	1300	茵陈蒿, 猪毛菜, 野豌豆
	S23°E	10	22°	1311	阿尔泰狗娃花, 铁杆蒿, 糙隐子草
	S35°W	15	22°	1261	长芒草, 兴安胡枝子, 二裂委陵菜
	S20°W	20	30°	1284	长芒草, 白羊草, 铁杆蒿, 兴安胡枝子

茵陈蒿 *Artemisia capillaries*、铁杆蒿 *Artemisia sacrorum*、长芒草 *Stipa bungeana*、白羊草 *Bothriochloa ischaemum*、阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*、兴安胡枝子 *Lespedeza davurica*、二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*、糙影子草 *Cleistogenes squarrosa*、野豌豆 *Vicia sepium*、猪毛菜 *Salsola collina*

全氮：采用半微量凯氏法测定（凯氏定氮仪）；

有效态微量元素：用 DTPA 浸提风干土样（过 2 mm 尼龙筛），在室温下振荡 1.5 h，过滤后，用原子吸收分光光度计（GBC932AA）在不同波长下（324.8、248.3、213.9、279.5 nm）分别测得土壤有效铜、有效铁、有效锌、有效锰的吸光度^[23]。

数据分析：方差分析、多重比较（Duncan 法， $P < 0.05$ ）和相关性分析（Pearson 法）均采用 SPSS15.0 统计软件。

1.4 有效态微量元素密度计算

$$STED = \sum_{i=1}^n \frac{STE_i \times B_i \times D_i \times (1 - F_i / 100)}{100}$$

式中， $STED$ 为土壤有效态微量元素密度（ $g \cdot m^{-2}$ ）； STE_i 为第 i 层土壤有效态微量元素含量（ $mg \cdot kg^{-1}$ ）； B_i 为第 i 层土壤容重（ $g \cdot cm^{-3}$ ）； D_i 为第 i 层土壤厚度（cm）； F_i 为第 i 层 > 2 mm 土壤颗粒质量分数（%）。由于本研究区土壤为黄绵土， > 2 mm 土壤颗粒含量极少^[24]，因此忽略不计。

2 结果

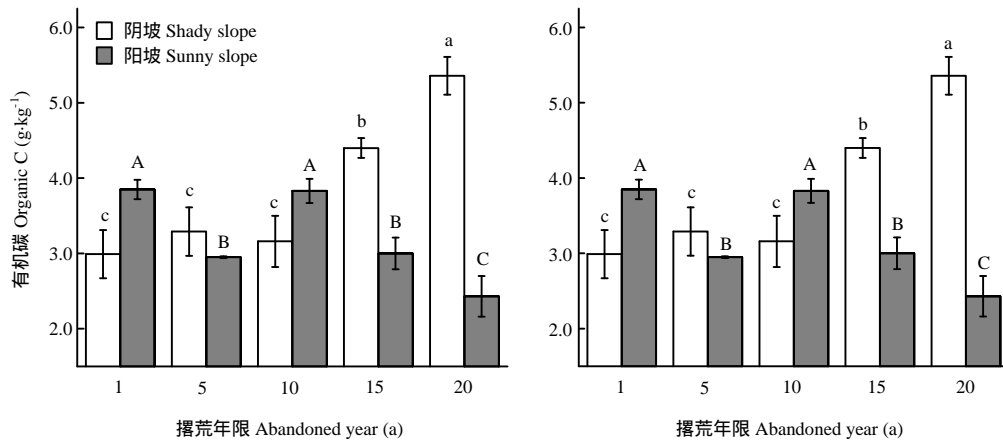
2.1 黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有机碳、全氮含量变化

坡耕地撂荒后土壤有机碳、全氮变化见图 1。不同坡向土壤有机碳、全氮变化趋势差异较大，且同一坡向上有机碳、全氮总体趋势类似。其中，阴坡有机

碳、全氮在撂荒前 10 年变化不大，之后随年限显著增加，在 20 年时达到最大值，较撂荒 1 年时分别增加了 79.2%，75.7%。与阴坡相比，阳坡有机碳、全氮波动较为强烈，在演替中后期（10—20 年）呈降低趋势，并在 20 年时达到最低值，与撂荒 1 年时相比，有机碳、全氮降幅分别达 36.9% 和 48.8%。

