

不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征^{*}

罗亚勇^{1**} 张宇¹ 张静辉¹ 卡召加² 尚伦宇¹ 王少影¹

(¹中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; ²甘肃省甘南藏族自治州河曲马场, 甘肃甘南 747300)

摘要 为了阐明不同退化阶段高寒草甸土壤的化学计量特征, 沿着高寒草甸退化的梯度选取了原生嵩草草甸、轻度退化草甸和严重沙化草甸, 测定了高寒草甸退化过程中不同深度土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量。结果表明: 随着高寒草甸的退化, 0~100 cm 土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量以及碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比均呈降低趋势, 且土壤有机碳对高寒草甸退化的敏感性最高, 全氮、全磷和全钾的敏感性依次降低, 表层 20 cm 的土壤有机碳和全氮可作为表征高寒草甸退化程度最敏感的土壤养分指标。另外, 随着草甸的退化, 土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量及其化学计量比的垂直分布明显不同: 随着土壤深度的增加, 原生嵩草草甸和轻度退化草甸的土壤有机碳、全氮和全磷含量以及碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比在 0~40 cm 范围内锐减, 在 40 cm 以下缓慢降低并趋于稳定; 而沙化草甸土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾及其化学计量比随着土壤深度的增加保持不变。

关键词 高寒草甸; 退化; 化学计量特征; 垂直分布

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)2-0254-07

Soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degradation stages. LUO Ya-yong^{1**}, ZHANG Yu¹, ZHANG Jing-hui¹, KA Zhao-jia², SHANG Lun-yu¹, WANG Shao-ying¹ (*Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ²Hequ Horse Farm in South Gansu Tibetan Autonomous Prefecture, Gannan 747300, Gansu, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 254–260.

Abstract: To clarify the soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degradation stages, the native *Kobresia* meadow, mildly degraded meadow, and seriously degraded sandy meadow were selected to measure their soil organic carbon (SOC), total nitrogen (N), total phosphorous (P), and total potassium (K) contents at different soil depths. With the degradation of alpine meadow, the SOC, N, P, K, C : N, C : P, C : K, N : P, N : K, and P : K in 0–100 cm profiles presently a decreasing trend, and SOC was most sensitive to the degradation, followed by total N, P, and K. The SOC and N in top (0–20 cm) soil could be used as the most sensitive indicators for the degradation degree of alpine meadow. The vertical distribution of SOC, N, P, and K differed with the degradation stage of the alpine meadow. For native *Kobresia* meadow and mildly degraded meadow, the SOC, N, P, K, C : N, C : P, C : K, N : P, N : K, and P : K in 0–40 cm soil layer decreased sharply with soil depth, but those in 40–100 cm soil layer had a slow decrease and tended to be stable; for seriously degraded sandy meadow, these stoichiometry characteristics remained unchanged with soil depth.

Key words: alpine meadow; degradation; stoichiometry characteristics; vertical distribution.

^{*} 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才成长基金项目(Y184B01001)、国家重点基础研究发展计划项目(2011CB952002)和公益类行业专项(GYHY201106022)和国家自然科学基金项目(40975008)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: luoyy@lzb.ac.cn

收稿日期: 2011-07-28 接受日期: 2011-11-24

土壤养分状况对于植物的生长起着关键性的作用,直接影响着植被群落的组成、结构与生产力水平(刘蓉等,2010)。高寒草甸生态系统的土壤有机碳、全氮、全磷和全钾可能受一些独特环境因子的影响,例如低温、冻土和淹水等(Hobbie *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2010)。与其他生态系统相比,高寒草甸生态系统植物根茎比大、根系分布浅,然而对其土壤的化学计量特征了解甚少(Yang *et al.*, 2010)。

生态化学计量学研究可以追溯到20世纪50年代,最早是针对水生生态系统开展的,20世纪90年代以来,生态化学计量学理论的系统化和逐步成熟并逐渐在陆地生态系统中展开研究(Elser *et al.*, 2000; Sterner & Elser, 2002; 贺金生和韩兴国, 2010)。近年来生态化学计量学在国内发展较快,这些研究主要集中在:1)区域C:N:P化学计量学格局及其驱动因素方面(Han *et al.*, 2005; He *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2011);2)施肥对群落N:P比率的影响(Zhang *et al.*, 2004);3)不同演替阶段优势植物和土壤的N:P比率的变化及N、P化学计量学在陆地生态系统中的生态指示作用(刘兴诏等,2010; 银晓瑞等,2010);4)化学计量内稳性与生态系统特性的关系(Yu *et al.*, 2010)。然而,以往对陆地植物碳氮磷化学计量特征及其在大尺度的格局研究较多,而对土壤碳氮磷化学计量特征的研究相对较少(Yang *et al.*, 2010)。

