

DOI: 10.5846/stxb202106111566

张法伟, 李红琴, 仪律北, 罗方林, 张光茹, 王春雨, 杨永胜, 李英年. 草地退化对三江源国家公园高寒草甸表层土壤有机碳、全氮、全磷的空间驱动. 生态学报, 2022, 42(14): 5586-5592.

Zhang F W, Li H Q, Yi L B, Luo F L, Zhang G R, Wang C Y, Yang Y S, Li Y N. Spatial response of topsoil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus content of alpine meadows to grassland degradation in the Sanjiangyuan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5586-5592.

草地退化对三江源国家公园高寒草甸表层土壤有机碳、全氮、全磷的空间驱动

张法伟^{1, 3, *}, 李红琴^{1, 2}, 仪律北⁴, 罗方林^{1, 3}, 张光茹^{1, 3}, 王春雨^{1, 3}, 杨永胜^{1, 3}, 李英年^{1, 3}

1 中国科学院三江源国家公园研究院, 西宁 810001

2 洛阳师范学院生命科学院, 洛阳 471934

3 中国科学院西北高原生物研究所高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001

4 青海省林业和草原局林业碳汇服务中心, 西宁 810008

摘要: 草地退化显著削弱了三江源高寒草甸的土壤肥力及生态承载功能, 但空间尺度上的驱动强度和调控尚不清晰。在 2020 年 7—8 月, 基于三江源国家公园高寒草甸典型分布区原生植被和退化植被的 60 个配对采样, 研究表层 (0—30 cm) 土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 和全磷 (TP) 含量对草地退化的空间响应特征。三江源国家公园高寒草甸原生植被 SOC 和 TN 含量分别为 $(2.45 \pm 2.05)\%$ (平均值 $\pm$ 标准差, 下同) 和 $(0.25 \pm 0.20)\%$, 配对样本 *t*-检验的结果表明草地退化导致 SOC 和 TN 分别极显著 ($P < 0.001$) 下降了 44.0% 和 35.6%。TP 对草地退化无显著响应 ($P = 0.22$)。原生植被的土壤 C:N:P 平均为 59.6:6.2:1.0, 草地退化导致化学计量值平均下降 28.3%。一般线性模型的结果表明草地退化对 SOC 和 TN 及土壤生态化学计量特征的空间降低强度主要取决于纬度和海拔 ($P < 0.01$), 与经度和土壤深度关系较弱 ($P > 0.30$), 即低纬度高海拔的高寒草甸响应相对强烈。草地退化导致三江源国家公园高寒草甸土壤碳氮损失严重, 降低了土壤生态化学计量。研究结果可为三江源退化高寒草甸土壤营养功能的治理和恢复提供理论支撑。

关键词: 草地退化; 表层土壤有机碳含量; 全氮含量; 全磷含量; 三江源国家公园

Spatial response of topsoil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus content of alpine meadows to grassland degradation in the Sanjiangyuan National Park

ZHANG Fawei^{1, 3, *}, LI Hongqin^{1, 2}, YI Lübei⁴, LUO Fanglin^{1, 3}, ZHANG Guangru^{1, 3}, WANG Chunyu^{1, 3}, YANG Yongsheng^{1, 3}, LI Yingnian^{1, 3}

1 Institute of Sanjiangyuan National Park, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

2 College of Life Sciences, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, China

3 Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

4 Forestry carbon sequestration service center, Qinghai Forestry and Grassland Bureau, Xining 810008, China

Abstract: Alpine meadows constitute approximately 23% of the Qinghai-Tibetan Plateau surface and are vital to ecosystem services and human well-being. Under the context of unprecedented climate warming and heavy grazing practices, alpine

基金项目: 中国科学院-青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项 (LHZX-2020-07); 国家林业和草原局经济发展研究中心业务委托项目 (JYFL-2021-00020); 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604802); 国家自然科学基金项目 (41877547)