2.2 黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有效态微量元素含量变化

坡耕地撂荒后不同坡向土壤有效态微量元素含量变化显著（图 2）。在阴坡，土壤有效锰含量随撂荒年限缓慢增加，20 年时达到最大值；有效铜含量则随年限的增加呈降低趋势；与撂荒 1 年相比，有效铁在撂荒 5 年时显著降低，之后随年限逐渐增加。有效锌则在前 10 年无显著变化，10 年后迅速增加，并于 20 年时达到最大值，较撂荒 1 年时增加了 90.7%。与阴坡相比，阳坡微量元素变化较为复杂。其中，有效锰在撂荒前 10 年随年限逐渐增加，之后急剧降低，并在 15—20 年时趋于稳定；有效铜和有效锌变化趋势相同，均随年限波动较为强烈；有效铁则在前 10 年变化不稳定，之后随撂荒年限的增加呈减低趋势，在 20 年时达到最低值。目前，中国对于土壤微量元素的评价标准主要采用“中国科学院微量元素组的土壤有效态微量元素评价标准（1989 年）”，该方法将土壤微量元素含量分为 5 个等级（表 2）。可以看出，虽然 4 种有效态微量元素含量在撂荒 20 年后显著提高，但与全国水平相比，仍处于低或极低水平。



不同小写字母表示阴坡不同样地差异达显著水平 ($P < 0.05$), 大写字母表示阳坡不同样地差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同
 Lowercase letters and capital letters indicate significance at $P < 0.05$ at shady slope and sunny slope, respectively. The same as below