高寒草甸生态系统由于特殊的地理位置和恶劣的环境条件,对区域气候变化和人类活动响应敏感,生态系统脆弱、草甸退化尤为突出(李小艳等, 2010; Yang *et al.*, 2010; 白炜等,2011)。以玛曲为例,玛曲境内433 km长的黄河沿岸已经有约200 km出现了严重草场退化现象,草地退化导致土壤的蓄水保肥能力减弱,并将向“黑土滩”和沙漠化方向发展(王向涛等,2010)。因此不同退化阶段高寒草甸土壤中的碳氮磷钾及其比值特征需要深入研究。鉴于此,本文以玛曲草地中最具代表性的高寒草甸为对象,对高寒草甸退化过程中的原生嵩草草甸、轻度退化草甸和严重沙化草甸3种生境土壤的碳氮磷钾进行研究,以期揭示高寒草甸退化过程中土壤碳氮磷钾及其比值特征的变化格局,为高寒草甸生态系统退化程度的诊断筛选出最敏感的土壤养分指标,并为其恢复治理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

玛曲县属甘肃省甘南州的一个纯牧业县,位于黄河上游,甘肃省西南部,甘、青、川3省交界处,地理位置属青藏高原东端(33°06′30″N—34°30′15″N, 100°45′45″E—102°29′00″E),海拔3300~4806 m。全县总面积96.05万hm²,拥有天然草地85.87万hm²,占土地总面积的89.5%,可利用草地83.03万hm²,占草地总面积的96.7%。气候以高寒湿润气候为特征,年均气温1~2℃,活动积温253.6℃,平均风速7.5 m·s⁻¹,最大风速36 m·s⁻¹,全年大风日数77.1 d(8级以上),年日照平均2583.9 h,年降水量615.5 mm,年蒸发量1353.4 mm。主体土壤类型为亚高山草甸土,土壤呈有机碳及全量养分丰富而速效养分贫乏的特点(王向涛等,2010)。植被类型是以莎草科的矮嵩草(*Kobresia humilis*)、禾本科的异针茅(*Stipa aliena*)、羊茅(*Festuca ovina*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、蔷薇科的鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)为优势种,毛茛科的钝裂银莲花(*Anemone obtusiloba*)为常见种,并伴有其他杂草的典型高寒草甸。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查及取样 根据研究区域高寒草甸的退化程度,利用空间分布代替时间演替的方法(周华坤等,2005),在同一退化系列上选取了3种类型的样地,即原生嵩草草甸(33°45′29″N, 101°40′39″E,海拔3503 m)、轻度退化草甸(33°53′14″N, 102°08′29″E,海拔3423 m)和沙化草甸(33°54′47″N, 102°10′38″E,海拔3438 m)。各样地植被盖度、植物种数、优势植物及土壤机械组成(0~20 cm)如表1所示。各草地地形均起伏不大,都是坡度<10°的平缓高寒草甸。原生嵩草草甸和轻度退化草甸土壤中主要以粉粒为主,沙化草甸土壤中主要以砂粒为主。原生嵩草草甸的砂粒含量小于轻度退化草甸,而粉粒含量大于轻度退化草甸。原生嵩草草甸主要以莎草为主,轻度退化草甸由禾草、杂草和莎草相间组成,沙化草甸主要有禾草和莎草,优势种植物有藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)、矮蕨草(*Scirpus pumilus*)、赖草(*Leymus secalinus*)、黑褐穗藁草(*Carex atrofusca*)和粗壮嵩草(*Kobresia robusta*)等。

表 1 不同退化阶段高寒草甸植物群落类型及其主要特点
Table 1 Plant community types and main characteristics in alpine meadows of different degradation stages

