

高寒退化湿地土壤有机碳及微量元素变化特征

谭小婷, 左娟容, 徐 佳

西南民族大学化学与环境学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年7月11日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月18日

摘 要

受全球气候变化影响, 高寒湿地面积萎缩, 湿地退化问题凸显, 对湿地土壤生态系统生物地球化学循环产生了重要影响。目前关于高寒湿地退化对土壤养分和微量元素的影响还不十分清楚。本研究对比了两种高寒退化湿地土壤养分和微量元素含量的差异。结果表明, 湿地退化对表层土壤有机碳、全氮和微量元素含量均有明显影响。与轻度退化湿地相比, 重度退化湿地土壤有机碳和全氮含量分别下降了26.22%和31.16%, 说明湿地退化对土壤养分含量的影响很大。高寒湿地由轻度退化向重度退化阶段转变后, 土壤铁含量下降了14.80%, 锰含量下降11.16%。重度退化湿地土壤铜和锌含量下降程度基本相当, 分别为7.74%和7.78%。该结果表明, 高寒湿地退化对土壤微量元素的影响也十分明显。重度退化湿地土壤养分和微量元素含量下降的原因, 可能与湿地退化后地表植被覆盖度降低, 凋落物输入减少以及土壤质地的改变有关。

关键词

高寒湿地, 退化土壤, 土壤有机碳, 微量元素

Characteristics of Soil Organic Carbon and Trace Element Changes in Alpine Degraded Wetlands

Xiaoting Tan, Juanrong Zuo, Jia Xu

School of Chemistry and Environment, Southwest Minzu University, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 11th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 18th, 2025

Abstract

Affected by global climate change, the area of alpine wetlands has shrunk, and the issue of wetland degradation has become prominent, significantly impacting the biogeochemical cycles of wetland

文章引用: 谭小婷, 左娟容, 徐佳. 高寒退化湿地土壤有机碳及微量元素变化特征[J]. 世界生态学, 2025, 14(3): 244-252. DOI: 10.12677/ije.2025.143030

soil ecosystems. Currently, the effects of alpine wetland degradation on soil nutrients and trace elements are not fully understood. This study compared the differences in soil nutrients and trace element content between two types of degraded alpine wetlands. The results indicate that wetland degradation has a noticeable impact on the organic carbon, total nitrogen, and trace element content in the topsoil. Compared to lightly degraded wetlands, the soil organic carbon and total nitrogen content in heavily degraded wetlands decreased by 26.22% and 31.16%, respectively, indicating a substantial impact of wetland degradation on soil nutrient levels. After the transition from mild to severe degradation in alpine wetlands, the soil iron content decreased by 14.80%, and manganese content decreased by 11.16%. The reduction in copper and zinc content in severely degraded wetland soils was roughly equivalent, at 7.74% and 7.78%, respectively. These findings indicate that the degradation of alpine wetlands also significantly impacts soil trace elements. The decline in soil nutrients and trace element content in severely degraded wetlands may be related to the reduced surface vegetation coverage, decreased input of litter, and changes in soil texture following wetland degradation.

Keywords

Alpine Wetlands, Degraded Soils, Soil Organic Carbon, Trace Elements

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湿地覆盖全球陆地面积的 5%~8%，是全球关键的自然生态系统之一。湿地储存了约 6000 亿吨碳，约占全球土壤有机碳总量的三分之一，是重要的陆地碳库[1]。湿地由于具有较高的碳埋藏速率，被认为是重要的碳汇类型之一，对调节气候变化具有重要作用。

近年来，湿地退化对湿地土壤生态系统的影响受到学术界的广泛关注。大量研究显示，随着全球气候变暖和开沟排水等人为活动影响，湿地水位下降导致湿地呈现不同程度的退化趋势，并对湿地土壤生物地球化学循环产生了深刻影响[2]。研究表明，湿地退化不仅影响湿地地表植被的光合作用和分布，还通过改变湿地氧化-厌氧层的位置影响着土壤有机碳的分解和温室气体的排放，进而对湿地碳循环产生影响[3]。新近研究发现，湿地退化不仅改变湿地土壤水分、温度和氧化还原条件，还影响土壤呼吸和温室气体排放，进而导致湿地土壤碳收支存在较大的不确定性[4]。吴江琪等研究表明，湿地水位下降会导致湿地环境恶化，并显著影响有机质的分解和转化，加快土壤有机质氧化分解速率，造成土壤碳、氮、磷等养分含量快速减少[5]。