图 1 撂荒农耕地土壤有机碳、全氮含量变化

Fig. 1 Change of soil organic C and total N content in abandoned cropland

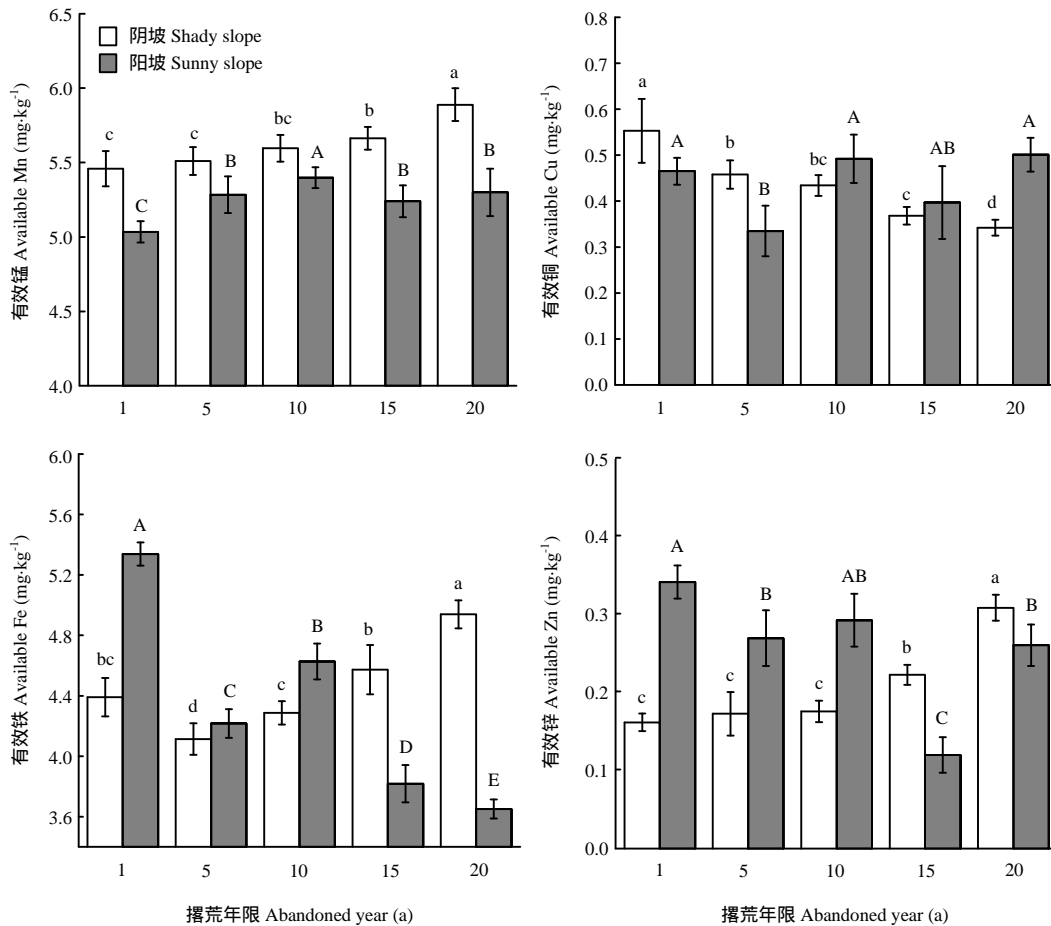


图 2 撂荒农耕地土壤有效态微量元素含量变化

Fig. 2 Change of soil available trace elements in abandoned cropland

2.3 不同坡向土壤有机碳、全氮与有效态微量元素之间相关性分析

土壤有机碳、全氮与有效态微量元素相关性分析见表 3。无论是阴坡还是阳坡，土壤有机碳和全氮均与有效铁和有效锌呈显著或极显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.001$)。在阴坡，土壤有机碳、全氮与有效锰呈极显著正相关，而与有效铜呈极显著负相关 ($P < 0.001$)，且有效锰与有效铁、有效锌两两之间呈显著或极显著正相关 ($P < 0.001$ 或 $P < 0.05$)，而有效铜则与其它 3 种微量元素呈显著负相关 ($P < 0.05$)。在阳坡，有机碳、全氮与有效铜、有效铁和有效锌呈显著或极显著正相关 ($P < 0.001$ 或 $P < 0.05$)，且 3 种微量元素之间呈正相关。有效锰与

有机碳、全氮及其它 3 种微量元素相关性较弱，未达到显著水平。

2.4 黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有效态微量元素密度变化

由表 4 可知，黄土丘陵区坡耕地撂荒后土壤有效态微量元素密度变化显著。在 20 年的植被演替中，有效锰变化范围为 1.25—1.35 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，有效铜为 0.08—0.13 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，有效铁为 0.89—1.32 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，有效锌为 0.03—0.08 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同坡向的土壤有效态微量元素密度变化不同，其中，阳坡土壤有效铁和有效锌密度在演替前 10 年均明显高于阴坡，而在 10 年后，显著低于阴坡；阳坡土壤有效铜密度在前 5 年略低于阴坡，5 年后明显高于阴坡；有效锰两者之间则无明显规律。

表 2 土壤有效态微量元素评价标准 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Evaluation criteria of soil available trace elements

指标	极低	低	中等	高	极高	临界值
Indicators	Extreme low	Low-level	Meddle-level	High-level	Extreme high	Critical value
有效锰 Available Mn	5.0	5.0-10.0	> 10.0-20.0	> 20.0-30.0	> 30.0	10
有效铜 Available Cu	0.1	0.1-0.2	> 0.2-1.0	> 1.0-1.8	> 1.8	0.2
有效铁 Available Fe	5.0	5.0-7.0	> 7.0-10.0	> 10.0-15.0	> 15.0	7
有效锌 Available Zn	0.5	0.5-1.0	> 1.0-2.0	> 2.0-5.0	> 5.0	1

评价标准来源于“中国科学院微量元素组的土壤有效态微量元素评价指标”^[25-26]

The evaluation criteria was based on the “Evaluation of soil available trace element by trace element group of Chinese Academy of Science”^[25-26]

