

# 光伏电站土壤微量元素有效含量 化学计量对植被恢复的响应

武燕<sup>1</sup>, 刘美英<sup>1</sup>, 赵文静<sup>1</sup>, 赵彬<sup>1</sup>, 兴安<sup>1</sup>, 卢立娜<sup>2</sup>

(1.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室/农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2.鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯市 017000)

**摘要:** [目的] 探究光伏电站不同植被类型下土壤有效微量元素含量及化学计量比, 旨在为加速西部干旱区光伏电站植被恢复提供理论依据。[方法] 以内蒙古自治区呼和浩特市默特左旗光伏农林牧示范基地4种不同植被类型下的土壤为研究对象, 分析不同植被土壤有效微量元素及其生态化学计量。选取天然植被、樟子松、黄芪、苜蓿4个不同植被类型测定0—20, 20—40 cm土层养分状况。[结果] ①在4种植被类型中, 土壤微量元素有效含量存在显著差异, 且微量元素有效含量均较低。②4种植被类型下, 土壤微量元素有效含量表现为: 黄芪样地>苜蓿样地>樟子松样地>天然植被样地。③研究区土壤微量元素有效含量化学计量为: Fe:Mn为0.96, Fe:Cu为31.95, Fe:Zn为4.07, Mn:Cu为33.50, Mn:Zn为4.30, Cu:Zn为0.15。④研究区土壤微量养分表现为Fe, Mn, Cu缺乏, 且Fe元素为主要的微量元素限制因子, Mn, Cu元素为次要限制因子。[结论] 在该区域进行植被恢复的同时, 要适当添加微肥, 在一定程度上可提高土壤肥力, 并为研究区植被恢复提供更充足的微量养分。

**关键词:** 光伏电站; 植被恢复; 微量元素; 化学计量比

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)06-0039-07

**中图分类号:** S158.3, TM615

**文献参数:** 武燕, 刘美英, 赵文静, 等. 光伏电站土壤微量元素有效含量化学计量对植被恢复的响应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 39-45. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.005; Wu Yan, Liu Meiyong, Zhao Wenjing, et al. Response of available soil trace element stoichiometry to vegetation restoration in photovoltaic power station [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 39-45.

## Response of Available Soil Trace Element Stoichiometry to Vegetation Restoration in Photovoltaic Power Station

Wu Yan<sup>1</sup>, Liu Meiyong<sup>1</sup>, Zhao Wenjing<sup>1</sup>, Zhao Bin<sup>1</sup>, Xing An<sup>1</sup>, Lu Lina<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource/Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 2. Development Center of Forestry and Grassland in Ordos, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** [Objective] The content and stoichiometric ratio of available trace elements in soil under different vegetation types in photovoltaic power plants were explored to provide a theoretical basis for accelerating the vegetation restoration of photovoltaic power stations in arid areas of Western China. [Methods] The soil of four vegetation types in the photovoltaic agriculture, forestry and animal husbandry demonstration base of Tumd Left Banner in Hohhot City, Inner Mongolia was taken as the research object, and the available trace elements and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation soils were analyzed. Four vegetation types, namely natural vegetation, *Pinus sylvestris*, *Astragalus membranaceus*, and *Medicago*

收稿日期: 2024-05-08

修回日期: 2024-07-31

资助项目: 内蒙古自然科学基金项目“光伏电站土壤碳氮养分转化提升机制对植被恢复的响应”(2022MS04013); 内蒙古农业大学基本科研业务费项目(BR22-13-04)

第一作者: 武燕(1998—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠土壤资源利用。Email: wuyan@emails.imau.edu.cn.

通信作者: 刘美英(1974—), 女(汉族), 内蒙古自治区清水河县人, 教授, 硕士, 主要从事土壤肥力与植物营养方面的研究。Email: liumeiyongimau@163.com.

sativa, were selected to determine the nutrient status of the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers. [Results] ① There were significant differences in the soil available trace elements among the four vegetation types, and the content of available trace elements was low. ② For the four vegetation types, the content of available trace elements in soil followed the order *A. membranaceus* plot > *M. sativa* plot > *P. sylvestris* plot > natural vegetation plots. ③ The chemical ratios of the soil trace element effective contents in the study area were 0.96, 31.95, 4.07, 33.50, 4.30 and 0.15 for Fe : Mn, Fe : Cu, Fe : Zn, Mn : Cu, Mn : Zn and Cu : Zn, respectively. ④ The soil trace nutrients in the study area were Fe, Mn, and Cu deficiencies; Fe was the main trace element limiting factor, and Mn and Cu were secondary limiting factors. [Conclusion] At the same time as vegetation restoration in this area, it is necessary to add micro-fertilizer appropriately, which can improve soil fertility to a certain extent and provide sufficient micronutrients for vegetation restoration in the study area.