当前，有关湿地退化引起土壤生态系统发生变化的研究日益增多，研究内容多集中于湖泊湿地、滨海湿地和低海拔沼泽湿地等方面。比较而言，针对高寒湿地生态系统的研究相对较少。高寒湿地系统因其独特的地理位置、地形地貌特征、水文特性及生态功能，对气候变化与人类干扰具有高度的敏感性[6]。高寒湿地在维系水土资源、水源涵养、促进元素循环、调节区域气候及生物多样性保护等方面发挥着不可替代的作用[7]。不仅如此，与低海拔地区的湿地类型相比，高寒湿地虽然受人为活动的影响强度较小，但其对气候变化的响应却更加敏感、迅速。

近年来，持续高温干旱等极端气候不断增加，高寒湿地面积逐渐萎缩，景观破碎化问题凸显，导致湿地生态系统功能有所下降，湿地退化呈加剧态势。最近的研究表明，高寒湿地退化，不仅会引起湿地

土壤物理、化学和生物学特性的变化,还会影响土壤微生物活动,土壤温度与水分发生改变。高寒湿地退化所引发的一系列生态问题正面临不小的挑战,在此背景下,亟待拓展高寒湿地土壤生态系统的相关研究[8][9]。

迄今为止,关于高寒湿地退化对土壤生态系统的影响研究取得了长足进展。罗原骏等对若尔盖不同退化程度的高寒沼泽湿地开展了系统研究,结果表明随着湿地退化程度加剧,土壤中磷素有效性和磷形态种类均发生了显著变化[8]。段鹏等基于三江源黄河源区高寒退化湿地的研究结果,指出不同退化程度湿地土壤微生物活性从高到低排序依次为沼泽化草甸 > 退化草甸 > 湿地 > 重度退化草甸 > 退化草原。由此可见,高寒湿地退化的各个阶段,都对土壤微生物活性产生不同程度的影响[10]。王婷等对黄河源区的高寒湿地开展了调查研究,发现随着湿地退化程度加剧,土壤含水量和全碳含量明显降低,土壤特性的改变与湿地植被群落结构的变化紧密相关[11]。贾宏涛等以高寒湿地为研究对象,对未退化、轻度退化及重度退化湿地进行了对比研究,结果表明土壤含水量、有机碳、总磷和总钾含量都随着湿地退化程度增加呈下降趋势,说明湿地退化对土壤养分含量的影响很大[12]。王梦梦等的研究结果显示,当高寒湿地退化程度增加,湿地植物高度、盖度及地上生物量显著降低。重度退化湿地的物种丰富度最低,湿地土壤有机碳、全氮含量随退化程度增加均显著降低。高寒湿地退化不利于养分的积累,还会影响湿地植物与土壤理化性质的相互作用进而影响湿地生态功能[6]。扎西曲措等发现,随着高寒湿地退化程度加深,土壤含水量、总碳和硝态氮含量明显减少,而铵态氮含量明显增加[13]。

总体而言,现有研究成果对于了解高寒湿地退化对土壤生态系统的影响具有重要意义。但当前关于高寒湿地退化对土壤生物地球化学循环产生影响的研究仍然十分有限,湿地退化对土壤碳氮及元素循环的影响机制尚不明晰,尤其湿地退化对土壤微量元素的影响还缺乏深入细致的研究[14]。为进一步了解湿地退化对土壤碳氮和微量元素循环产生的影响,本研究以高寒湿地系统为研究对象,选择轻度退化和重度退化湿地开展对比研究,通过两种湿地类型土壤碳、氮及微量元素的比较分析,探讨湿地退化对土壤养分特性和微量元素的影响,为高寒退化湿地土壤生态系统的保护、修复和科学管理提供基础数据。

