

不同植被被覆下温性草原土壤养分分异特征*

李以康^{1,2} 张法伟¹ 林丽¹ 杜岩功¹ 曹广民¹ 郭小伟^{1,2} 周国英¹ 韩发^{1,2*}

(¹中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 以青海湖区4种不同植被被覆下温性草原为对象, 研究在自然及放牧因素影响下土壤异质性分布格局。结果表明: 速效养分(速效氮、速效磷、速效钾)具有明显的分层特征, 表层土壤含量最高, 随土层加深含量逐渐降低。紫花针茅退化样地各层土壤速效养分含量普遍低于其他3个样地, 恢复时间较长的样地(早熟禾样地)和有外来物质输入的样地(赖草样地)含量较高。全量养分表现不同, 全氮含量表现出分层现象, 退化和恢复时间短样地(紫花针茅退化样地、垂穗披碱草样地)表层(0~10 cm)和第二层(10~20 cm)全氮含量高, 下层含量迅速降低; 早熟禾样地和赖草样地各层全氮含量都较高; 全磷含量随土层降低没有出现显著差异($P>0.05$), 紫花针茅退化样地0~40 cm土层全磷含量都显著低于其他样地($P<0.05$), 其全钾和有机质含量也普遍低于其他样地; 有机质与全量养分、速效养分均呈现极显著相关($P<0.01$)。随土层加深土壤容重增高, 退化使土壤pH值升高。退化温性草原在恢复6 a后土壤基本得到恢复, 人类扰动和自然因素都影响到土壤养分状况。

关键词 青海湖; 温性草原; 土壤养分; 植被类型; 封育

中图分类号 Q148 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)7-1710-07

Differentiation characteristics of soil nutrients in temperate steppe under different vegetation types. LI Yi-kang^{1,2}, ZHANG Fa-wei¹, LIN Li¹, DU Yan-gong¹, CAO Guang-min¹, GUO Xiao-wei^{1,2}, ZHOU Guo-ying¹, HAN Fa^{1,2*} (¹Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(7): 1710-1716.

Abstract: Taking the temperate steppe under four vegetation types around the Qinghai Lake of Northwest China as test objects, this paper studied the distribution patterns of soil nutrient heterogeneity under natural condition and grazing disturbance. There existed obvious layering characteristics in the soil available N, P, and K, being the highest in surface layer (0-10 cm) and decreased with soil depth. In degraded *Stipa purpurea* steppe, the available nutrient contents in different soil layers were lower than those in *Poa* steppe, *Elymus nutans* steppe, and *Leymus secalinus* steppe. The *Poa* steppe which was restored for a longer time and experienced exotic substance input had higher contents of soil available nutrients. The soil total N content in degraded *S. purpurea* steppe and *E. nutans* steppe was higher in 0-20 cm layer, but decreased sharply below 20 cm depth. In contrast, both *Poa* steppe and *L. secalinus* steppe showed a higher soil total N content at each depth. The soil total P content had no significant correlation with soil depth ($P>0.05$), but was significantly lower at the depths 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, and 30-40 cm in degraded *S. purpurea* steppe than in other three steppes ($P<0.05$). The soil total K and organic matter contents in degraded *S. purpurea* steppe were also lower than those in other three steppes. Soil organic matter content had significant correlations with soil total and available N, P, and K ($P<0.01$). Soil bulk density increased with soil depth. Degradation resulted in the increase of soil pH value. After 6 years recovery of degraded temperate steppes, the soil could be basically recovered. It was suggested that both grazing disturbance and natural factors could affect the soil nutrient status in temperate steppe.

Key words: Qinghai Lake; temperate steppe; soil nutrient; vegetation type; fencing.