**Keywords:** photovoltaic power station; vegetation restoration; trace elements; stoichiometric ratio

太阳能被称为可再生绿色能源,具有分布广、可再生等优点,使得光伏电站的规模和数量在全球范围内迅速增加。中国太阳能资源分布不均匀,由西北向东南递减,干旱地区的太阳能发电潜力巨大,土地资源丰富,除此之外干旱地区的太阳辐射也远高于其他地区。但是这些干旱地区生态环境脆弱,极易受到不当人为开发活动的影响,扰动后恢复过程困难重重<sup>[1]</sup>。内蒙古地区地域辽阔,气候干燥,这里拥有较长的日照时间,太阳能资源条件优越,为光伏产业发展创造了条件,但是光伏电站建设中要进行植被清除、土地平整、土壤压实和修建通道等对原有地表造成改变<sup>[2]</sup>。这些改变导致土壤物理、化学和生物特性发生变化,还会使土壤水分和养分的动态平衡发生改变<sup>[3]</sup>。因此,为构建生态文明建设,推进“绿水青山就是金山银山”的可持续发展理念,缓解太阳能光伏电站安装运营对生态环境带来影响。要在光伏电站场地进行一系列植被恢复工作,这些植被是构成功能性生态系统的基础,并为自然生态系统提供了足够的空间,有助于其稳定<sup>[4]</sup>。

微量元素对维持陆地生态系统的长期健康和稳定非常重要,参与土壤生物地球化学过程<sup>[5]</sup>。土壤微量元素(Fe, Mn, Cu, Zn)作为植物正常生长发育必需元素,在植物生长发育过程中具有重要意义<sup>[6]</sup>。微量元素还是维持影响植物生长发育的关键因素之一——土壤肥力,在土壤肥力和作物产量方面发挥重要作用<sup>[7]</sup>。有研究表明,植物在大量元素供应充分的条件下,其产量、品质的限制因素将会是微量元素的供给程度<sup>[8]</sup>。除此之外,微量元素的缺乏还会限制土壤生产力、稳定性和可持续性<sup>[9]</sup>。Feng Zhaohong等<sup>[10]</sup>发现,天然草地比油松林地更有利于提高黄土性土壤有效态微量元素的含量。刘向等<sup>[11]</sup>的研究表明,微量元素在促进植被生长过程中具有不可替代的作用。由于微量元素是决定土壤肥力的重要指标,并在植物生长过程具有重要作用,因此微量元素化学计量指标的拓展能够对土壤养分限制状况进行指示,利于

土壤养分的管理<sup>[12]</sup>。目前,国内外对于不同植被类型微量元素的含量研究较少<sup>[10]</sup>,而对于土壤微量元素化学计量的研究主要在干旱草甸草原<sup>[10,13-14]</sup>、人工林地等方面<sup>[15]</sup>。基于此,研究光伏电站区域生态系统不同植被类型下土壤微量元素含量以及化学计量特征,对干旱区光伏电站进一步治理植被恢复具有重大意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼和浩特市土默特左旗大有光能源 30 MWp 光伏电站,地处内蒙古自治区呼和浩特市(110°47'N, 40°36'E)。气候类型属于温带大陆性季风气候,常年干燥,年均降雨量(399 mm)小于年均蒸发量(1 870 mm),风沙发生比较频繁。研究区土壤是潮土,质地为砂土,土壤养分含量不高,并且土壤保水保肥能力差,易受到水力以及风力的侵蚀。电场在 2013 年 1 月并网运营,至今已经有 10 a 的时间,电站开始运营后,对场区内受到扰动的土地进行平整,并在太阳能光伏电板之间人工种植樟子松(*Pinus sylvestris*)、黄芪(*Astragalus membranaceus*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等,此外还有天然生长的植被,所有植被只进行灌溉,不进行施肥。每行电板阵列间距均为 10 m,光伏电板过道的植被每年都会在秋季进行修剪,在电板前檐分割出 2.5 m 防火隔离带,以防止火灾发生。

### 1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理,每个植被类型为一个处理,对应为天然植被、樟子松、黄芪、苜蓿植被恢复区 4 个处理,其中天然植被区是为了对比人工植被恢复的效果,是自然生长的植被,主要物种包括黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、羊草(*Leymus chinensis*)等。整个试验采取随机区组设计,每个处理 3 个重复,共有 12 个样地,土壤样本采集点为光伏阵列间(列间)植被生长区域。4 种植被类型选择的样地均具有一致的地理特征,植被类型播