2. 样品采集与实验方法

2.1. 研究区域

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县境内(东经 102°38'35"~104°15'36", 北纬 32°06'54"~33°09'35")。该区域属寒温带季风气候区,年均温 5.7℃,最冷月均温-4.3℃,最热月均温 13.7℃,年降水量 720.8 mm,全年降水量 75%集中在 5~9 月,季节性分布特征明显。区域年日照时数 1870.6 小时,无霜期平均 160 天。受地形因素和季风环流共同影响,该地区冬季气候寒冷干燥且多大风天气,夏季温凉湿润但易发暴雨、冰雹等极端气象事件。

2.2. 样品采集与处理

在研究区高寒湿地分布区域依据湿地退化程度选取轻度退化和重度退化湿地作为研究样地。为保证样地环境特征的一致性,选取地势平坦、地貌特征相似、扰动较小以及湿地性状未受明显破坏的区域。在每块样地(30 m × 30 m)按对角线设置 4 个 50 CM × 50 CM 的样方,用土钻采集表层土壤(0~20 CM)约 2 kg,装入土壤采样袋中。

将采集的土壤样品全部带至实验室内,于阴凉通风处自然风干后挑出细根、植物残体和石砾等。样品经自然风干后研磨过 2 mm 筛作为供试土样。部分样品过 60 目筛,用于测定土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)及微量元素等。

2.3. 实验方法

有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化 - 分光光度法测定。全氮(TN)采用自动凯氏定氮仪(ZDDN-11, 拓普云农)测定。土壤铁、锰含量采用氢氟酸 - 浓硝酸 - 盐酸消解, 利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)分析。土壤铜、锌含量采用氢氟酸 - 浓硝酸 - 盐酸消解, 利用电感耦合等离子体质谱分析仪(ICP-MS)分析。

2.4. 数据处理

实验数据计算均以 4 次重复结果平均值表示。采用 SPSS 23.0 将所测得数据进行正态性检验和方差齐性检验, 再用 ANOVA 单因素方差分析, 并利用 GraphPad Prism 10 软件进行图表制作。

3. 结果与讨论

3.1. 退化湿地土壤碳氮含量变化特征

湿地土壤有机碳是气候变化的一种敏感指示物, 能够对全球气候变化做出响应。随着人们对气候变化的关注和湿地固碳功能的深入研究, 湿地有机碳的分布及动态变化成为湿地研究的热点[15]。高寒湿地是土壤有机碳的巨大碳库, 高寒湿地的退化对土壤有机碳的影响决定着湿地碳汇的变化。

本研究比较了两种高寒湿地类型土壤有机碳的差异, 研究结果见图 1 所示。由图 1 可见, 轻度退化与重度退化湿地土壤有机碳含量存在显著差异($P = 0.04$)。轻度退化湿地有机碳含量为 6.98%, 重度退化湿地为 5.15%。与轻度退化湿地相比, 重度退化湿地有机碳含量下降了 26.22%, 该结果表明湿地退化对土壤有机碳的影响较大。湿地退化后, 土壤有机碳含量下降的原因可能是, 随着湿地退化程度不断增加, 湿地植物根系和地表凋落物输入不断减少, 对土壤有机碳的补充减少, 进而引起有机碳含量下降。此外, 湿地退化过程中, 地表植被覆盖度下降, 地表光照增强, 湿地水分条件变差, 微生物活动减弱, 凋落物分解缓慢难以归还, 也会促使有机碳含量下降。