表 3 有机碳、全氮与有效态微量元素相关性

Table 3 Correlation between soil organic C, total N and available trace elements

坡向	指标	有效锰	有效铜	有效铁	有效锌
Slope aspect	Indicators	Available Mn	Available Cu	Available Fe	Available Zn
阴坡 Shady slope	有机碳 Organic C	0.778**	-0.766**	0.665*	0.757**
	全氮 Total N	0.757**	-0.647*	0.637*	0.744**
	有效锰 Available Mn	1.000	-0.755**	0.614*	0.814**
	有效铜 Available Cu		1.000	-0.618*	-0.599*
	有效铁 Available Fe			1.000	0.602*
	有效锌 Available Zn				1.000
阳坡 Sunny slope	有机碳 Organic C	0.436	0.648*	0.785**	0.657*
	全氮 Total N	0.337	0.617*	0.800**	0.648*
	有效锰 Available Mn	1.000	0.295	0.324	0.375
	有效铜 Available Cu		1.000	0.613*	0.778**
	有效铁 Available Fe			1.000	0.622*
	有效锌 Available Zn				1.000

*表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)，**表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)

*Correlation is significant at the $P < 0.05$ level (2-tailed); **Correlation is significant at the $P < 0.01$ level (2-tailed)

表 4 撂荒农耕地土壤有效态微量元素密度 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 变化Table 4 Change of soil available trace element density in abandoned croplands (Mean \pm SD)

撂荒年限 Abandoned year (a)	有效锰 Available Mn		有效铜 Available Cu		有效铁 Available Fe		有效锌 Available Zn	
	阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope	阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope	阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope	阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope
1	1.29 \pm 0.04	1.25 \pm 0.05	0.13 \pm 0.02	0.11 \pm 0.01	1.04 \pm 0.07	1.32 \pm 0.08	0.04 \pm 0.00	0.08 \pm 0.02
5	1.25 \pm 0.06	1.28 \pm 0.09	0.10 \pm 0.01	0.08 \pm 0.01	0.93 \pm 0.09	1.02 \pm 0.07	0.04 \pm 0.00	0.07 \pm 0.00
10	1.27 \pm 0.06	1.30 \pm 0.05	0.10 \pm 0.03	0.12 \pm 0.00	0.97 \pm 0.04	1.12 \pm 0.07	0.04 \pm 0.01	0.07 \pm 0.00
15	1.30 \pm 0.07	1.35 \pm 0.08	0.08 \pm 0.00	0.10 \pm 0.03	1.05 \pm 0.04	0.99 \pm 0.04	0.05 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00
20	1.35 \pm 0.09	1.30 \pm 0.08	0.08 \pm 0.01	0.12 \pm 0.03	1.13 \pm 0.06	0.89 \pm 0.03	0.07 \pm 0.01	0.06 \pm 0.01

3 讨论

3.1 撂荒农耕地土壤有机碳、全氮、微量元素含量变化

有机碳和全氮是土壤的重要组成部分,是表征土壤肥力的主要参数,在农田生态系统中发挥着重要的作用^[27]。Zhu^[28]、Wang^[29]等研究表明,坡耕地撂荒后前 10 年,土壤有机碳、全氮含量变化不明显,之后随恢复年限的延长呈增加趋势。本研究在阴坡发现了相同的现象。坡耕地撂荒前期,当初耕种过程对土壤机械破坏作用还没有完全消失,土壤植被群落多以一年生的草本植物为优势种,根系较小,且物种多样性和群落生物量较低^[30],对土壤的改良能力较小,因此该阶段土壤有机碳、全氮含量无显著变化。随着演替的进行,大量多年生物种逐渐替代一年生植物而成为群落优势种,其庞大的根系在土壤中的穿透和扎伸能力增强,土壤结构得到改善,而且丰富的根系分泌物不仅能够加强土壤颗粒间有机质的胶结作用,还能增加土壤中的碳、氮源^[11],因而有机碳和全氮在演替中后期随撂荒年限显著增加。土壤有效态微量元素的供给水平不仅影响其正常生长和发育,而且进一步作用于其产品的品质与产量,从而关系到人类的健康^[15]。土壤有效态微量元素主要集中在黏粒和粉粒之中^[26],坡耕地撂荒后,农田生态系统类型逐渐转变为草地生态系统,在植被演替过程中土壤颗粒组成不断细化^[31-32],黏粒和粉粒逐渐增加,这在一定程度上促进了有效态微量元素在土壤中的积累。在本研究中,阴坡土壤有效锰、有效铁和有效锌含量与有机碳变化趋势类似,表现为在演替 10 年无显著变化,之后随撂荒年限呈增加趋势,这也说明了恢复年限对于土壤有效态微量元素含量的影响较大,恢复时间的延长有利于以上 3 种