种方式各异,其中樟子松的种植方式为植苗,且每年只修剪下部的枯枝,长到高度超出光伏板会更新重新栽植,苜蓿和黄芪种植方式是种子直播,苜蓿每年刈割2~3次(牧草用于光伏区养殖),黄芪生长3 a后采收根部然后重新人工更新种植,苜蓿4 a后重新人工更新种植。天然植被区域是电站建成后自然生长的植被(作为和人工建植植被进行对比),研究区土壤性质为有机质含量11.07~13.77 g/kg,全氮含量0.38~0.50 g/kg,全磷含量0.26~0.35 g/kg。4种不同植被恢复区养分含量差异不显著。

### 1.3 样品采集与测定

土壤样品于2023年6月中进行采集。于太阳能光伏板间选取具有代表性4个的植被样地,即人工种植的樟子松、黄芪、苜蓿和作为对照的天然植被。在不同植被类型样地的3个小区内采集土壤,先将每个小区表面的枯枝落叶清理掉,分别在0—20,20—40 cm层次上按照“S”型的取样方式进行多点取样,混合为一个土样,装入土样袋进行保存。土壤有效微量元素的测定使用DTPA浸提剂通过原子分光光度计进行测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

运用SPSS 26.0进行单因素方差分析(one-way ANOVA),用Origin 2022(correlation analysis)进行相关性分析。

## 2 结果与分析

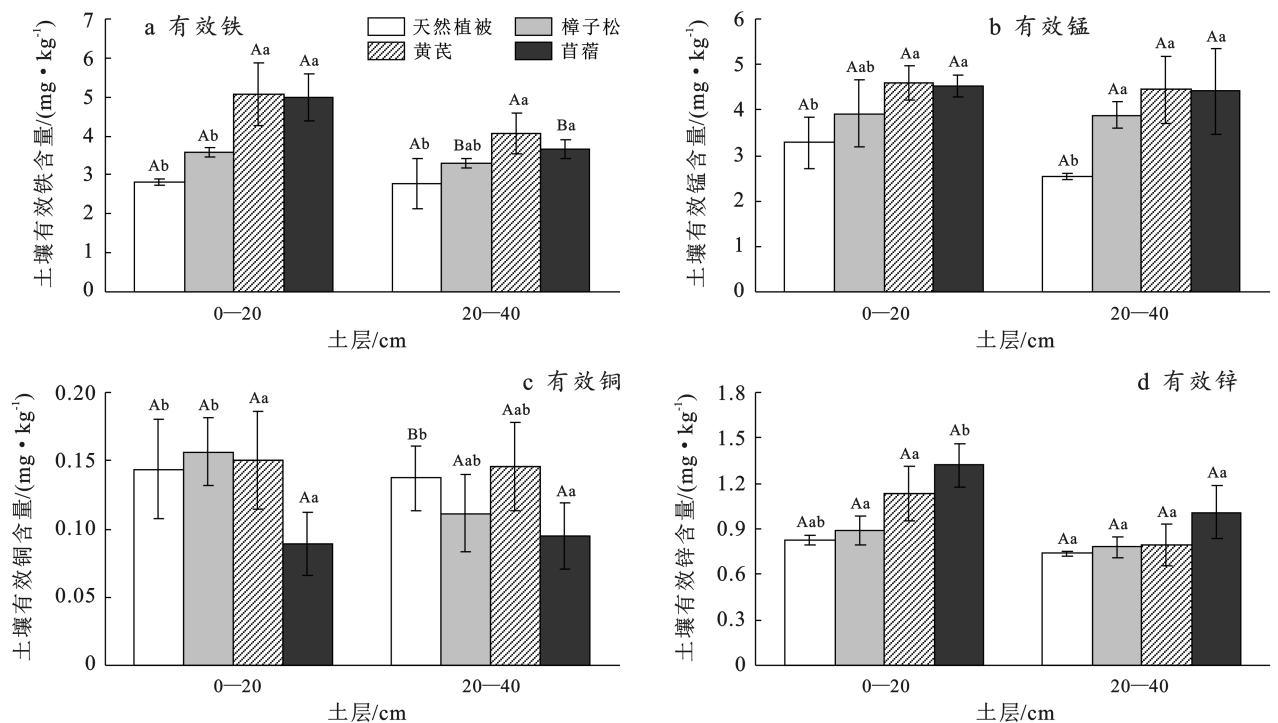
### 2.1 不同植被类型土壤有效铁、锰、铜、锌含量

研究区不同植被类型下土壤有效铁锰铜锌的含量见图1。土壤有效铁锰铜锌含量在不同植被类型下存在一定差异。

4种植被类型土壤有效铁含量变化范围为2.76~5.06 mg/kg,上下土层样地土壤有效铁含量按照从大到小的规律进行排序分别为:黄芪>苜蓿>樟子松>天然植被,其中黄芪样地、苜蓿样地显著高于樟子松、苜蓿样地( $p<0.05$ )。土壤有效锰含量在2.54~4.60 mg/kg范围之间变化,四种植被类型中,上下土层样地有效锰含量按从大到小顺序依次为:黄芪>苜蓿>樟子松>天然植被。