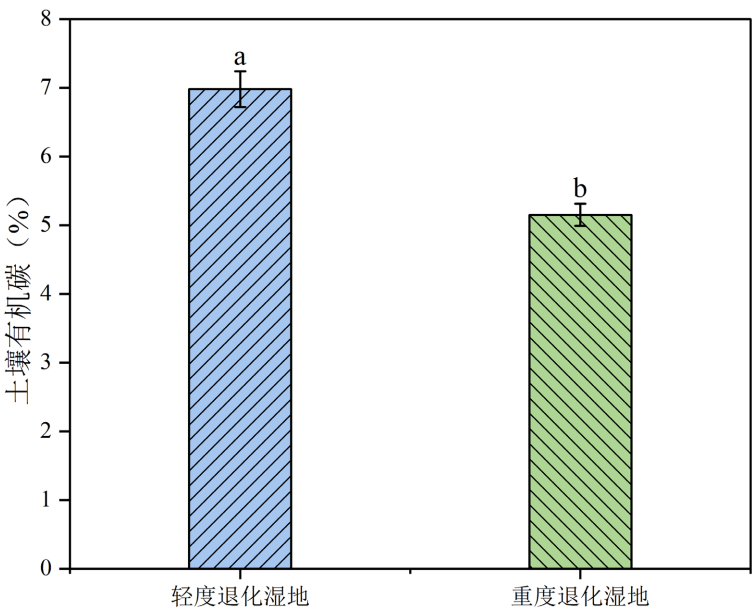


Figure 1. Organic carbon content of degraded wetland soil
图 1. 退化湿地土壤有机碳含量

氮是保持土壤健康和植物正常生长不可或缺的重要元素，对维持土壤氨化、硝化和反硝化等关键生态功能至关重要，氮在湿地生态系统中的循环极为关键[16]。高寒湿地的退化，可能导致湿地水分减少，对湿地厌氧环境和反硝化作用产生显著影响。迄今关于高寒湿地退化对土壤氮素分布的影响报道较少。本研究比较了两种退化湿地土壤全氮含量的差异(图 2)。

从图 2 可以看出，轻度退化湿地与重度退化湿地土壤全氮含量差异显著($P = 0.03$)。轻度退化湿地全氮含量为 $0.77\% \pm 0.06\%$ ，重度退化湿地为 $0.35\% \pm 0.06\%$ 。该结果表明，尽管两种湿地分别处于轻度退化和重度退化阶段，但其土壤全氮含量仍然较高，说明氮素在湿地土壤的“表层富集”现象明显，这与高寒湿地所处的低温环境密切相关[17]。高寒湿地表层土壤作为植物凋落物输入的主要区域，在年均温低于 5°C 的低温环境下，微生物活性受限，其对土壤氮素的分解速率低于温带湿地，这使得氮素在高寒湿地土壤表层能够高效积累。

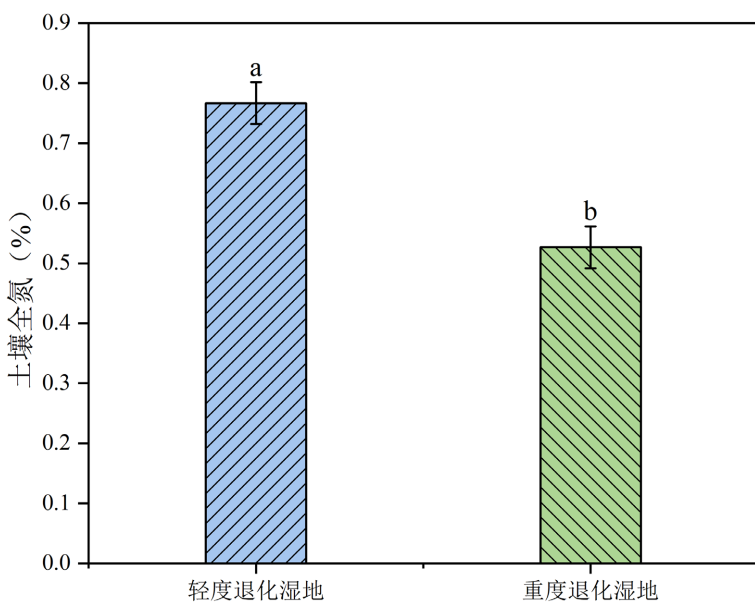


Figure 2. Total nitrogen content of degraded wetland soil
图 2. 退化湿地土壤全氮含量

由图 2 还可以看出，与轻度退化湿地相比，重度退化湿地土壤全氮含量下降了 31.16%。该结果表明，湿地退化对土壤氮元素的分布影响较大。土壤全氮含量下降的原因可能是，随着湿地退化程度加剧，尤其当湿地退化至重度阶段，地表植被和凋落物所剩无几，氮素输入极少，氮元素积累减弱，土壤全氮含量下降显著。Vitousek 等的研究也指出，表层土壤氮素的高流失率与植被退化导致的生物固氮作用减弱直接相关[18]。