样地	植被总盖度 (%)	优势植物及其盖度 (%)	植物 种数	0 ~ 20 cm 土壤粒级组成 (%)		
				粘粒 (<0.02 mm)	粉粒 (0.02 ~ 0.05 mm)	砂粒 (0.05 ~ 2 mm)
原生嵩草草甸	92±1	藏嵩草(82)、鹅绒委陵菜(5)矮嵩草/4	6	3.4±0.7	80.1±2.4	16.5±1.7
轻度退化草甸	92±2	异针茅(29)、鹅绒委陵菜(16)矮蒿草、矮蒿草/9	26	3.2±0.6	67.4±5.2	29.4±5.7
沙化草甸	5±0	赖草(3.4)、黑褐穗薹草(1.4)粗壮蒿草/0.5	5	0	0.8±0.2	99.2±0.2

每个样地随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方,用内径 3.5 cm 的土钻分层采集土壤样品,取样深度分 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 共 6 层。每个样地共 18 个混合土样,3 个样地共 54 个土样。

1.2.2 土壤养分测定和计算 采集的土样带回实验室后自然风干,去除植物残体、根系和可见的土壤动物,然后用木棍碾碎过筛(2 mm)并磨碎过 60 目筛。土壤有机质含量用重铬酸钾氧化-外加热法测定,全氮含量用凯氏定氮法测定;全磷采用 NaOH 碱溶-钼锑抗比色法测定,用火焰光度计法测定全钾,测定结果均以干重计。0 ~ 100 cm 土壤总体的养分含量计算方式为 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土壤乘以 10% 和 20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 土壤乘以 20% 的总和。

1.2.3 统计分析 采用 SPSS 统计分析软件包 (SPSS 16.0 for Windows, Chicago, USA) 对数据进行统计分析。不同草甸土壤养分的差异显著性用多重比较,首先对数据进行方差齐性检验,若方差检验结果为齐性,采用 LSD 法进行多重比较;若方差检验结果为非齐性,则用 Tamhane's T2 法进行多重比较。进行多重比较时,将各类数据转换为自然对数(以 e 为底的形式,即 ln(x+1))以满足正态分布要求和 ANOVA 假设。正态分布性检验采用柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验(one-sample Kolmogorov-Smirnov test)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的变化

表 2 0 ~ 100 cm 土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量 (g · kg⁻¹)
Table 2 Content of SOC, N, P and K in soil within 0~100 cm

草甸类型	有机碳	全氮	全磷	全钾
原生嵩草草甸	26.29±3.56 a	2.24±0.25 a	0.71±0.04 a	17.12±0.49 a
轻度退化草甸	16.39±1.70 b	1.44±0.13 b	0.48±0.01 b	15.70±0.84 b
沙化草甸	1.24±0.01 c	0.18±0.00 c	0.33±0.01 c	10.70±0.08 c

数值为平均值±标准差,同列同字母表示 3 种草甸类型在 0 ~ 100 cm 土壤间的差异不显著 (P>0.05),不同字母表示差异显著 (P<0.05)。

草甸退化过程中,0 ~ 100 cm 土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量均逐渐降低,呈现为原生嵩草草甸>轻度退化草甸>沙化草甸(表 2)。从原生嵩草草甸到轻度退化草甸,土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别降低了 38%、36%、33%、8%;从原生嵩草草甸到沙化草甸,土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别降低了 95%、92%、54%、37%。这表明在草甸退化过程中,0 ~ 100 cm 土壤有机碳、全氮、全磷以及全钾降低的程度依次减少。

草甸退化过程中不同深度土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的含量均呈现逐渐降低的趋势(图 1)。随着草甸的退化,不同深度土壤养分含量的垂直分布明显不同(图 1),原生嵩草草甸和轻度退化草甸的土壤有机碳、全氮和全磷含量均随着土壤深度的增加而降低;而原生嵩草草甸和轻度退化草甸的土壤全钾含量以及沙化草甸的土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量随着土壤深度的增加基本保持不变(图 1)。表层 20 cm 土壤有机碳的比例表现为轻度退化草甸(57%)>原生嵩草草甸(52%)>沙化草甸(20%);与有机碳的比例相似,表层 20 cm 土壤全氮的比例表现为轻度退化草甸(51%)>原生嵩草草甸(50%)>沙化草甸(20%);而表层 20 cm 土壤全磷的比例表现为原生嵩草草甸(32%)>轻度退化草甸(25%)>沙化草甸(21%)。