微量元素的恢复和增加,然而,有效铜含量则随恢复年限呈减低趋势。Kopittke 等^[33]研究认为,铜素在土壤中的有效性与植物本身的生理特性紧密相关,高含量的铜素往往会对植物的生长产生阻碍作用,植物则在长期的适应中通过自身的调节,例如沉淀、络合、降解、螯合等作用来减少对铜素的吸收利用。因此,在植被演替过程中,土壤有效铜含量降低是植物一种积极的环境适应方式,同时也说明了坡耕地撂荒对土壤质量的改善作用。

Wei 等^[34]研究发现在一定的有机质含量范围内,有机碳含量与微量元素的有效性有着显著的正相关关系。Chen、Kopittke 等研究表明^[33,35],不同形态的氮源会引起植物根际酸碱度的改变,进而会影响植物对有效铁、有效锰、有效铜、有效锌的吸收。可见,土壤中碳氮含量的多少与微量元素的有效性密切相。在本研究中,无论是阴坡还是阳坡,土壤有机碳和全氮均与有效铁和有效锌呈显著或极显著正相关,这说明土壤有机碳和全氮含量的升高在一定程度上会促进 Fe、Zn 在土壤中的有效性,土壤碳氮的增加使得 Fe、Zn 的有效性增强,从而提高植物对 Fe、Zn 的吸收利用。此外,各微量元素之间也相互影响,如阴坡有效锰与有效铁、有效锌两两之间呈显著正相关,阳坡有效铁与有效锌呈显著正相关,表明土壤微量元素之间相互影响,协同作用。阴坡有效铜与有效锰、有效铁之间呈显著负相关,表明有效铜与有效锰、有效铁之间存在拮抗作用。有拮抗作用的元素中一种元素升高时,会有相应的其他元素来抑制它的升高,这样就会导致一些有效态微量元素的缺乏^[36]。

3.2 不同坡向对土壤有机碳、全氮、微量元素含量的影响

黄土丘陵区坡耕地撂荒后微量元素变化趋势在不

同坡向上有很大差异。土壤有机碳、全氮、有效锰、有效铁及有效锌含量在阴坡上变化规律性较强，在演替前期无显著变化，之后随撂荒年限呈增加趋势，而在阳坡上则呈波动变化，这主要与不同坡向的水热条件有关。周萍等^[37]研究表明，坡耕地在自然恢复过程中，阴坡物种数目较阳坡高 40%，且群落物种类型也不同，这是由于阴、阳坡断面的光照不同，以及由此引起的土壤厚度和有机质含量、土壤水分条件等一系列生境的变化，是导致阳坡微量元素波动的因素。一般来说，阴坡由于蒸发量小，土壤含水量较大，植被生长旺盛，凋落物不断增加，促进了土壤有机碳、全氮的增加。同时，碳、氮的增加在一定程度上提高了微量元素的含量。相比于阴坡，阳坡土壤温度高，土壤水分蒸发量大，含水量较低，植被对于土壤水分的吸收竞争较为激烈，导致群落物种多样性、丰富度变化较大，从而引起土壤理化性质的波动。此外，在演替过程中，阴、阳坡的土壤有效态微量元素密度变化不同，阳坡土壤有效铁和有效锌密度在演替前 10 年均明显高于阴坡，而在 10 年后，显著低于阴坡。刘洪来等^[26]研究认为，土壤温度的上升将引起盐分向地表的垂直运动加快，提高表层土壤盐分含量和 pH 值，而土壤 pH 值的升高在一定程度上会促进微量元素的有效性及其在土壤中的积累。因此，在演替前期（前 10 年），阳坡较高的有效铁和有效锌密度与其较高的土壤温度有关，而在 10 年后，由于物种多样性及丰富度增加^[37]，植物对于水分的竞争逐渐激烈，阴坡较低的蒸发量使得土壤能够为植物提高足够的水分，而充足的水分有利于植物对微量元素的吸收^[38]，故 10 年后阳坡有效铁和有效锌低于阴坡。土壤有效铜密度在前 5 年略低于阴坡，5 年后明显高于阴坡，这可能与 Cu 离子本身的特性以及植物对其吸收利用的生理特征有关。