各个植被类型土壤有效锌含量变化范围为0.74~1.32 mg/kg,其中苜蓿样地有效锌较天然植被样地显著增加( $p<0.05$ ),且上下土层样地有效锌含量变化顺序按照从小到大规模均为:苜蓿>黄芪>樟子松>天然植被。

天然植被、樟子松、黄芪、苜蓿4个样地上下土层土壤有效铜含量均为苜蓿样地最低,其含量变化范围为0.09~0.17 mg/kg。表土层中苜蓿样地土壤有效铜含量较樟子松、黄芪样地显著降低( $p<0.05$ ),但底土层不存在显著差异。



注:不同大写字母表示相同植被类型不同土层差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示同一土层不同植被类型差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图1 光伏电站不同植被类型土壤有效微量元素含量变化

Fig.1 Changes of soil available trace element content in different vegetation types of photovoltaic power station

## 2.2 不同植被类型铁、锰、铜、锌化学计量特征

研究区不同植被类型下土壤有效铁锰铜锌化学计量比见图 2。4 种植被类型土壤有效 Fe : Mn 变化范围为 0.86~1.10, 樟子松、黄芪、苜蓿样地有效 Fe : Mn 均为 0—20 cm 高于 20—40 cm, 4 种植被类型之间, 以及上下土层间土壤有效 Fe : Mn 均无显著差异。各个样地 0—20 与 20—40 cm 土壤有效 Fe : Cu 不存在显著差异, 且有效 Fe : Cu 在 20.02~55.79 之间变化。其中苜蓿样地的上下土层有效 Fe : Cu 显著高于天然植被样地 ( $p < 0.05$ )。天然植被、樟子松、黄芪、苜蓿样地 4 个样地土壤有效 Fe : Zn 变化范围为 3.41~5.17。4 种植被类型上下土层有效 Fe : Zn 变化顺序按照从大到小的规律依次为: 黄芪样地 >

樟子松样地 > 苜蓿样地 > 天然植被样地, 且黄芪样地有效 Fe : Zn 较天然植被、苜蓿样地均差异显著 ( $p < 0.05$ )。不同植被类型在 0—20, 20—40 cm 土层中, 土壤有效 Mn : Cu 在 18.95~52.95 范围内变化, 且各个样地表土层的土壤有效 Mn : Cu 均高于底土层。4 种植被类型中, 苜蓿样地显著高于天然植被 ( $p < 0.05$ )。各个样地土壤有效 Mn : Zn, Cu : Zn 的变化范围分别为 3.44~5.62, 0.07~0.19, 其中 0—20 cm 土层中 4 种植被类型有效 Mn : Zn 无显著差异, 而天然植被、樟子松样地土壤有效 Cu : Zn 较黄芪、苜蓿样地有显著差异; 20—40 cm 土层中, 有效 Mn : Zn 与有效 Cu : Zn 的黄芪样地较苜蓿样地有显著的提高 ( $p < 0.05$ )。