3.2. 退化湿地土壤微量元素变化特征

微量元素含量分布受成土过程与成土条件的影响深刻。湿地生态系统在发生演变过程中，会通过影响土壤过程影响微量元素的含量分布。本研究结果显示，两种湿地类型土壤微量元素的变化特征相似。轻度退化与重度退化湿地土壤铁含量相差不大。轻度退化湿地土壤铁含量为 $21210 \pm 55.08 \text{ mg/kg}$ ，重度退化湿地为 $18070 \pm 754.48 \text{ mg/kg}$ ，但两者存在显著差异($P = 0.02$)。重度退化湿地相比于轻度退化湿地土壤铁含量下降了 14.80%。这一结果表明，湿地退化对表层土壤铁元素的分布影响较大。轻度退化与重度

退化湿地土壤锰含量也存在这一明显特征。前者土壤锰含量为 $645 \pm 31.43 \text{ mg/kg}$ ，后者为 $573 \pm 20.66 \text{ mg/kg}$ 。相比于轻度退化湿地，重度退化湿地土壤锰含量下降了 11.16%。该结果说明湿地退化对土壤锰元素分布的影响明显。

此外，高寒湿地从轻度退化向重度退化阶段转变过程中，表层土壤铜和锌元素含量下降明显。轻度退化湿地中土壤铜和锌的含量分别为 $20.02 \pm 0.27 \text{ mg/kg}$ 和 $77.43 \pm 1.20 \text{ mg/kg}$ ，而重度退化湿地两种元素含量分别下降至 $18.47 \pm 0.53 \text{ mg/kg}$ 和 $71.40 \pm 1.30 \text{ mg/kg}$ 。与轻度退化湿地相比，重度退化湿地土壤铜和锌含量分别下降了 7.74% 和 7.78%，两种微量元素的下降程度相当。