收稿日期: 2021-06-11; 网络出版日期: 2022-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mywing963@126.com

grasslands have been undergoing serious and extensive degradation for the past decades. Grassland degradation substantially weakened soil nutrients status and ecological carrying capacity of alpine meadows, but their spatial driving magnitudes and environmental controls remain unclear in the Three Rivers Source. From July to August in 2020, based on 60 paired soil samples of native and degraded alpine meadows in the Sanjiangyuan National Park, the spatial response of topsoil (0—30 cm) organic carbon content (SOC), total nitrogen content (TN), and total phosphorus content (TP) to grassland degradation was quantified, as well as the underlying environmental controls. The contents of SOC and TN in native alpine meadows were $(2.45 \pm 2.05)\%$ (Mean $\pm$ Standard deviation, the same below) and $(0.25 \pm 0.20)\%$, respectively. The results of the paired-samples t-test showed that the content of SOC and TN in degraded alpine meadows were significantly ($P < 0.001$) decreased by 44.0% and 35.6%, compared to native alpine meadows. The degradation induced-loss in topsoil density of SOC and TN was 2.23 kg/m^2 and 0.16 kg/m^2 , respectively, given that marginally significant ($P = 0.06$) difference between bulk density in native (0.93 g/cm^3) and degraded alpine meadows (1.12 g/cm^3). The content of TP exhibited no significant ($P = 0.22$) response to grassland degradation, because soil phosphorus comes mainly from rock weathering, which was strongly affected by soil parent materials. The C:N:P of native and degraded alpine meadows averaged $59.6:6.2:1.0$ and $35.6:4.2:1.0$, respectively. And it was remarkably reduced by 28.3% due to grassland degradation, which might alleviate the nutrient limitations on plant growth. The difference of soil nutrients and stoichiometry between native and degraded alpine meadows was used as an indicator for the spatial effects of grassland degradation. And the general linear model analysis revealed that the spatial magnitudes of grassland degradation on SOC, TN, and soil stoichiometry were significantly related to latitude and elevation ($P < 0.01$), rather than longitude and soil depth. This finding suggested that the response to degradation could be much stronger in alpine meadows of lower latitude and higher elevation. Therefore, grassland degradation caused serious losses of topsoil carbon and nitrogen and decreased soil stoichiometry of alpine meadows in the Sanjiangyuan National Park. These results can provide a theoretical basis for the rehabilitation and management of the soil nutrient function of the degraded alpine meadows in the Sanjiangyuan National Park.

Key Words: grassland degradation; topsoil organic carbon content; total nitrogen content; total phosphorus content; Sanjiangyuan National Park

青藏高原是中国重要的生态安全屏障区,高寒草甸面积约为 58.2 万 km^2 ,是高原的主要植被类型和生态屏障功能发挥的基质^[1-2]。在气候变化和人类活动的双重压力下,草地退化态势依然严峻,严重危及高寒草甸碳素固持、水源涵养及气候调节等生态服务功能^[3-5]。土壤退化是草地退化的核心问题,不仅影响了土壤的碳氮磷等养分的供需平衡及植被生长,而且会加速草地退化的演替进程^[6-7],甚至改变区域气候变化的趋势^[8-9]。深入研究草地退化对土壤营养元素的驱动机制是高寒草甸可持续发展的关键,也是退化高寒草甸近自然恢复^[10]和青藏高原国家生态安全屏障建设的关键之一^[2],具有重要的理论价值和现实意义。

土壤有机碳是草地碳循环及草地质量评价的核心指标^[11-12],土壤氮、磷被认为是草地生态系统生产力的主要限制因素^[9, 13-14]。草地退化通过改变高寒草甸植被地上、地下输入物的数量与性状及土壤水热微环境^[7, 15],调控微生物的群落组成、生理性状及残体数量^[12, 16],导致土壤有机碳、全氮含量下降^[17-18],但降低程度与研究区的气候因素及土壤深度密切相关^[1, 19-21]。但草地退化^[22-24]和围栏封育^[25]对土壤全磷含量均没有显著影响。草地退化显著改变了土壤而非植被的生态化学计量^[21, 26],从而影响了土壤-牧草的营养供需平衡^[6, 25]乃至系统稳定性及演替进程^[24, 27]。目前相关的研究大多集中在单点尺度,但高寒草甸分布范围广,气候异质性强,限制了研究结果的空间代表性^[28]。

三江源国家公园位于青藏高原的核心区,总面积为 12.31 万 km^2 ,是中国首批正式成立的国家公园之一,是高原生态安全屏障的重要地理单元^[29]。高寒草甸约占园区面积的 44%,是国家公园的主体植被类型,虽然经过近二十年的生态工程治理,但草地退化态势仍然严峻,削弱了区域的土壤承载力及生态服务功能^[1, 30]。