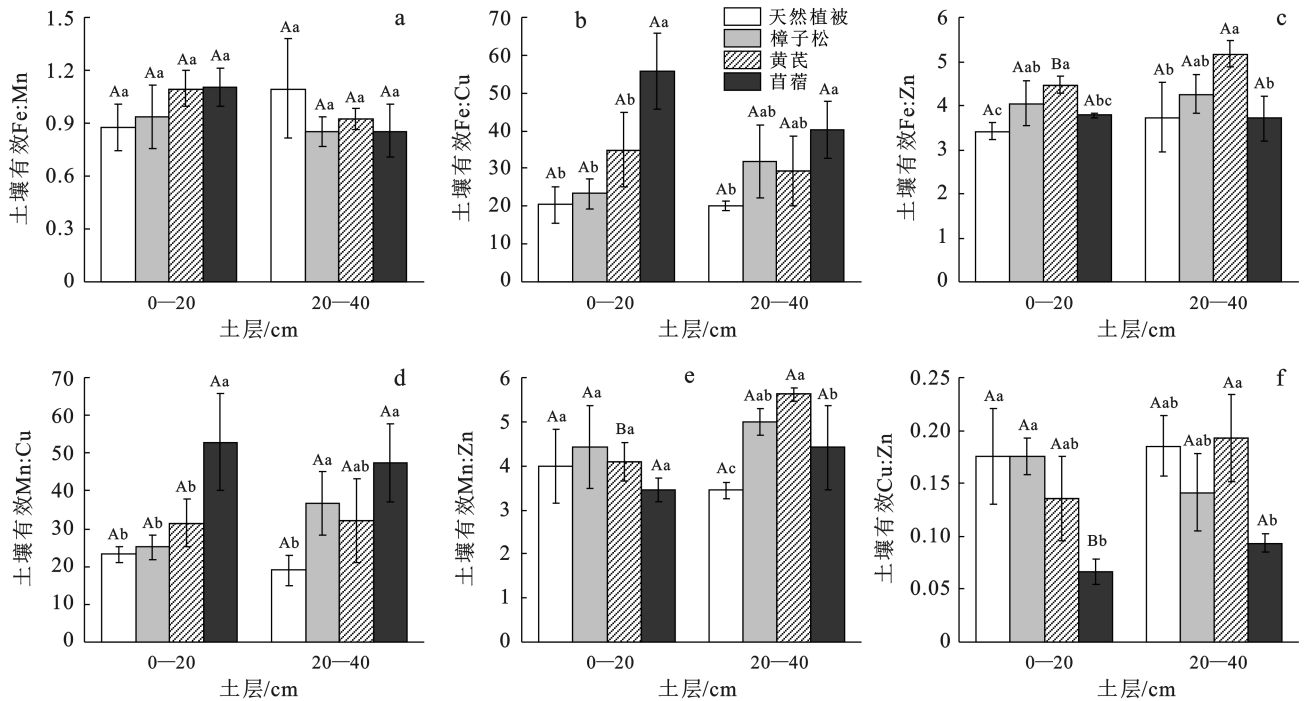


图 2 光伏电站不同植被类型土壤微量元素化学计量特征变化

Fig.2 Changes of soil trace element stoichiometry characteristics of different vegetation types in photovoltaic power station

## 2.3 不同植被类型土壤有效铁锰铜锌与土壤养分的相关性分析

研究区不同植被类型 0—20 cm 土层土壤有效铁锰铜锌与土壤性质相关性分析如图 3 所示。4 个样地的土壤有效铁与速效磷、速效钾、全磷呈极显著正相关, 其相关系数分别为 0.86, 0.85, 0.56 ( $p < 0.01$ ); 与有机碳显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 其相关系数为 0.64; 与 pH 值极显著负相关。土壤有效锰与速效钾、有机碳、全磷的相关系数分别为 0.73, 0.71, 0.83, 且呈极显著相关性 ( $p < 0.01$ ); 与速效磷呈显著正相关, 相关系数为 0.65 ( $p < 0.05$ )。土壤有效铜与土壤性质均无显著相关性。土壤有效锌与速效钾、速效磷呈极显著正

相关 ( $p < 0.01$ ), 与全氮呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 相关系数分别为 0.77, 0.80, 0.65。上述结果表明不同植被类型土壤有效铁锰铜锌与土壤性质之间联系密切, 此外, 土壤有效铁与土壤有效锰、土壤有效锌呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 有效锰与有效锌呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )。

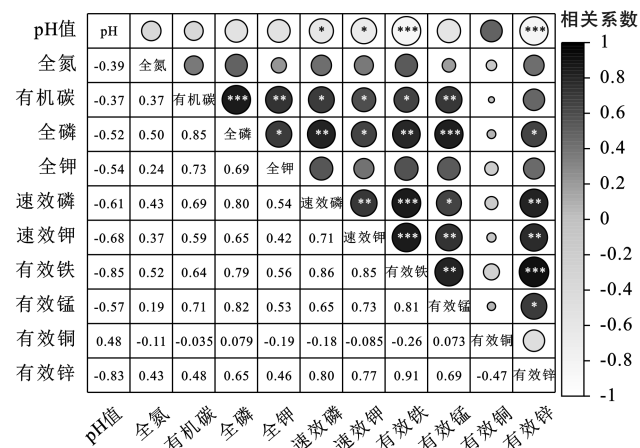
## 3 讨论

### 3.1 植被恢复模式对土壤有效微量元素的影响

土壤微量元素 (Fe, Mn, Cu, Zn) 低浓度时对植物生长和生态功能起至关重要的作用, 其中 Fe 在植物的固氮、呼吸、光合作用等过程中发挥重要作用, Mn