随着土壤深度的增加,原生嵩草草甸和轻度退化草甸的土壤有机碳、全氮和全磷含量在 0 ~ 40 cm 范围内锐减,在 40 cm 以下缓慢降低并趋于稳定。从原生嵩草草甸到轻度退化草甸,表层 0 ~ 20 cm 土

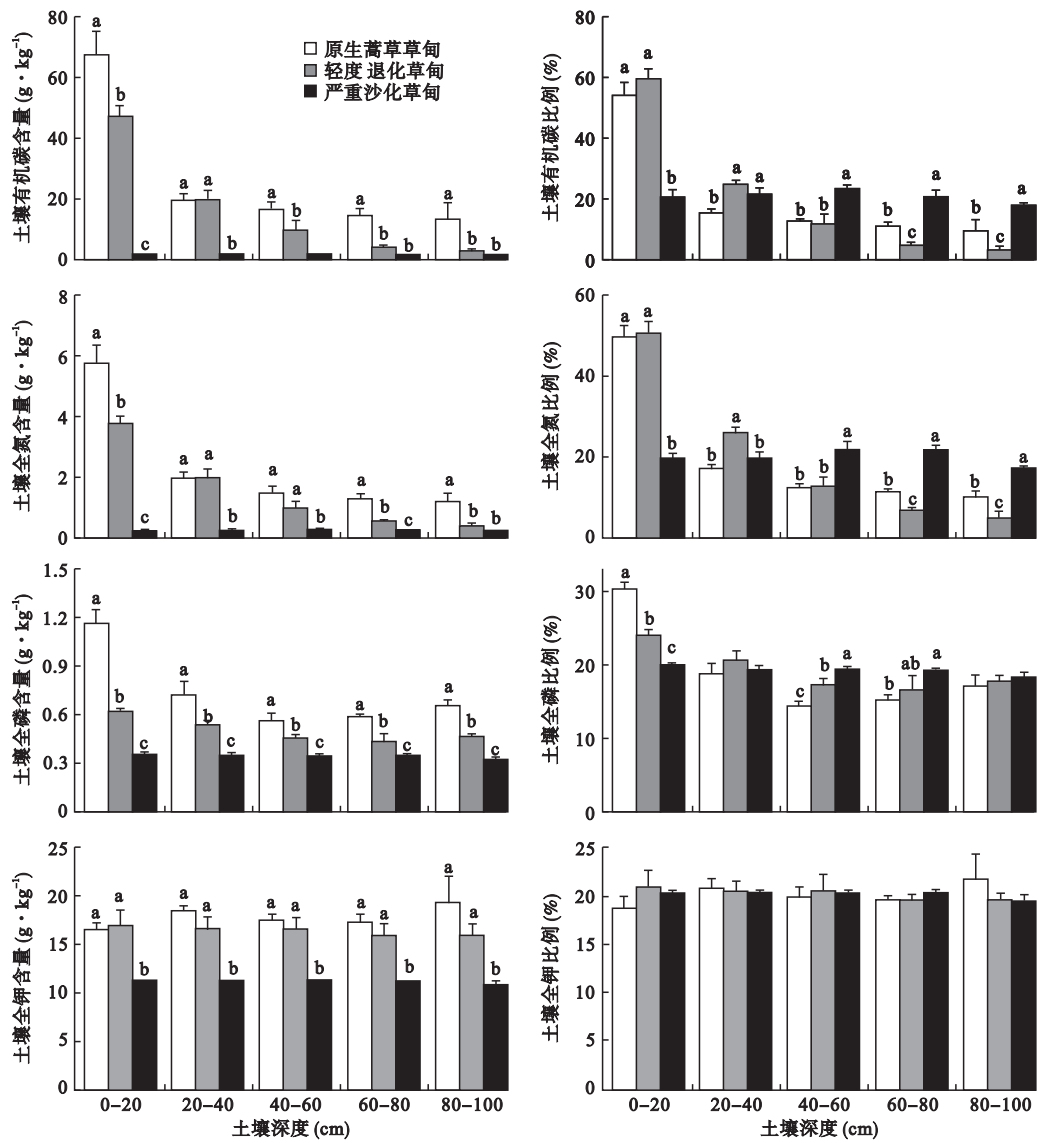


图1 不同深度土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾的含量和比例
Fig.1 Content and proportion of organic carbon (C), total nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in soil with different depth
数值为平均值±标准差;相同字母表示3种草甸类型相同深度土壤间的差异不显著($P>0.05$),不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