本文基于 2020 年 7—8 月的三江源国家公园高寒草甸原生植被和退化植被的 60 个配对采样,研究草地退化对表层(0—30 cm)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量及其计量特征的空间驱动强度和潜在生态过程,为三江源国家公园高寒草甸土壤承载力的评估和退化草地的恢复治理提供数据支撑和理论基础。

1 材料与方法

1.1 配对采样与室内分析

本次采样集中在三江源国家公园高寒草甸的典型分布区(图 1)。原生植被中,以小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草(*K. humilis*)、早熟禾(*Poa pratensis*)和麻花艽(*Gentiana straminea*)等为群落优势种,群落相对盖度为 85%以上;退化样地内,优势种包括细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、兰石草(*Lancea tibetica*)等,群落盖度一般小于 40%,为重度退化的稳态^[7]。在研究区域内,高寒草甸的原生植被和退化植被通常会相邻出现,且少有退化过程的中间稳态(图 1)。因此,本研究采用配对采样的方法,以降低气候、土壤的空间异质性对研究结果

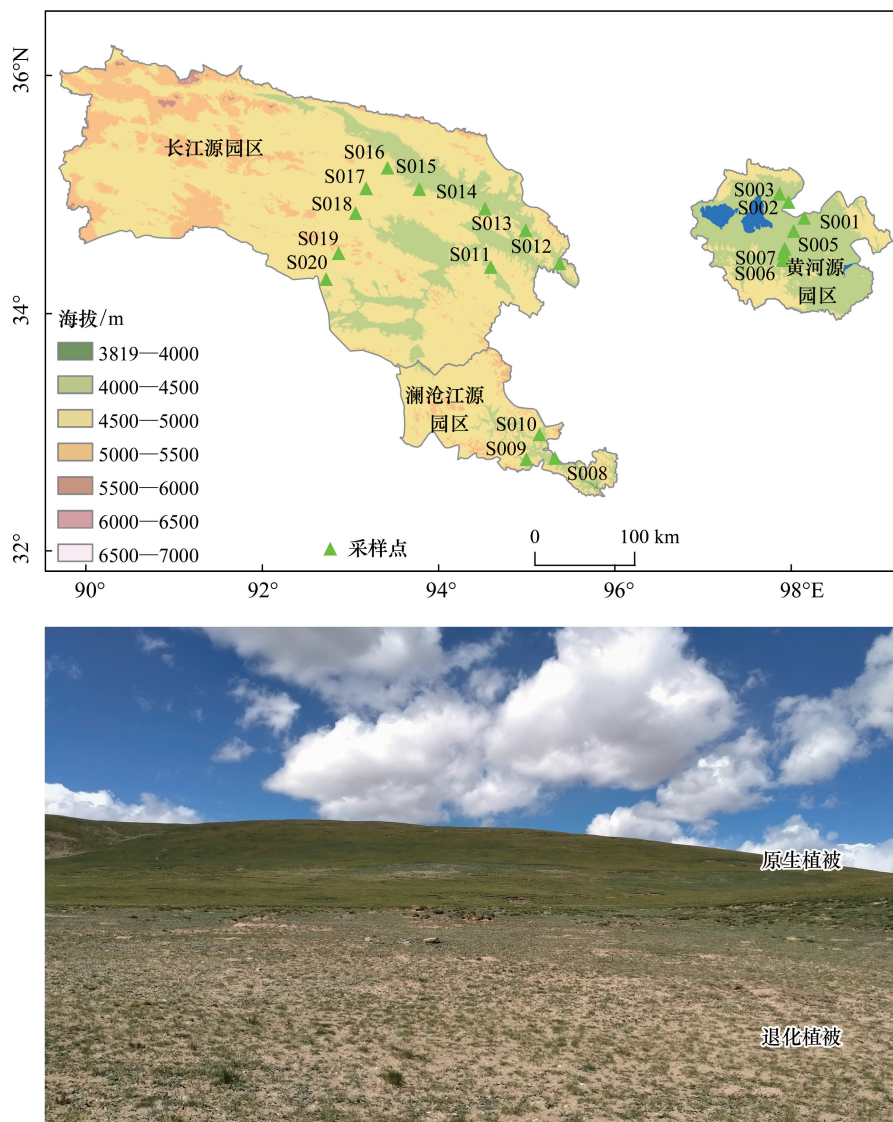


图 1 三江源国家公园高寒草甸采样点及原生植被和退化植被的配对样地的典型景观

Fig.1 The survey map of soil sampling and the typical picture of paired plots between native and degraded alpine meadows in the Sanjiangyuan National Park