是所有高等植物中许多酶的重要辅助因子,Zn 在植物中能发挥关键的催化、调节作用,Cu 是许多酶和辅酶的重要组成部分<sup>[17]</sup>。植被恢复可影响土壤团聚体稳定性、改善土壤结构,并提高植被自身生产力<sup>[18-19]</sup>。光伏电站土壤有效微量元素含量变化趋势在不同植被下存在差异,本研究表明土壤有效铁、锰、锌含量在不同植被类型下变化规律较大,其中天然植被样地中 3 种有效元素均为最低,有效铁、有效锰含量在黄芪样地较高,有效锌在苜蓿样地较高。有效铜呈波动变化,上下土层之间变化不一致。这与 Feng Zhaohong 等<sup>[10]</sup>在天然草地中团聚体水平上的有效微量元素变化的研究结果相似。这可能是由于不同植被类型下受土壤理化性质的影响以及不同气候条件引起的土壤、生物和植物中矿物的风化分解速率不同,使得不同植被类型土壤有效微量元素含量存在差异<sup>[20]</sup>。一般来说,不同植被类型会因为植被自身生长条件、生长环境的不同以及人为扰动等情况,导致其植被生物量、凋落物分解速率、养分归量发生差异,导致不同植被类型土壤养分含量存在差异<sup>[21]</sup>。黄芪样地土壤有效微量元素含量整体上较高,可能是因为黄芪具有发达的根系,根瘤根系较多,且植被恢复多年,恢复区植物多样性逐渐增加,表土层凋落物亦随之增多,枯落物被微生物分解使得土壤微量元素含量逐渐积累。



注: \* 为  $p < 0.05$ ; \*\* 为  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ 。

图 3 土壤有效铁锰铜锌与土壤性质的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between soil available iron, manganese, copper, and zinc and soil physical and chemical properties

此外,由于土壤有效铁锰锌与土壤全氮、全磷、全钾呈正相关,因此在不同植被凋落物促进土壤养分过程中,也在一定程度上提高了土壤有效铁锰锌的含量。在本研究中,随土层加深,土壤有效铁锰铜锌含量呈减少趋势。这与陈超等<sup>[22]</sup>和张珊珊等<sup>[23]</sup>的研究结论一致。同时,根据全国第二次土壤养分含量普

查分级标准所知<sup>[24]</sup>,研究区不同植被类型样地土壤有效 Fe,Mn,Cu 含量较低,属于缺乏水平,而各样地有效 Zn 均值含量为中等水平。这可能是由于干旱地区土壤粘土含量和土壤 pH 值关系<sup>[25]</sup>,导致研究区土壤有效微量元素含量较低。同时,研究区植被恢复年限短,各恢复区地上部生物量少,枯萎及脱落的叶片等凋落物归还土壤的养分量少。

### 3.2 植被恢复模式对土壤微量元素有效含量化学计量特征的影响

土壤微量元素有效含量较低,相应的植物缺乏进而导致植物群落生产力降低,足够的微量元素含量和相对稳定的微量元素比例(化学计量平衡)才能使植被健康生长<sup>[17]</sup>。铁和锰是植物发育的关键金属营养元素,这些养分的有效部分含量可能不足或多余,导致植物养分的不足或丰富,因此,土壤有效铁、锰显著影响植物的生长发育<sup>[26]</sup>。此外,保持适当的有效 Fe : Mn 比例对植物健康至关重要,因为较低的比例可能意味着植物遭受铁缺乏和锰毒<sup>[14]</sup>。从本研究结果来看,黄芪样地 Fe : Mn 要略高于天然植被、樟子松、苜蓿样地,但 4 种植被类型间无显著差异,4 种植被恢复措施 Fe : Mn 均较低。据 Wang Ruzhen 等<sup>[27]</sup>研究结果,发现土壤酸化加速了土壤有机质和矿物质的矿化和解吸,有利于增加土壤  $Fe^{2+}$  和  $Mn^{2+}$  含量。而研究区  $Fe^{2+}$  和  $Mn^{2+}$  含量低,可能是因为该地区 pH 值偏高,为碱性土壤。此外,还发现土壤  $Fe^{2+}$  和  $Mn^{2+}$  之间的拮抗关系也引发了土壤 Fe : Mn 比值的变化<sup>[26-27]</sup>。根据之前研究发现,强碱性土壤环境会对养分有效性产生不利影响,从而导致 Fe,Mn,Cu,Zn 的缺乏,进一步影响植物的营养状态和化学计量比<sup>[28-29]</sup>。根据在内蒙古草原森林交错地带<sup>[30]</sup>,以及半干旱半湿润的松嫩平原<sup>[16]</sup>研究结果,发现本试验 4 种植被类型下土壤有效 Fe : Mn(0.86~1.10),Fe : Cu(20.02~55.79),Fe : Zn(3.41~5.17),Mn : Zn(3.44~5.62),Cu : Zn(0.07~0.19)均较小,Mn : Cu(18.95~52.95)则较高。低的微量元素化学计量比意味着研究区土壤有效 Fe,Mn 较低,高 Mn : Cu,低 Cu : Zn 表明土壤有效 Cu 不高。这表明研究区土壤有效 Fe,Mn,Cu 元素含量低,制约着不同植被的生长。综上所述,光伏电站不同植被类型下 Fe 元素为主要的土壤微量养分限制因子,而 Mn,Cu 元素为次要的限制因子。