* 国家自然科学基金面上项目(31270576)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAC30B40)和国家自然科学基金重点项目(41030105)资助。

** 通讯作者 E-mail: hanfa@nwipb.cas.cn

收稿日期: 2013-01-07 接受日期: 2013-03-15

中国草地面积接近 $4 \times 10^6 \text{ km}^2$, 超过国土面积的 40%, 在畜牧业生产和环境保护方面举足轻重 (Akiyama & Kawamura, 2007)。自然因素和人类活动扰动能够影响到草地植被生长和系统状态, 导致生态系统发生演替。放牧干扰下, 草地发生逆向或者正向演替, 群落结构改变, 群落外貌也通常会随着优势种和种类组成的改变而发生变化, 草原植物群落的结构和外貌通常以优势种和种类组成为特征, 优势种更替成为植物群落演替的标识 (刘忠宽等, 2006)。

群落生长与土壤基质类型具有显著关系 (Fraser *et al.*, 1987), 不同植物种类对土壤有限养分资源的竞争能力和适应能力差异导致群落异质性, 而植物群落通过其生长过程对土壤水分、容重等的互馈作用, 逐渐改变土壤养分状况, 增大了土壤资源的空间异质性 (Hooper & Vitousek, 1998), 群落演替过程中土壤养分的变化与群落结构动态相对应 (刘忠宽等, 2006), 二者是相互制约、相互促进的两个对立统一的系统 (李昌龙等, 2011)。青藏高原高寒草原是放牧生态系统, 海拔高, 环境恶劣, 生态系统脆弱, 易受人类活动和自然因素扰动。草地在放牧压力和自然因素干扰下会发生退化, 成为不同优势植物为特征的草地类型 (周兴民等, 2001; 曹广民等, 2007)。而退化草地在封育减牧等措施下也会进展演替为不同草地类型 (李以康等, 2010)。近些年来学者对青藏高原草地生态从植被被覆 (杨元合和朴世龙, 2006)、群落演替 (李志丹等, 2004)、生产力改变 (罗天祥等, 2002)、全球变化 (姚檀栋和朱立平,

2006)、碳库及源/汇效应 (王根绪等, 2002; 陶贞等, 2006)、退化过程及机理等方面进行了大量研究, 但对处于相同环境中草地由于扰动不同而形成不同植被被覆下的土壤养分分异特征还很少研究。本研究以在人类及自然扰动下的青海湖区温性草原为对象, 探究不同植被类型样地的土壤养分、容重、pH 值的分异变化, 以期加深对土壤养分变化与植被演替协同关系了解, 为合理利用草地提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

环青海湖地区平均海拔 3000 ~ 4000 m, 处于西风带、东亚季风区和青藏高原季风区的交汇地带, 属半干旱的温带大陆性气候 (伏洋等, 2008)。样地所在地刚察县多年平均气温为 $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 极端最高温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 极端最低温 $-31 \text{ }^\circ\text{C}$, $\geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的年积温为 $1299 \text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降水量为 370.3 mm, 年蒸发量为 607.4 mm, 平均风力 > 8 级 (周国英等, 2004), 土壤类型为栗钙土。本实验选择青海湖北岸三角城羊场地区 4 块相邻样地, 由于自然和人为扰动影响, 样地优势种不同而演替成为不同的植被类型, 分别为紫花针茅退化样地、早熟禾样地、垂穗披碱草样地和赖草样地, 其中赖草样地为受自然因素扰动样地, 其他 3 个样地为不同程度放牧扰动下样地。样地具体情况见表 1。