的影响。在 2020 年 7—8 月,兼顾采样难度和代表性,沿公路两侧 1 km 外共采集了 20 组 60 个配对样地(长江源园区、黄河源园区和澜沧江源园区分别采集了 10、7、3 组),基本覆盖了三江源国家公园高寒草甸的主要分布区。

在原生植被和退化植被的每组配对样地内,半随机选取三个样方(以期符合原生植被和退化植被的群落表观特征),按照 0—10、10—20、20—30 cm 的土壤深度,用内径 7.0 cm 的土钻采集土壤样品,过 2.0 mm 筛子后装入土袋,带回室内阴干,制成 0.25 mm 的土壤粉末,进行 SOC、TN 和 TP 的含量(% ,g/100g)测定。其中 SOC 用重铬酸钾硫酸外加热法, TN 用凯氏定氮法, TP 采用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法测定。以 SOC/TN、SOC/TP 和 TN/TP 表示 C/N、C/P 和 N/P 等土壤化学计量特征。

1.2 统计方法

利用配对样本 *t* 检验(Paired-samples *t*-test)分析草地退化对 SOC、TN 和 TP 的影响强度。以原生植被与退化植被的 SOC、TN、TP、C/N、C/P、N/P 及二者差值(Δ SOC、 Δ TN、 Δ TP、 Δ C/N、 Δ C/P 和 Δ N/P)为因变量,以采样点的经度、纬度、海拔、草地退化(分类变量)和土壤深度(分类变量)为自变量,利用一般线性模型探讨草地退化对高寒草甸土壤营养性状对空间驱动强度的环境调控机制。统计分析和绘图分别在 R 4.0.2^[31] 和 OriginLab 2016 中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、全氮和全磷的响应及环境调控

配对样本 *t*-检验表明,草地退化对 SOC 和 TN 的降低效应极显著($P < 0.001$),但对 TP 无显著影响(图 2)。原生植被的 SOC 和 TN 分别为(2.45 ± 2.05)%(平均值 $\pm$ 标准差,下同)和(0.25 ± 0.20)%,退化植被的 SOC 和