壤的有机碳、全氮和全磷含量分别降低了31%、35%和47%。从原生蒿草草甸到沙化草甸,0~20 cm土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别降低了98%、97%、70%和32%。另外,沙化草甸表层土壤有机碳、全氮和全磷的比例均显著低于原生蒿草草甸和轻度退化草甸,深层土壤有机碳、全氮和全磷的比例呈现相反趋势(图1)。

2.2 土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的化学计量比
高寒草甸退化过程中,0~100 cm土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比呈现降低的趋势,碳氮比、碳磷比、氮磷比和氮钾比在原生蒿草草甸和轻度退化草甸间没有显著差异(表3)。

从原生蒿草草甸到轻度退化草甸,土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比分别降低了3%、7%、32%、4%、30%和27%;从原生蒿草草甸到沙化草甸,土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比分别降低了43%、90%、92%、82%、87%和26%。这表明在草甸退化过程中,0~100 cm土壤有机碳、全氮、全磷以及全钾降低的程度依次减少。

高寒草甸退化过程中不同深度土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比呈现降低的趋势(图2)。另外,随着草甸的退化,不同深度土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷

表 3 0 ~ 100 cm 土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷钾比
Table 3 Ratios of C : N, C : P, C : K, N : P, N : K, and N : K in soil within 0–100 cm

草甸类型	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
原生嵩草草甸	11.71±0.31 a	36.86±3.10 a	1.54±0.24 a	3.15±0.19 a	0.13±0.02 a	0.04±0.00 a
轻度退化草甸	11.36±0.22 a	34.32±3.85 a	1.05±0.13 b	3.02±0.25 a	0.09±0.01 a	0.03±0.00 b
沙化草甸	6.73±0.15 b	3.78±0.13 b	0.12±0.00 c	0.56±0.01 b	0.02±0.00 b	0.03±0.00 b

数值为平均值±标准差, 同列相同字母表示 3 种草甸类型 0 ~ 100 cm 土壤间的差异不显著 ($P>0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