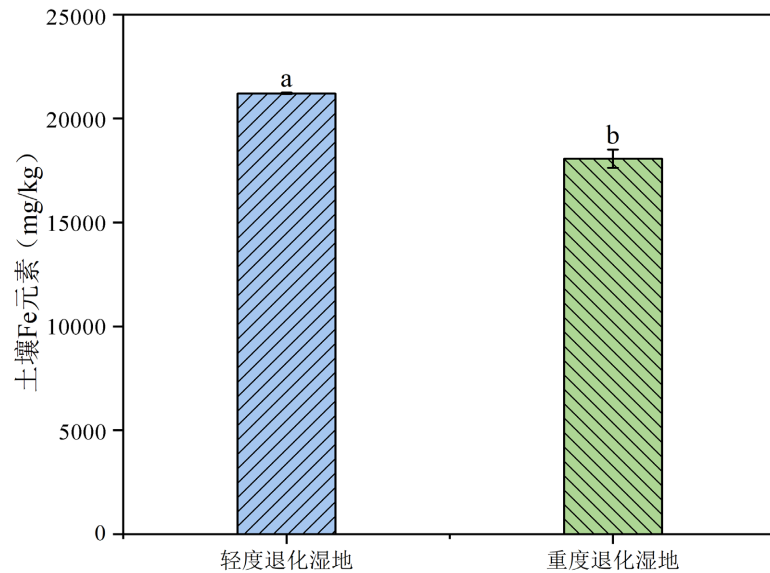


Figure 3. Iron content in degraded wetland soils
图 3. 退化湿地土壤铁含量

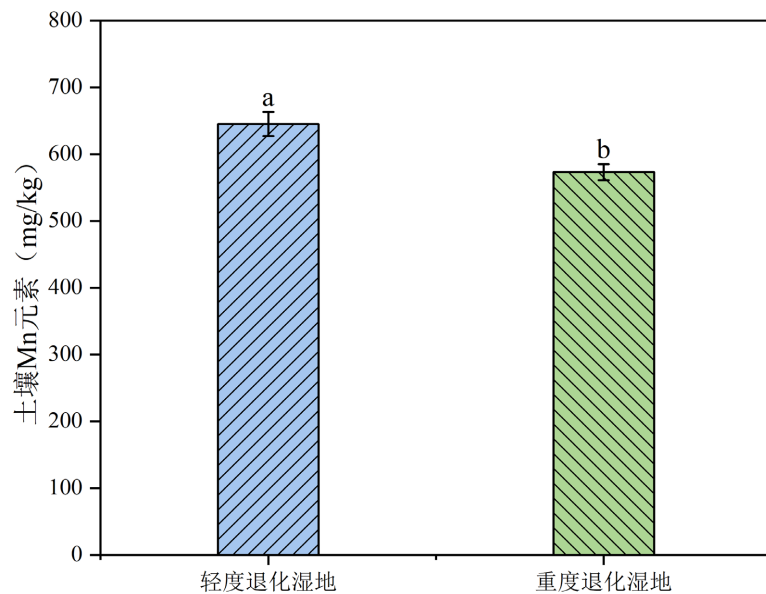


Figure 4. Manganese content in degraded wetland soils
图 4. 退化湿地土壤锰含量

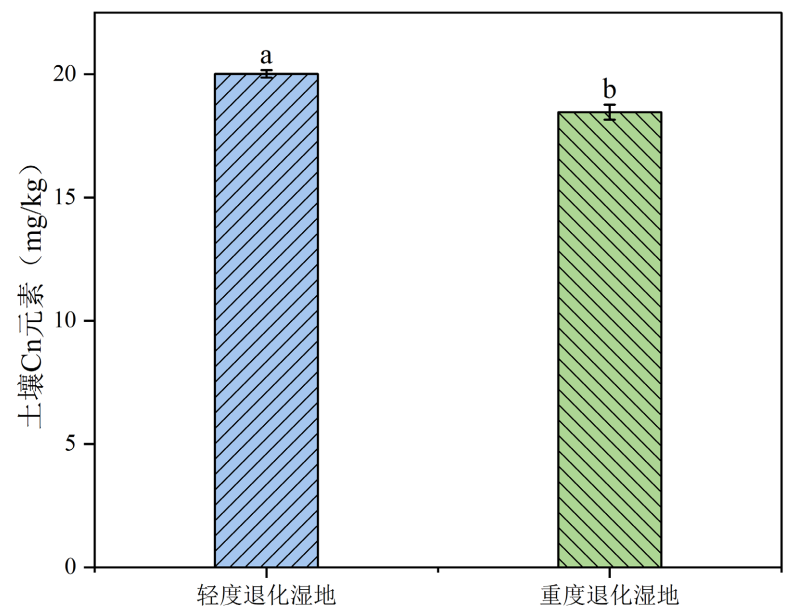


Figure 5. Copper content in degraded wetland soils
图 5. 退化湿地土壤铜含量

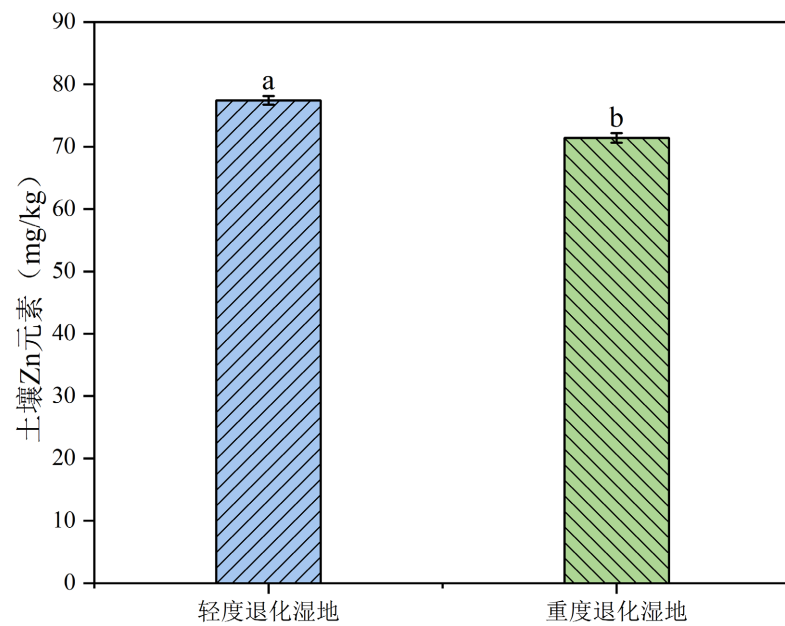


Figure 6. Zinc content in degraded wetland soils
图 6. 退化湿地土壤锌含量

从上述结果可见，高寒湿地退化对土壤中微量元素铁、锰、铜、锌含量的影响明显。湿地由轻度退化向重度退化转变后，土壤微量元素含量均有所下降，但铁、锰、铜、锌各个元素含量下降程度不同。其中土壤铁含量下降最多，其次为锰，铜和锌含量下降程度相当。该结果表明，湿地退化对表层土壤微量元素铁、锰、铜、锌含量的分布有明显影响，但影响程度各有不同。重度退化湿地中微量元素低于轻度退化湿地的原因，可能与湿地退化后有机碳和全氮等土壤养分含量下降有关。土壤微量元素的含量受土壤理化性质的影响较大。朱超等的研究表明，土壤 Zn 和 Fe 含量受土壤有机碳和氮元素的影响较大，土