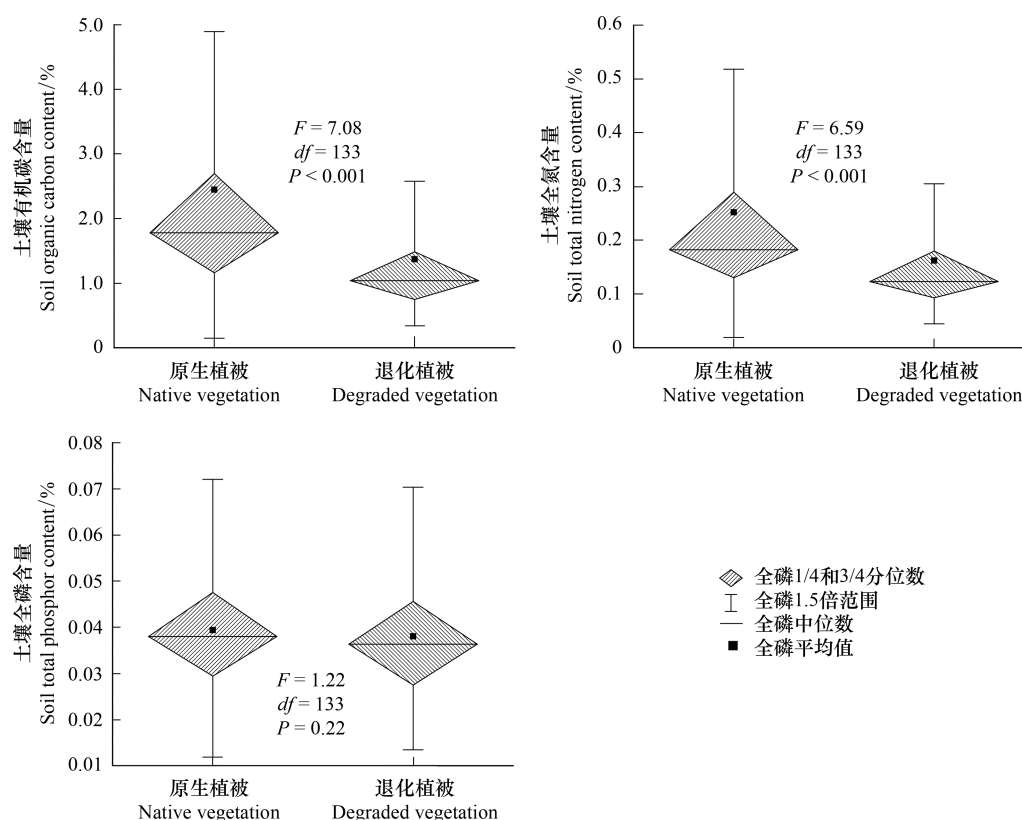


图 2 三江源国家公园高寒草甸原生植被和退化植被的 0—30 cm 土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量的配对检验

Fig.2 The paired-samples T-test of 0—30 cm soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphor (TP) content between native and degraded alpine meadows in the Sanjiangyuan National Park

TN 较原生植被分别低 44.0% 和 35.6%。原生植被和退化植被的 TP 分别为 $(0.039 \pm 0.015)\%$ 和 $(0.038 \pm 0.014)\%$, 二者差异不显著 ($P=0.22$)。原生植被与退化植被的 0—10 cm 和 20—30 cm 的 SOC 差异相对较大, 分别为 47.0% 和 45.0%, 而中层 (10—20 cm) 的差异为 40.3%。TN 也表现出相似的趋势, 即浅层和下层差异相对较大, 分别为 38.4% 和 38.3%, 中层差异为 31.9%。原生植被和退化植被的 TP 在表层、中层和深层的差异均小于 6%, 也表现出表层和下层略大 (5%), 而中层略小 (1%) 的特征。原生植被和退化植被的土壤容重平均分别为 $(0.93 \pm 0.34) \text{ g/cm}^3$ 和 $(1.12 \pm 0.21) \text{ g/cm}^3$ (二者差异不显著, $P=0.06$), 因此, 表层 SOC 和 TN 的绝对损失量分别为 2.23 kg/m^2 和 0.16 kg/m^2 。

高寒草甸土壤营养元素与草地退化 (分类变量)、土壤深度 (分类变量)、经度、纬度和海拔的一般线性模型表明, SOC 和 TN 主要受草地退化、土壤深度和纬度显著影响, 而 TP 则受经度、纬度和土壤深度调控 (表 1)。但草地退化对 ΔSOC 的空间降低效应主要受纬度和海拔影响, 和经度、土壤深度的关系较小 (表 1)。草地退化导致 ΔSOC 的降低幅度平均为 $(1.09 \pm 1.83)\%$, 与纬度呈现出线性负相关特征 (斜率 = -0.98 , $R^2 = 0.16$, $P < 0.001$), 和海拔呈现出线性正相关特征 (斜率 = 0.0034 , $R^2 = 0.08$, $P < 0.001$)。草地退化导致 ΔTN 的降低幅度平均为 $(0.092 \pm 0.16)\%$, 也表现出类似的环境调控特征, 随纬度降低和海拔升高而升高。 ΔTP 对草地退化存在降低响应趋势, 也无显著环境影响因素。因此, 三江源国家公园中, 低纬度高海拔区域的高寒草甸 SOC 和 TN 对草地退化响应更为强烈。

表 1 三江源国家公园高寒草甸原生植被与退化植被的土壤营养元素及其差异与环境因子的一般线性模型的显著性检验

Table 1 The Significance of the general model on the soil nutrient contents and their difference between native and degraded alpine meadows with environmental controls in the Sanjiangyuan National Park

	有机碳 Soil organic carbon (SOC)	全氮 Total nitrogen (TN)	全磷 Total phosphorus (TP)	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P	Δ 有机碳 ΔSOC	Δ 全氮 ΔTN	Δ 全磷 ΔTP	Δ 碳氮比 $\Delta\text{C/N}$	Δ 碳磷比 $\Delta\text{C/P}$	Δ 氮磷比 $\Delta\text{N/P}$
退化 Degradation	<0.001	<0.001	0.36	<0.001	<0.001	<0.001	—	—	—	—	—	—
经度 Longitude	0.09	0.02	0.002	0.68	0.23	0.07	0.57	0.97	0.05	0.05	0.41	0.98
纬度 Latitude	<0.001	<0.001	<0.001	0.02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.78	0.41	<0.001	<0.001
海拔 Elevation	0.04	0.58	0.41	0.23	0.001	0.03	<0.001	0.011	0.60	0.02	<0.001	0.01
土壤深度 Soil depth	<0.001	<0.001	0.006	0.004	<0.001	0.01	0.34	0.47	0.47	0.30	0.65	0.86