## 4 结论

研究区 4 种植被类型土壤有效微量元素存在显著差异。整体上表现为黄芪样地最高(有效铁、锰、铜、锌含量分别为 4.56,4.52,0.15,0.96 mg/kg),苜蓿

样地次之,然后是樟子松样地,最后是天然植被样地,但4种植被类型下土壤有效微量元素含量均较低。

土壤有效铁与有效锌、有效锰、全磷、速效钾、速效磷呈极显著正相关,与有机碳呈显著正相关;土壤有效锰与有效锌、速效钾、有机碳、全磷呈极显著正相关,与速效磷呈显著正相关;土壤有效锌与速效磷、速效钾呈极显著正相关,与全氮呈显著正相关。

研究区土壤微量养分表现为Fe, Mn, Cu缺乏,且Fe元素为主要的微量元素限制因子,而Mn, Cu元素为次要的限制因子。

## 参考文献 (References)

- [1] Luo Lihui, Zhuang Yanli, Liu Hu, et al. Environmental impacts of photovoltaic power plants in Northwest China [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 56: 103120.
- [2] Hernandez R R, Easter S B, Murphy-Mariscal M L, et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 766-779.
- [3] Choi C S, Cagle A E, Macknick J, et al. Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 140.
- [4] Uldrijan D, Kováčiková M, Jakimiuk A, et al. Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 168: 106274.
- [5] Niu Guoxiang, Wang Ruzhen, Hasi M, et al. Availability of soil base cations and micronutrients along soil profile after 13-year nitrogen and water addition in a semi-arid grassland [J]. *Biogeochemistry*, 2021, 152(2): 223-236.
- [6] 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[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 45-48.  
Zhang Xiaoxia, Li Zhanbin, Li Peng. Study on distribution characteristics soil trace elements of grass land in the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 45-48.
- [7] Yadav M, Jadav N J, Kumar D, et al. Influence of nutrient management practices on dtpa soil micronutrients and its relation with soil pH and cation exchange capacity in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) cultivated soils of Western India [J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2022: 105-111.
- [8] 魏明宝, 魏丽芳, 胡波, 等. 长期施肥对土壤微量元素的影响进展研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(22): 11951-11953, 12018.  
Wei Mingbao, Wei Lifang, Hu Bo, et al. Advances on the effects of long-term fertilization of micro-elements in soil [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(22): 11951-11953, 12018.
- [9] Dhaliwal S S, Naresh R K, Mandal A, et al. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2019, 1: 100007.
- [10] Feng Zhaohong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Effects of freeze-thaw cycles and soil moisture content on soil available micronutrients on aggregate scale in natural grassland and chinese pine forestland on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(11): 4023-4033.
- [11] 刘向, 张鹏, 刘建全. 无机肥料是青海塔拉滩光伏电站植被恢复过程中的限制性因子[J]. *生物多样性*, 2022, 30(5): 29-36.  
Liu Xiang, Zhang Peng, Liu Jianquan. Inorganic fertilizers are limiting factors of vegetation restoration of Qinghai Tala Shoal Photovoltaic Power Station [J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(5): 29-36.
- [12] 喻阳华, 钟欣平, 王颖. 喀斯特高原峡谷区土壤大/中/微量元素生态化学计量特征[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(9): 2068-2072.  
Yu Yanghua, Zhong Xinping, Wang Ying. Ecological stoichiometric characteristics of macro-element, secondary-element and micro-element in soil in valley area of Karst Plateau [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(9): 2068-2072.
- [13] Richardson J B, Petrenko C L, Friedland A J. Base cations and micronutrients in forest soils along three clear-cut chronosequences in the Northeastern United States [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 109(2): 161-179.
- [14] Yin Jinfei, Wang Ruzhen, Liu Heyong, et al. Nitrogen addition alters elemental stoichiometry within soil aggregates in a temperate steppe [J]. *Solid Earth*, 2016, 7(6): 1565-1575.
- [15] Wang Shengqiang, Zhou Pengyu, Luo Bing, et al. Stoichiometric characteristics of medium-and micro-elements (Ca, Mg, Fe and Mn) in soil aggregates as affected by stand age in Chinese fir plantations [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(18): 3991-4003.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] Li Yuefen, Gong Heyang, Li Shujie, et al. Ecological stoichiometry homeostasis of six microelements in