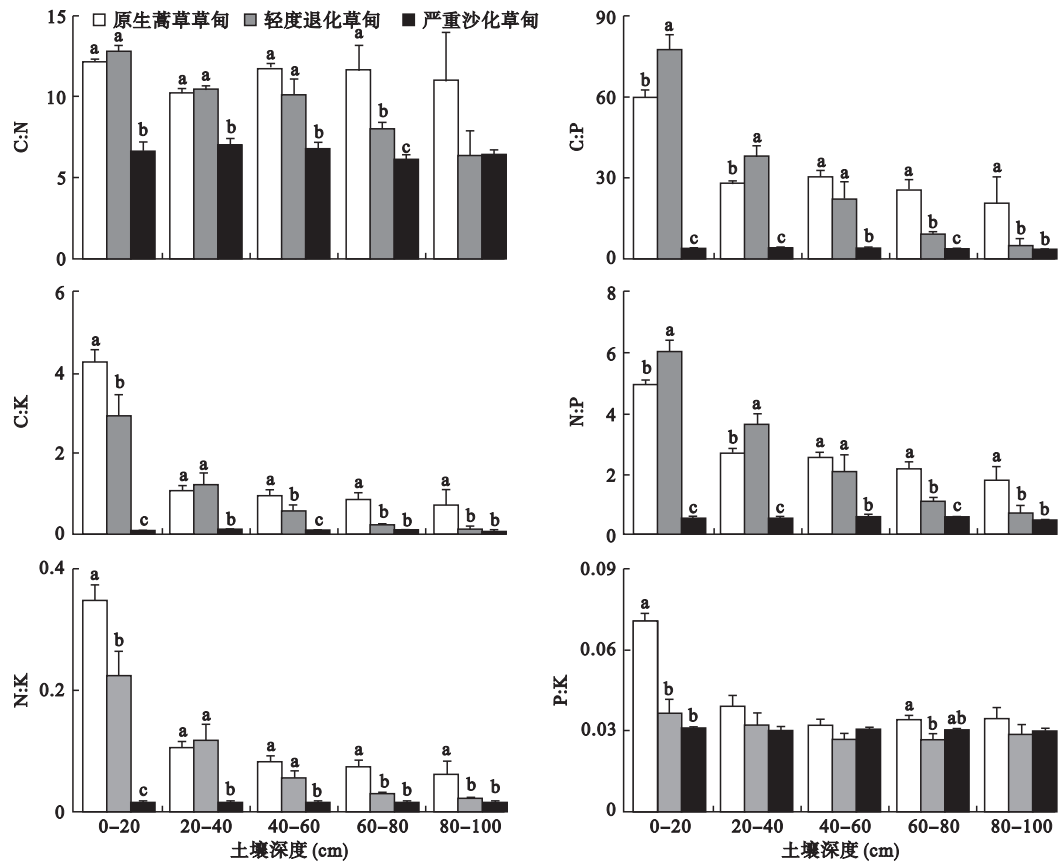


图 2 不同深度土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比

Fig. 2 Ratios of C : N, C : P, C : K, N : P, N : K, and N : K in soil with different depth

数值为平均值±标准差; 相同字母表示 3 种草甸类型相同深度土壤间的差异不显著 ($P>0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

钾比的垂直分布明显不同:原生嵩草草甸土壤的碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷钾比均随着土壤深度的增加而降低, 而其碳氮比在不同深度土壤之间没有显著差异;轻度退化草甸的土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷钾比均随着土壤深度的增加呈降低趋势;而沙化草甸土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷钾比随着土壤深度的增加基本保持不变。另外,随着土壤深度的增加,原生嵩草草甸和轻度退化草甸土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比在 0 ~ 40 cm 范围内锐减,在 40 cm 以下缓慢降低并趋于稳定(图 2)。

3 讨论

3.1 高寒草甸浅层土壤有机碳、全氮、全磷和全钾对高寒草甸退化的敏感性

高寒草甸退化过程中 0 ~ 100 cm 土壤有机碳、全氮、全磷和全钾下降的程度依次减少,这表明 0 ~ 100 cm 土壤有机碳对高寒草甸退化的敏感性最高,全氮、全磷和全钾的敏感性依次降低。玛曲原生嵩草草甸 0 ~ 20 cm 的土壤有机碳低于青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡格多牧委会未退化草甸的该层次土壤有机碳含量(周华坤等,2005),而与其轻度退化草甸的该层次土壤有机碳含量相当,这表明

玛曲高寒草甸可能面临较强的放牧压力。

在不同退化阶段高寒草甸 0 ~ 100 cm 土壤中,轻度退化草甸(57%)和原生嵩草草甸(52%)的表层 20 cm 土壤有机碳的比例高于全球生态系统平均水平(45%)(图 1);但是随着高寒草甸的极度退化,严重沙化草甸表层 20 cm 土壤有机碳的比例(20%)急剧下降到远低于全球水平(Jobbágy & Jackson, 2001)。同样地,轻度退化草甸(51%)和原生嵩草草甸(50%)的表层 20 cm 土壤全氮的比例高于全球生态系统平均水平(39%)(图 1);但是随着高寒草甸的极度退化,严重沙化草甸表层 20 cm 土壤全氮的比例(20%)急剧下降到远低于全球水平(Jobbágy & Jackson, 2001)。这表明相对于全球其他植被区,原生嵩草草甸和轻度退化草甸的土壤有机碳和全氮分布较浅,高寒草甸土壤有机碳和全氮的浅层化分布可能由高寒草甸植物根系的浅层化分布有关(Jobbágy & Jackson, 2000; Yang *et al.*, 2009)。但是随着高寒草甸的严重退化,沙化草甸的浅层土壤有机碳和全氮急剧降低,浅层土壤有机碳和全氮降低的程度高于深层土壤(图 1)。因此,表层 20 cm 的土壤有机碳和全氮可作为表征高寒草甸生态系统退化程度最敏感的土壤养分指标。

原生嵩草草甸(32%)、轻度退化草甸(25%)和沙化草甸(21%)表层 20 cm 土壤全磷的比例均远低于全球生态系统的平均水平(49%);原生嵩草草甸(19%)、轻度退化草甸(21%)和沙化草甸(20%)表层 20 cm 土壤全钾的比例也均远低于全球生态系统的平均水平(31%)(Jobbágy & Jackson, 2001)。这表明相对于全球其他植被区,不同退化阶段高寒草甸的土壤全磷和全钾均分布较深,且随着原生高寒草甸的退化,浅层土壤全磷的比例逐渐降低,而不同退化阶段高寒草甸土壤全钾的比例保持稳定。