2.2 土壤生态化学计量特征的响应及环境调控

原生植被和退化植被的 C:N:P 平均分别为 59.6:6.2:1.0 和 35.6:4.2:1.0, 草地退化导致计量值的降低程度平均为 28.3%。原生植被和退化植被的 C/N 分别为 9.58 ± 2.35 和 8.33 ± 1.23 。相关分析表明原生植被和退化植被中的 C/N、C/P 均主要受 SOC 影响 ($P < 0.001$), 而与 TN 或 TP 的关系较小 ($P > 0.07$)。N/P 也主要受 TN ($P < 0.001$) 而非 TP ($P > 0.06$) 的影响。C/N 与草地退化 (分类变量)、土壤深度 (分类变量)、经度、纬度和海拔的一般线性模型表明, C/N 主要受草地退化、土壤深度和纬度显著影响 (表 1)。草地退化和土壤深度没有显著交互作用 ($P=0.83$)。C/N 随草地退化和土壤深度显著下降。除了经度无显著影响外, 草地退化、土壤深度、纬度和海拔均对 C/P 和 N/P 有显著作用 (表 1)。

原生植被的 C/P 和 N/P 分别为 59.64 ± 39.10 和 6.16 ± 3.65 , 配对样本检验表明草地退化导致 C/P 和 N/P 分别显著降低了 40.3% 和 31.4%。草地退化对 $\Delta\text{C/N}$ 的空间驱动强度主要取决于海拔 (表 1), 即随着海拔高度增加, 草地退化的效应越强。草地退化对 $\Delta\text{C/P}$ 和 $\Delta\text{N/P}$ 的降低效应主要受纬度和海拔共同影响, 其与纬度负相关, 和海拔正相关。因此, 低纬度高海拔地区的高寒草甸土壤化学计量特征对草地退化的响应更为强烈。

3 讨论

3.1 土壤养分含量对草地退化的响应特征

草地退化导致高寒草甸损失约一半 SOC 和三分之一 TN,但对 TP 无显著影响,这与三江源高寒草甸相关研究的结果基本一致^[16, 18]。因此,高寒草甸 SOC 和 TN 对草地退化的响应最为敏感,而全磷的敏感性较低^[21, 24],即 SOC 和 TN 是表征高寒草甸土壤退化的适宜养分指标^[7, 18, 26]。SOC 主要取决于植物及微生物残体输入与土壤微生物呼吸分解的平衡,而表层 SOC 的稳定性更多地受植物输入性状和水分状况的影响^[8, 12]。草地退化减少了地上植被生物量,同时植被群落也由易矿化的禾草、莎草转变为难分解的杂类草^[7],降低了凋落物和根系的数量及质量^[1];而且土壤微生物残体作为高寒草甸表层 SOC 的重要来源^[11-12],也随着草地退化而显著下降^[16]。另外,退化草地地表近乎裸露,土壤侵蚀风险增大^[32],而表层水热变化变幅增加也导致植被生长季的土壤呼吸作用增强^[15],共同降低了表层 SOC。在土壤可利用碳水平较低时,微生物处于休眠或不活跃状态,降低了微生物的矿化能力和土壤营养的供给水平,有利于草地退化稳态的维持^[25]。

相对 SOC, TN 降低程度略低,可能是在退化草地中,较低的植被覆盖及生产力缓解了植被生长对土壤氮素的需求量^[33],且可食牧草的降低也减少了因家畜采食而导致的氮素迁移损失^[6],同时豆科(如黄花棘豆)等不可食牧草的增多也可一定程度提高土壤氮含量。因此,退化草地的土壤氮素含量虽然下降,但其供给却可能满足当前植被生长对氮素的需求^[6],是高寒草甸退化稳态的重要维持因素之一^[5]。草地退化对土壤 TP 的影响不显著,这也与前人的研究结果一致^[22-24]。由于磷素受土壤母质的影响^[33],主要来源于矿石的风化而并非有机质的分解^[24]。同时,磷没有气体形式,而磷酸盐在高寒草甸碱性土壤环境中的可溶性较低,难以淋溶^[25]。因此,三江源高寒草甸 TP 对草地退化没有显著响应,可能并非植物生长的主要限制因子^[26]。