1.2 研究方法

选取青海省三角城羊场的 4 个样地 (均为冬春

表 1 样地基本状况
Table 1 Basic information of plots

地点	地理位置	海拔(m)	草地类型	草地状况
三角城羊场	37°17.845'N, 100°14.317'E	3301	紫花针茅退化草地	植被盖度 25%, 自由放牧, 草高 25 cm, 由于放牧过度, 原生植被已退化为斑块状, 部分地段成为沙地, 占该地段的 40%
三角城羊场	37°17.946'N, 100°14.359'E	3291	早熟禾草地	冷地早熟禾 (<i>Poa crymophila</i>) 为主, 植被盖度 98%, 伴生种有垂穗披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)、甘肃马先蒿 (<i>Pedicularis kansuensis</i>)、细叶亚菊 (<i>Ajania tenuifolia</i>)、灰绿藜 (<i>Chenopodium glaucum</i>)、阿尔泰狗娃花 (<i>Heteropappus altaicus</i>) 等, 垂穗披碱草高 60 ~ 70 cm。为退化紫花针茅草地进行了为期 30 a 的封育之后形成, 作为产羔草场, 每年仅 2—5 月的产羔期利用, 经多年封育、轻牧, 发生次生演替, 导致耐践踏的紫花针茅逐渐退出。牧草生长良好、茂密
三角城羊场	37°17.869'N, 100°14.327'E	3296	垂穗披碱草草地	位于早熟禾样地地埂边, 该样地属于原来围栏外的重度退化紫花针茅草地, 为围栏外移流出的新封育地 (6 a)。以垂穗披碱草为主, 另有狼毒 (<i>Stellera chamsejasme</i>)、甘肃马先蒿、草地早熟禾、披针叶黄华 (<i>Thermopsis lanceolata</i>)、甘肃黄芪 (<i>Astragalus licentianus</i>)、甘肃棘豆 (<i>Oxytropis kansuensis</i>)、细叶亚菊、灰绿藜、赖草 (<i>Leymus secalinus</i>), 植被盖度 45%
刚察县 三角城羊场	37°17.843' N, 100°14.355'E	3287	赖草样地	该样地属于早期围栏封育草地的边缘, 由于风雨后草地恢复较好, 边缘区域群落高度较高, 有利的阻滞了从迎风面农田吹来的大量有机质和尘土, 多年堆积形成一条宽 4 ~ 5 m, 高 50 cm 左右的植被带, 随时间推移, 本地优势植物逐渐消失, 而具有克隆繁殖特性的赖草, 逐渐成为优势植物, 其上伴生有大量农田杂草, 植被盖度 100%

草场),分别为紫花针茅退化草地、早熟禾草地、垂穗披碱草草地和赖草草地(表1),垂穗披碱草草地面积为5 m×100 m,其他3个样地的面积都为100 m×100 m。土壤类型均为栗钙土。

2009年9月中旬,在上述4个样地内选择地势平缓、微地形差异小的地点取样,土样获得采用土钻法。土钻直径7 cm,在一个取样点上打9钻合并为一个样品,分层取样,每10 cm为一层,40~60 cm土层作为一层,每个样地5个重复。取样间隔50 m。土壤样品带回实验室摊开阴干后,摊于PVC板上,剪净样品表面植物。用橡胶辊进行粗碾,剔除大的石块、杂物,过2 mm筛后,弃去上层根系。将样品混匀,用四分法,取一半置于塑料袋中。剩余土壤继续碾碎,过1 mm筛,弃去上层根系,混匀,用多点取样法,取出约1/3样品。将取出的1/3样品,全部碾碎过0.25 mm筛,置于塑料袋中。土壤速效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法,土壤全钾测定采用火焰光度法,土壤速效磷测定采用钼锑抗比色法,土壤全磷测定采用硫酸-高氯酸消煮法,土壤速效氮测定采用康维皿法,土壤全氮测定采用半微量开氏法,土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化-外加热法,土壤容重采用环刀法,土壤pH值的测定采用氧化还原电位法(孙波等,2007)。

1.3 数据分析

采用Microsoft Excel 2007整理数据,并用SigmaPlot 16.0进行绘图,通过SPSS 16.0软件(SPSS, Chicago, USA)对不同植被被覆下草地养分含量、pH值及土壤容重等所有指标进行单因素分析(one-way ANOVA),利用Duncan检验法进行多重比较($P < 0.05$, $P < 0.01$)。

2 结果与分析

2.1 不同植被被覆下土壤速效氮及全氮含量

速效养分是植物可以直接吸收利用,代表草地土壤供应养分能力大小。同一样地速效氮含量基本都表现为随土层加深含量降低,表层土壤含量最高,下层最低(图1A)。不同样地相比较,紫花针茅退化样地各层速效氮含量最低,显著低于其他3个样地($P < 0.05$),赖草样地各层(最下面一层除外)速效氮含量最高,均高于(第2层)或者显著高于(第1、3和4层)其他样地。速效氮含量变化规律为赖草样地>早熟禾样地>垂穗披碱草样地>紫花针茅退化样地,人类扰动下样地随恢复时间延长土壤速效