3.2 土壤化学计量比对高寒草甸退化和土壤深度的响应

与全球不同生态系统土壤的平均水平(C : N : P = 186 : 13 : 1)(Cleveland & Liptzin, 2007)相比,不同退化阶段高寒草甸的碳氮比、碳磷比和氮磷比均较低。随着草甸的退化,不同深度土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷钾比的垂直分布明显不同:随着土壤深度的增加,原生嵩草草甸和轻度退化草甸土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比在 0 ~ 40 cm 范围内锐减,在 40 cm 以下缓慢降低并趋于稳定;而沙化草甸土壤的碳

氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比以及磷钾比随着土壤深度的增加基本保持不变(图 2)。

与土壤有机碳和全氮相比,不同退化阶段的土壤碳氮比率在不同深度土壤间均维持相对稳定,这验证了不同生态系统土壤碳氮比率相对稳定的结果(Cleveland & Liptzin, 2007; Yang *et al.*, 2010),同时不同深度土壤碳氮比率相对稳定也符合化学计量学的基本原则,即有机物质的形成需要一定数量的氮和其他营养成分与其相应的相对固定比率的碳(Sterner & Elser, 2002)。但是不同退化阶段的土壤碳磷比率和碳钾比率均随着土壤深度的增加呈降低趋势,可能反映了深层土壤更高的分解程度以及储藏了年代更长的腐殖质(Callesen *et al.*, 2007)。

参考文献

- 白 炜, 王根绪, 刘光生. 2011. 青藏高原高寒草甸生长期 CO₂ 排放对气温升高的响应. 生态学杂志, **30**(6): 1045-1051.
- 贺金生, 韩兴国. 2010. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, **34**(1): 2-6.
- 李小艳, 董世魁, 朱 磊, 等. 2010. 三江源区高寒草地退化与恢复过程中二氧化碳净交换特征. 生态学杂志, **29**(10): 1944-1949.
- 刘 蓉, 张卫国, 江小雷, 等. 2010. 垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究. 草业科学, **27**(10): 96-103.
- 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 2010. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, **34**(1): 64-71.
- 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 等. 2010. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究. 草地学报, **18**(4): 510-516.
- 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 2010. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学. 植物生态学报, **34**(1): 39-47.
- 周华坤, 赵新全, 周 立, 等. 2005. 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, **14**(3): 31-40.
- Callesen I, Raulund-Rasmussen K, Westman CJ, *et al.* 2007. Nitrogen pools and C : N ratios in well-drained Nordic forest soils related to climate change and soil texture. *Boreal Environment Research*, **12**: 681-692.
- Cleveland CC, Liptzin D. 2007. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, **85**: 235-252.
- Elser J, Fagan WF, Denno RF, *et al.* 2000. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, **408**: 578-580.
- Han W, Fang J, Guo D, *et al.* 2005. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in

- China. *New Phytologist*, **168**: 377–385.
- Han W, Fang J, Reich P, *et al.* 2011. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. *Ecology Letters*, **14**: 788–796.
- He JS, Wang L, Flynn DFB, *et al.* 2008. Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, **155**: 301–310.
- Hobbie SE, Schimel JP, Trumbore SE, *et al.* 2000. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils. *Global Change Biology*, **6**: 196–210.
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, **10**: 423–436.
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, **53**: 51–77.
- Sterner RW, Elser JJ. 2002. Ecological stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton; Princeton University Press Princeton.
- Yang Y, Fang J, Guo D, *et al.* 2010. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: Nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. *Biogeosciences Discussions*, **7**: 1–24.
- Yang Y, Fang J, Smith P, *et al.* 2009. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. *Global Change Biology*, **15**: 2723–2729.
- Yu Q, Chen Q, Elser J, *et al.* 2010. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning, and stability. *Ecology Letters*, **13**: 1390–1399.
- Zhang LX, Bai YF, Han XG. 2004. Differential responses of N : P stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N additions in a steppe ecosystem in Nei Mongol. *Acta Botanica Sinica*, **46**: 259–270.
-
- 作者简介** 罗亚勇,男,1983年生,助理研究员,博士,主要从事植物生态学方面的研究。E-mail: luoyy@lzb.ac.cn
- 责任编辑** 刘丽娟
-