草地退化对 Δ SOC 和 Δ TN 的影响强度与纬度、海拔显著相关,但与经度和土壤深度的关系较小(表 1)。这主要由于研究区域纬度、海拔与气温、降水有显著的空间相关性,而热量状况和水分含量是土壤呼吸^[1]及有机碳、氮矿化^[8, 34]的主要环境调控因子。而且纬度的负作用相对更强(表 1),暗示高寒草甸所处地域的气温越高, Δ SOC 和 Δ TN 对草地退化的响应越强。这可能由于高寒草甸多为温度限制系统^[9],在温暖环境中,土壤微生物的维持呼吸也相对较高,导致作为 SOC 重要来源的微生物残体减少^[11-12],加之植物根系生命周期相对缩短,不利于死亡根系对 SOC 的补充和保留,加速了 SOC 的周转^[8-9]。草地退化导致 Δ SOC 的空间降低效应与土壤深度的关系微弱(表 1),可能是随着土壤深度增加,透气性降低,可供降解的 SOC 及微生物数量迅速下降,且下层 SOC 的稳定性更多受到土壤矿质的影响,而并非植被有机碳的输入调控^[8, 12]。

3.2 土壤生态化学计量对草地退化的响应

土壤生态化学计量是不同化学元素之间的稳态平衡,影响着生态系统的演替进程及对环境变化的响应方式,是植被群落健康和系统稳定性的重要指标^[14, 26]。三江源国家公园高寒草甸表层土壤生态化学计量特征,处在前人对三江源高寒草甸的相关研究范围之内^[26, 35],但显著低于全球土壤的平均水平(186:13:1)^[36]。草地退化显著降低了土壤 C/N、C/P 和 N/P,表明草地退化深刻改变了土壤营养元素的供给比例^[24, 26]。但 C/N 的降低幅度较小(13.0%),这由于土壤氮素主要存在于土壤有机质中,二者变化相对一致^[13]。草地退化降低了三江源高寒草甸土壤 C/N,加之植被覆盖降低,暗示草地退化可能一定程度上缓解了植被生长的氮限制^[6],有利于退化稳态的维持^[5]。三江源国家公园高寒草甸土壤 C/P 远小于我国土壤 C/P(105:1),这主要由于青藏高原土壤发育年轻导致磷素的矿化速率相对较高但利用水平相对较低^[24]。土壤 N/P 小于 10,暗示高寒植物生长表现为 N 限制,这与青藏高原植被生产力和氮素密切耦合的结论一致^[26, 35]。草地退化对土壤生态化学计量特征的空间降低效应主要取决于海拔和纬度,与草地退化对 SOC 和 TN 的空间影响因素基本一致,这主要因为 C/N、C/P 主要受控于 SOC,而 N/P 则受控于 TN。

4 结论

基于三江源国家公园高寒草甸原生植被和退化植被的配对研究,草地退化显著降低了表层土壤有机碳和

全氮含量及土壤生态化学计量特征,但对土壤全磷含量的影响微弱。草地退化对土壤有机碳和全氮的空间降低效应主要受控于纬度和海拔,对低纬度高海拔高寒草甸的驱动更为强烈。在三江源国家公园中,草地退化导致高寒草甸土壤碳氮损失严重,改变了土壤营养元素的供需平衡,是退化稳态维持的重要因素之一。

参考文献 (References):