氮含量增加,赖草样地对风沙的阻滞作用同样促进草地速效氮含量提高。

4个样地全氮含量表现不尽相同(图1D),紫花针茅退化草地和垂穗披碱草样地表现相近,表层和第2层含量较高而相近,下面3层含量迅速降低且含量较低;早熟禾样地和赖草样地全氮含量表现相近,赖草样地5层土壤全氮含量都较高且相近,早熟禾样地上面4层含量较高且相近,只是最下层含量显著降低。不同样地同一土层之间相比较,表层和第2层土壤全氮含量均未出现显著差异($P > 0.05$),20~30 cm和30~40 cm土层全氮含量都表现为早熟禾样地和赖草样地含量相近,显著高于紫花针茅退化样地和垂穗披碱草样地($P < 0.05$),40~60 cm土层以赖草样地含量最高,显著高于其他3个样地($P < 0.05$)。人类扰动和自然因素对上面2层土壤全氮含量影响不大,而对下层土壤影响较大。相关分析表明,速效氮和全氮含量之间相关性极显著($P < 0.01$)。

2.2 不同植被被覆下土壤速效磷及全磷含量

同一样地速效磷含量表现出分层分布特点(图1B),表层含量最高($P < 0.05$),随土层加深含量降低;赖草样地各层速效磷含量均高,表层和底层含量差距小(表层为底层的1.5倍),其他3个样地表层和底层间含量差别大(3.5~22.7倍)。不同样地同一土层间相比较,紫花针茅样地速效磷含量普遍低,远低于其他3个样地,表层含量仅为其他3个样地的16.1%~19.2%,其他3个样地表层速效磷含量未出现显著差异($P > 0.05$),其他各层都表现为赖草样地含量显著高于其他样地($P > 0.05$)。随封育恢复时间延长,样地表层和下层速效磷含量逐渐增加,赖草样地对风沙的阻滞促进各层速效磷含量的提高。

全磷含量变化不同于速效磷,同一样地各层之间含量相近,未出现显著差异($P > 0.05$);不同样地同一土层间相比较,紫花针茅退化样地上面4层土层全磷含量基本都显著低于其他3个样地($P < 0.05$),4个样地40~60 cm土层未出现显著差异($P > 0.05$)。人类扰动和自然因素对全磷含量影响与速效磷相似,促进全磷含量增加。相关性分析也表明,速效磷和全磷含量之间极显著相关($P < 0.01$)。