3.3 有效态微量元素含量评价以及微量元素密度变化

黄土丘陵区坡耕地撂荒 20 年后，虽然 4 种有效态微量元素含量有所提高，但仍处于低或极低水平。这是由于黄土丘陵区气候干旱少雨，植被稀少，而且土壤结构疏松，水土流失较为严重，土壤有效态微量元素含量较低，在一定程度上说明黄土丘陵区草本植被自然恢复还是一个比较缓慢的生态过程，因此改善黄土丘陵区土壤微量元素状况是一项长期而艰巨的任务。此外，土壤不同土层由于其密度的差异往往导致相同样地不同土层的微量元素含量差异较大，而采用

以上评价标准会造成不同土层的微量元素处于不同的等级，这将不利于土壤微量元素的综合评价，而通过计算土壤微量元素密度，即单位面积土壤所含微量元素的质量，可以全面、客观、有效的评价该地区土壤微量元素含量的丰缺。

4 结论

4.1 黄土丘陵区坡耕地撂荒后，不同坡向的土壤有效态微量元素变化差异显著。阴坡由于土壤温度较低，蒸发量小，含水量较大，植被生长旺盛，土壤有机碳、全氮、有效锰、有效铁、有效锌含量变化规律性较强，表现为在演替前期变化较小，而后期则均随撂荒年限的延长而显著增加，Cu 则随撂荒年限呈降低趋势。阳坡土壤有机碳、全氮及 4 种有效态微量元素含量则随年限呈波动变化。

4.2 不同演替阶段土壤微量元素密度变化不同，阳坡土壤有效铁和有效锌密度在演替前 10 年明显高于阴坡，而在 10 年后显著低于阴坡；有效铜密度在前 5 年略低于阴坡，5 年后明显高于阴坡。

4.3 坡耕地撂荒能够提高土壤微量元素含量，因此是黄土丘陵区生态恢复的一项重要措施之一，但是由于该地区的气候以及植被、土壤等因素，使得坡耕地撂荒 20 年后的土壤有效态微量元素含量仍处于低或极低水平，因此改善黄土丘陵区土壤微量元素状况可能还需要较长的恢复时间。

References

- [1] 张晓霞, 李占斌, 李鹏. 黄土高原草地土壤微量元素分布特征研究. 水土保持学报, 2010, 24(5): 45-48.
Zhang X X, Li Z B, Li P. Study on distribution characteristics soil trace elements of grass land in the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 45-48. (in Chinese)
- [2] 潘瑞炽, 董惠得. 植物生理学. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1995: 32-40.
Pan R C, Dong Y D. *Plant Physiology*. 3rd ed. Beijing: The Higher Education Press, 1995: 32-40. (in Chinese)
- [3] 缪自基. 微量元素的环境化学与生物影响. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
Miao Z J. *Environment Chemistry and Biological Effects of Microelements*. Beijing: China Environment Science Press, 1992. (in Chinese)
- [4] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展. 环境科学, 1996, 17(1): 89-92.