- [1] Li W, Wang J L, Zhang X J, Shi S L, Cao W X. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 111: 134-142.
- [2] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [3] 李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2109-2118.
- [4] 曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化及其对土壤碳库的影响研究. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 208-211.
- [5] 张法伟, 王军邦, 林丽, 李以康, 杜岩功, 曹广民. 青藏高原高寒嵩草草甸植被群落特征对退化演替的响应. *中国农业气象*, 2014, 35(5): 504-510.
- [6] 曹广民, 吴琴, 李东, 胡启武, 李月梅, 王溪. 土壤-牧草氮素供需状况变化对高寒草甸植被演替与草地退化的影响. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 25-28.
- [7] 周华坤, 赵新全, 周立, 刘伟, 李英年, 唐艳鸿. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. *草业学报*, 2005, 14(3): 31-40.
- [8] Chen L Y, Fang K, Wei B, Qin S Q, Feng X H, Hu T Y, Ji C J, Yang Y H. Soil carbon persistence governed by plant input and mineral protection at regional and global scales. *Ecology Letters*, 2021, 24(5): 1018-1028.
- [9] Körner C. *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [10] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 冯彦皓, 李守丽, 朱剑霄, 刘国华, 王彦荣, 南志标. 退化高寒草甸的近自然恢复: 理论基础与技术途径. *科学通报*, 2020, 65(34): 3898-3908.
- [11] Angst G, Mueller K E, Nierop K G J, Simpson M J. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108189.
- [12] Zhang X Y, Jia J, Chen L T, Chu H Y, He J S, Zhang Y J, Feng X J. Aridity and NPP constrain contribution of microbial necromass to soil organic carbon in the Qinghai-Tibet alpine grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108213.
- [13] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 王启兰, 丁路明, 施建军. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 441-449.
- [14] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd ed. New York, USA: Springer, 2011: 142-145.
- [15] 张法伟, 郭竹筠, 李以康, 林丽, 周国英, 曹广民. 青海湖芨芨草干草原植被退化对土壤温湿特征的影响. *干旱区研究*, 2013, 30(2): 219-225.
- [16] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 景增春, 施建军, 杜岩功, 曹广民. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(2): 225-230.
- [17] Yuan Z Q, Wu Q B, Song X, Jiang X J, Gao S R, Wang Q F, Li G Y. Pasture degradation impact on soil carbon and nitrogen fractions of alpine meadow in a Tibetan permafrost region. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(5): 2330-2342.
- [18] Wang W Y, Wang Q J, Lu Z Y. Soil organic carbon and nitrogen content of density fractions and effect of meadow degradation to soil carbon and nitrogen of fractions in alpine *Kobresia* meadow. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(5): 660-668.
- [19] 刘育红, 李希来, 魏卫东, 芦光新, 田丰, 乔有明. 高寒草甸“黑土滩”对土壤养分的影响. *西北农业学报*, 2009, 18(3): 304-308.
- [20] 魏卫东, 李希来. 三江源区不同退化程度高寒草地土壤特征分析. *湖北农业科学*, 2012, 51(6): 1102-1106.
- [21] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 卡召加, 尚伦宇, 王少影. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 254-260.
- [22] 李亚娟, 孙灿灿, 曹广民, 龙瑞军. 三江源区不同利用方式草地生物量及土壤养分特征. *草原与草坪*, 2016, 36(4): 48-53.
- [23] 张法伟, 李英年, 汪诗平, 赵新全. 青藏高原高寒草甸土壤有机质、全氮和全磷含量对不同土地利用格局的响应. *中国农业气象*, 2009, 30(3): 323-326, 334-334.
- [24] Li G, Zhang Z, Shi L L, Zhou Y, Yang M, Cao J X, Wu S H, Lei G C. Effects of Different Grazing Intensities on Soil C, N, and P in an Alpine Meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11): 2584.
- [25] 刘敏, 孙经国, 徐兴良. 土壤元素失衡是导致高寒草甸退化的重要诱因. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2574-2580.
- [26] 林丽, 李以康, 张法伟, 杜岩功, 郭小伟, 李婧, 刘淑丽, 曹广民. 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2013, 33(17): 5245-5251.
- [27] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [28] 魏卫东, 刘育红, 马辉. 高寒草甸退化草地土壤有机碳含量 Meta 分析研究. *环境科学与管理*, 2018, 43(10): 53-58.
- [29] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹, 黄麟. 三江源国家公园生态功能时空异质特征及其重要性辨识. *生态学报*, 2019, 39(4): 1361-1374.
- [30] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 祁龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.
- [31] R Development Core Team. *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2006.
- [32] Lu J F, Dong Z B, Li W J, Hu G Y. The effect of desertification on carbon and nitrogen status in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(2): 807-815.
- [33] 曹广民, 张金霞, 鲍新奎, 周党卫. 高寒草甸生态系统磷素循环. *生态学报*, 1999, 19(4): 514-518.
- [34] 秦小静, 孙建, 王海明. 三江源土壤养分分布特征及其对主要气候要素的响应. *生态环境学报*, 2015, 24(8): 1295-1301.
- [35] 姜哲浩, 周泽, 陈建忠, 张德罡, 陈建纲, 柳小妮. 三江源区不同海拔高寒草原土壤养分及化学计量特征. *草地学报*, 2019, 27(4): 1029-1036.
- [36] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.