壤 Cu 和 Mn 含量状况则受土壤 P 的影响很大[19], 有机质含量高的土壤, 铜和锰元素含量往往较高。刘铮等的研究结果显示, 土壤有机质含量高的地方 Cu 元素富集现象明显[20]。此外质地较轻的粗质土壤中微量元素含量往往较低。可见, 重度退化湿地土壤微量元素下降明显, 原因可能是湿地退化至重度阶段后, 一方面土壤有机碳、氮元素等土壤理化特性发生改变; 另一方面, 退化湿地水分减少, 湿地土壤粗颗粒含量会增加, 土壤质地变轻, 进而导致微量元素含量下降。

4. 结论

湿地退化对土壤有机碳和全氮含量的影响已有大量研究, 但研究结果不尽一致, 且湿地退化对土壤微量元素的影响研究报道较少。本研究对比了两种高寒退化湿地土壤养分和微量元素含量的差异。研究结果表明, 湿地退化对土壤有机碳、全氮含量和微量元素都有明显影响。与轻度退化湿地相比, 重度退化湿地土壤有机碳和全氮含量分别下降了 26.22%和 31.16%, 说明湿地退化对土壤养分含量的影响很大。另外, 相比于轻度退化湿地, 重度退化湿地土壤铁含量下降了 14.80%, 锰下降 11.16%。重度退化湿地中土壤铜和锌含量下降程度相当, 分别为 7.74%和 7.78%。该结果表面, 高寒湿地的退化对土壤微量元素的影响也十分明显, 但其影响程度弱于土壤养分含量。湿地退化后土壤养分和微量元素含量下降的原因可能与湿地地表植被覆盖度降低, 凋落物输入减少有关。