- Leymus chinensis* growing in soda saline-alkali soil [J]. Sustainability, 2020,12(10):4226.
- [18] 邓蕾,刘玉林,李继伟,等.植被恢复的土壤固碳效应:动态与驱动机制[J].水土保持学报,2023,37(2):1-10.  
Deng Lei, Liu Yulin, Li Jiwei, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: Dynamics and its driving mechanisms [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):1-10.
- [19] 姚珂涵,肖列,李鹏,等.冻融循环次数和土壤含水率对油松林土壤团聚体及有效态微量元素的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):259-266.  
Yao Kehan, Xiao Lie, Li Peng, et al. Effects of freeze-thaw cycle times and soil moisture content on soil aggregates and available trace elements in chinese pine forest soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):259-266.
- [20] 赵串串,王媛,高瑞梅.青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):130-135.  
Zhao Chuanchuan, Wang Yuan, Gao Ruimei. Soil trace element abundance in different forest types at the loess hilly region of Qinghai Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(3):130-135.
- [21] 高志娅,李欢,陈威锋,等.不同植被类型土壤养分及生态化学计量特征研究[J].江苏林业科技,2023,50(2):26-32.  
Gao Zhiya, Li Huan, Chen Weifeng, et al. Soil nutrient and ecological stoichiometric characteristics of three different vegetation types [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2023,50(2):26-32.
- [22] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(7):230-237.
- [23] 张珊珊,毛云玲,冯志伟,等.云南松林下干巴菌生长土壤的理化性质及有效态微量元素特征[J].西部林业科学,2020,49(6):35-42, 53.  
Zhang Shanshan, Mao Yunling, Feng Zhiwei, et al. Physicochemical properties and available microelement characteristics of soil for the growth of *Thelephora ganbajun* under *Pinus yunnanensis* forest [J]. Journal of West China Forestry Science, 2020,49(6):35-42,53.
- [24] 王冰洁,王楠,侯博洋,等.东北地区典型农田土壤微量元素丰缺程度调查与分析[J].吉林农业科技学院学报,2021,30(4):5-8,14.  
Wang Bingjie, Wang Nan, Hou Boyang, et al. Investigation and analysis of abundance or deficiency of trace elements in typical farmland soils in Northeast China [J]. Journal of Jilin Agricultural Science and Technology University, 2021,30(4):5-8,14.
- [25] Luo Wentao, Sardans J, Dijkstra F A, et al. Thresholds in decoupled soil-plant elements under changing climatic conditions [J]. Plant and Soil, 2016,409(1/2):159-173.
- [26] Mao Ling, Ye Shaoming, Wang Shengqiang. Soil nutrient contents and stoichiometry within aggregate size classes varied with tea plantation age and soil depth in Southern Guangxi in China [J]. Soil, 2022 8(2):487-505.
- [27] Wang Ruzhen, Dungait J A J, Buss H L, et al. Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:564-572.
- [28] Wang S P, Wang Y F, Hu Z Y, et al. Status of iron, manganese, copper, and zinc of soils and plants and their requirement for ruminants in Inner Mongolia steppes of China [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003,34(5/6):655-670.
- [29] Amini S, Ghadiri H, Chen Chengrong, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: A review [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016,16(3):939-953.
- [30] Feng Xue, Wang Ruzhen, Yu Qiang, et al. Decoupling of plant and soil metal nutrients as affected by nitrogen addition in a meadow steppe [J]. Plant and Soil, 2019, 443(1/2):337-351.

(上接第 38 页)

- [18] 王智慧,王洪义,杨凤军,等.利用暗管排盐技术改良盐碱地土壤盐分变化研究[J].河南科技,2013,32(1):203-204.  
Wang Zhihui, Wang Hongyi, Yang Fengjun, et al. Study on improving soil salt change in saline-alkali land by using underground pipe salt drainage technology [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013, 32(1):203-204.
- [19] 康跃虎.实用型滴灌灌溉计划制定方法[J].节水灌溉,2004(3):11-12,15.  
Kang Yuehu. Applied method for drip irrigation scheduling [J]. Water Saving Irrigation, 2004(3):11-12,15.
- [20] Prichard T L, Hoffman G J, Oster J D. Reclamation of saline organic soil [J]. Irrigation Science, 1985,6(3):211-220.