- Liu Q, Wang Z J, Tang H X. Research progress in heavy metal speciation and toxicity and bioavailability of heavy metals. *Environment Science*, 1996, 17(1): 89-92. (in Chinese)
- [5] White J G, Zasoski R J. Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research*, 1999, 60(1): 11-26.
- [6] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 370-449.
Shen S M. *Soil Fertility in China*. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 370-449. (in Chinese)
- [7] 刑光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学. 北京: 科学出版社, 2003: 1-72.
Xing G X, Zhu J G. *Soil Trace Element and Rare Earth Element Chemicals*. Beijing: Science Press, 2003: 1-72. (in Chinese)
- [8] Nielson D R, Bouma J. Soil spatial variability. Netherlands: Wageningen Agricultural University Library Pudoc-DLO, 1984: 166-193.
- [9] Rengel Z. Cycling of micronutrients in terrestrial eco-system// Marschner P, Rengel Z. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystem*. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 93-121.
- [10] Ballard T M. Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133: 37-42.
- [11] 李跃林, 彭少麟, 李志辉. 桉树人工林地土壤酶活性与微量元素含量的关系. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 345-348.
Li Y L, Peng S L, Li Z H. Relationship between soil enzyme activities and trace element contents in *Eucalyptus* plantation soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3): 345-348. (in Chinese)
- [12] 漆良华, 张旭东, 彭镇华, 范少辉, 周金星. 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. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 735-740.
Qi L H, Zhang X D, Peng Z H, Fan S H, Zhou J X. Soil microelements under different vegetation restoration patterns in yellow soil slope region of mid-subtropics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 735-740. (in Chinese)
- [13] 魏孝荣, 郝明德, 邵明安. 黄土高原旱地长期种植作物对土壤微量元素形态和有效性的影响. *生态学报*, 2005, 25(12): 3196-3203.
Wei X R, Hao M D, Shao M A. Effects of long-term cropping on the forms and the availability of micronutrients in dryland soils on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3196-3203. (in Chinese)
- [14] Cattani I, Fragoulis G, Boccelli R, Capri E. Copper bioavailability in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.) grown in two Italian soils. *Chemosphere*, 2006, 64(11): 19720-1979.
- [15] 李鹏, 李占斌, 张晓霞, 杜田. 复垦土地土壤有效微量元素分布特征研究. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 126-130.
Li P, Li Z B, Zhang X X, Du T. Study on the distribution characteristics of soil available trace elements of restoration land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 126-130. (in Chinese)
- [16] Chopin E, Marin B, Mkoungafoko R, Rigaux A, Hopgood M J, Delannoy E, Cancès B, Laurina M. Factors affecting distribution and mobility of trace elements (Cu, Pb, Zn) in a perennial grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the champagne region of France. *Environment Pollution*, 2008, 156(3): 1092-1098.
- [17] An S S, Huang Y M, Zheng F L. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 286-292.
- [18] 戴全厚, 薛蕙, 刘国彬, 兰雪, 余娜, 杨智. 侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量的协同效应. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1390-1399.
Dai Q H, Xue S, Liu G B, Lan X, Yu N, Yang Z. The synergistic effect between vegetation recovery and soil quality on abandoned arable land in eroded hilly loess plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(5): 1390-1399. (in Chinese)
- [19] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2): 66-70.
An S S, Zhang Y, Zheng F L. Fractal dimension of the soil aggregate and its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 66-70. (in Chinese)
- [20] 李金芬, 程积民, 刘伟, 古晓林. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征. *草地学报*, 2010, 18(5): 661-668.
Li J F, Chen J M, Liu W, Gu X L. Distribution of soil organic carbon and total nitrogen of grassland in Yunwu Mountain of Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(5): 661-668. (in Chinese)
- [21] 薛蕙, 刘国彬, 戴全厚, 张超, 余娜. 黄土丘陵区退耕撂荒地土壤微生物量演变过程. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 943-950.
Xue S, Liu G B, Dai Q H, Zhang C, Yu N. Dynamics of soil microbial biomass on the abandoned cropland in loess hilly area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 943-950. (in Chinese)
- [22] 余存祖, 彭琳, 刘耀宏, 戴铭钧, 彭祥林. 黄土区土壤微量元素含量分布与微肥效应. *土壤学报*, 1991, 28(3): 317-326.
Yu C Z, Peng L, Liu Y H, Dai M J, Peng X L. Content and distribution of trace elements and fertility efficiency in soils of loessal region. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(3): 317-326. (in Chinese)
- [23] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978: 34-88.

- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Method for Measuring Physical Properties of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 34-88. (in Chinese)
- [24] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 142(3): 184-194.
- [25] 王德宣, 富德义. 吉林省西部地区土壤微量元素有效性评价. *土壤*, 2002(2): 86-89.
Wang D X, Fu D Y. Evaluation of soil trace elements availability in Western Jilin province. *Soils*, 2002(2): 86-89. (in Chinese)
- [26] 刘洪来, 杨丰, 黄顶, 等. 农牧交错带草地开垦对土壤有效态微量元素的影响及评价. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 155-160.
Liu H L, Yang F, Huang D, Chen C. Effect and evaluation of soil trace elements after grassland converted into cropland in agro-pasture ecotone of northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7): 155-160. (in Chinese)
- [27] Romheld M, Zhang F S. Mobilization of mineral nutrients in the rhizosphere. *Soil Science*, 1990, 15(2): 158-163.
- [28] Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Soil erodibility, microbial biomass, and physical-chemical property changes during long-term natural vegetation restoration: a case study in the Loess Plateau, China. *Ecological Research*, 2010, 25(3): 531-541.
- [29] Wang B, Liu G B, Xue S, Zhu B B. Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau. *Environmental Earth Science*, 2010, 62(5): 915-925.
- [30] Zhang C, Liu G B, Xue S, Zhang C S. Rhizosphere soil microbial properties on abandoned croplands in the Loess Plateau, China during vegetation succession. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 50: 127-136.
- [31] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征. *草地学报*, 2008, 16(4): 396-402.
Zhou P, Liu G B, Hou X L. Study on fractal features of soil microaggregates during different restoration stages in the Loess Hilly Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(4): 396-402. (in Chinese)
- [32] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 薛蕙. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变. *西安理工大学学报*, 2009, 25(4): 377-382.
Zhu B B, Li Z B, Li P, Xue S. Research on the fractal features of soil aggregate, and dynamic changes in anti-erodibility during the process of vegetation recovery on the loess hilly areas. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(4): 377-382. (in Chinese)
- [33] Kopitke P M, Menzies N W. Effect of Mn deficiency and legume inoculation on rhizosphere pH in highly alkaline soils. *Plant and Soil*, 2004, 262(1): 13-21.
- [34] Wei X R, Hao M D, Shao M A, Gale W J. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil Tillage Research*, 2006, 91(2): 120-130.
- [35] Chen Y L, Han S J, Zou C J, Zhou Y M. The pH change in rhizosphere of *Pinus koraiensis* seedlings as affected by different nitrogen sources and its effect on phosphorus availability. *Journal of Forestry Research*, 2001, 12(4): 247-249.
- [36] 刘铮, 朱其清, 唐丽华, 徐俊祥. 我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布. *土壤学报*, 1982, 19(3): 209-214.
Liu Z, Zhu Q Q, Tang L H, Xu J X. Geographical distribution of trace elements-deficient soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19(3): 209-214. (in Chinese)
- [37] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性研究. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 67-73.
Zhou P, Liu G B, Hou X L. Biomass and species diversity of herb at different position and aspects of slope in the Hilly-gully Region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 67-73. (in Chinese)
- [38] 朱先进, 宇万太. 农田生态系统微量元素循环研究进展. *土壤通报*, 2009, 40(4): 962-967.
Zhu X J, Yu W T. Review of the cycling of trace elements in agroecosystems. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 962-967. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)