基金项目

西南民族大学大学生创新创业训练计划项目(S202410656144)资助。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Naafs, B.D.A., Huang, X., Song, Q., Xue, J., Wang, R., *et al.* (2022) Variations in Wetland Hydrology Drive Rapid Changes in the Microbial Community, Carbon Metabolic Activity, and Greenhouse Gas Fluxes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **317**, 269-285. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.11.014>
- [2] Li, Y., Shahbaz, M., Zhu, Z., Deng, Y., Tong, Y., Chen, L., *et al.* (2021) Oxygen Availability Determines Key Regulators in Soil Organic Carbon Mineralisation in Paddy Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **153**, Article ID: 108106. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108106>
- [3] Wei, J., Li, X., Liu, L., Christensen, T.R., Jiang, Z., Ma, Y., *et al.* (2022) Radiation, Soil Water Content, and Temperature Effects on Carbon Cycling in an Alpine Swamp Meadow of the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Biogeosciences*, **19**, 861-875. <https://doi.org/10.5194/bg-19-861-2022>
- [4] Liu, X., Zhan, W., Zhu, D., Wu, N., He, Y. and Chen, H. (2022) Seasonal and Interannual Dynamics of Water Vapor Flux at a Fen in the Zoige Peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau: Four-Year Measurements. *Journal of Hydrology*, **612**, Article ID: 128058. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128058>
- [5] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 尕斯库勒沼泽化草甸湿地不同地下水位土壤理化特征的比较分析[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 341-347.
- [6] 王梦梦, 张丽华, 当知才让, 等. 高寒湿地退化对植物群落特征与土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7910-7923.
- [7] Zhao, R., Wang, J., Li, L., Zhang, L., Lu, H., Jiang, X., *et al.* (2024) Evaluation of Alpine Wetland Ecological Degradation Based on Alpine Wetland Degradation Index: A Case Study in the First Meander of the Yellow River. *Ecological Indicators*, **158**, Article ID: 111414. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111414>
- [8] 罗原骏. 高寒湿地退化过程中土壤磷形态及其有效性演变特征[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2020
- [9] 胡容. 若尔盖高寒湿地退化过程中土壤有机氮矿化演变特征[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2019
- [10] 段鹏, 张永超, 王金贵, 等. 青藏高原高寒湿地退化过程中土壤微生物群落功能多样性特征[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 759-767
- [11] 王婷, 张永超, 赵之重. 青藏高原退化高寒湿地植被群落结构和土壤养分变化特征[J]. 草业学报, 2020, 29(4): 9-18.
- [12] 买迪努尔·阿不来孜, 陈末, 杨再磊, 等. 巴音布鲁克高寒湿地土壤真菌群落对不同程度退化的响应[J]. 农业环

- 境科学学报, 2022, 41(8): 1778-1787.
- [13] 扎西曲措, 杨晶晶, 刘振宇, 等. 麦地卡高寒湿地退化对其土壤微生物群落结构的影响[J]. 生物资源, 2025, 47(2): 129-140
- [14] 唐仕芳, 苟小林, 补春兰, 等. 青藏高原典型高寒退化湿地与草甸土壤有机碳现状研究[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(3): 70-76
- [15] Luo, M., Huang, J., Zhu, W. and Tong, C. (2017) Impacts of Increasing Salinity and Inundation on Rates and Pathways of Organic Carbon Mineralization in Tidal Wetlands: A Review. *Hydrobiologia*, **827**, 31-49. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3416-8>
- [16] Shen, M., Song, B., Zhou, C., Almatrafi, E., Hu, T., Zeng, G., *et al.* (2022) Recent Advances in Impacts of Microplastics on Nitrogen Cycling in the Environment: A Review. *Science of the Total Environment*, **815**, Article ID: 152740. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152740>
- [17] 王静, 许畅, 张丽娟, 等. 不同有机物质对盐渍化土壤团聚体碳氮分布与微生物群落的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 1-11.
- [18] Vitousek, P. and Howarth, R. (1991) Nitrogen Limitation on Land and in the Sea: How Can It Occur? *Biogeochemistry*, **13**, 87-115. <https://doi.org/10.1007/bf00002772>
- [19] 朱超, 戴全厚, 王玲玲. 贵州草海湿地典型集水区土壤微量元素分布特征研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 362-366
- [20] 刘铮, 唐丽华, 朱其清, 等. 我国主要土壤中微量元素的含量与分布初步总结[J]. 土壤学报, 1978, 15(2): 138-150.