2.3 不同植被被覆下土壤速效钾及全钾含量

图1C表明,速效钾含量表现出和其他速效养分相同规律,随土层加深含量降低(紫花针茅退化样地表层速效钾含量低于下面各层)。随封育减牧

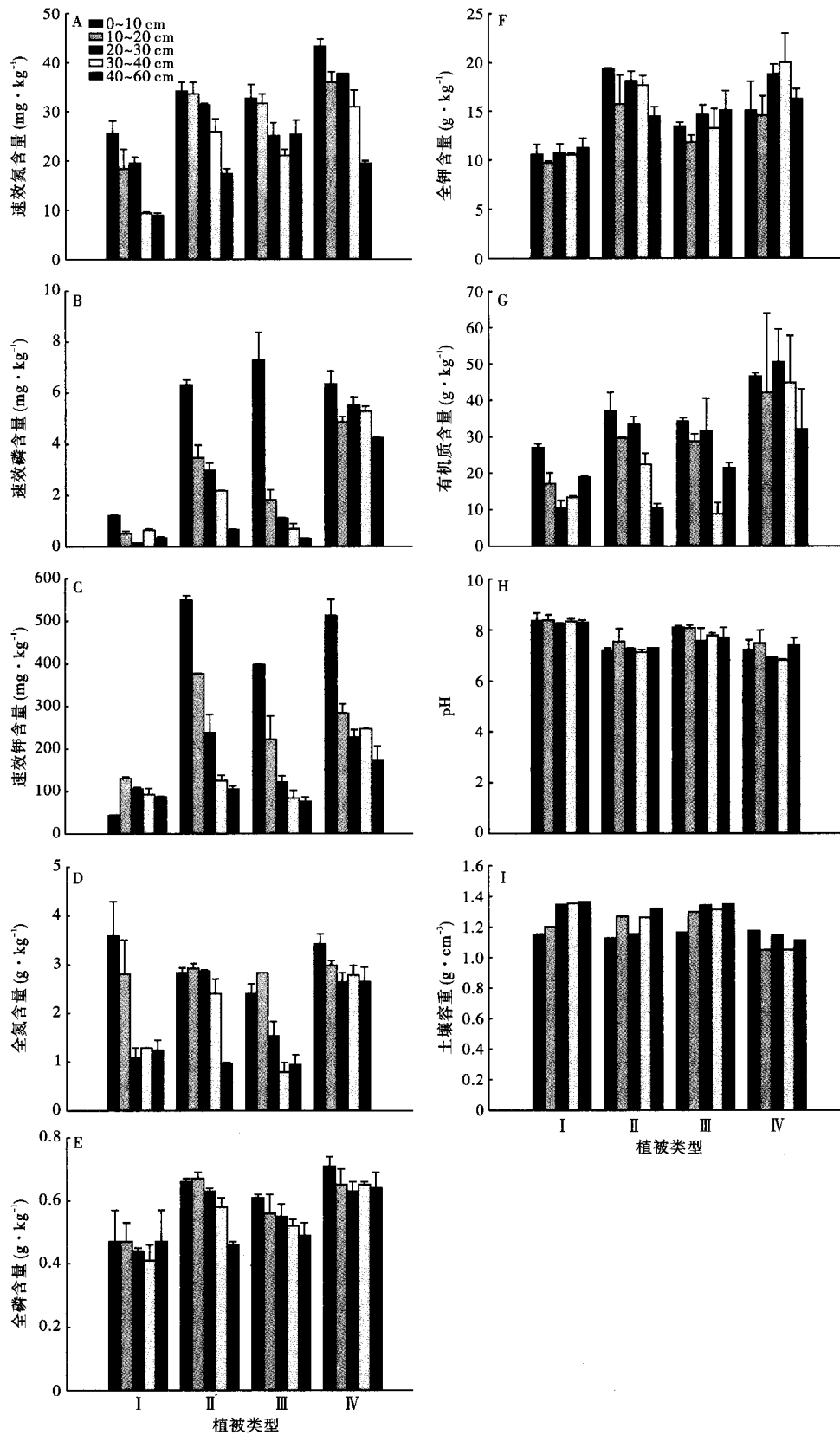


图1 不同植被被覆下土壤养分含量、pH值及土壤容重比较

Fig.1 Comparative of soil nutrient content, pH value and soil bulk density

I: 紫花针茅退化草地; II: 早熟禾草地; III: 垂穗披碱草样地; IV: 赖草草地。竖条表示标准偏差(n=3)。

时间延长,土壤各层速效钾含量都增加,早熟禾样地含量>垂穗披碱草样地含量>紫花针茅退化样地含量;赖草样地下面几层速效钾含量也普遍较高。同一土层不同样地间相比较,上面3层土壤都是早熟禾样地速效钾含量最高,赖草样地次之;下面2层土壤都是赖草样地速效钾含量最高($P<0.05$),其他3个样地含量相近($P>0.05$)。随封育恢复时间延长,封育减牧样地上层速效养分恢复较快,下层恢复慢,含量相差不大。

紫花针茅退化样地各层全钾含量普遍低于其他3个样地,同一土层不同样地间方差分析结果表明,早熟禾样地表层土壤全钾含量显著高于紫花针茅退化样地,10~20 cm 土层4个样地间含量未出现显著差异,下面3层土壤都是赖草样地含量最高,早熟禾和垂穗披碱草样地含量相近,紫花针茅退化样地含量最低。封育减牧样地各层全钾含量随封育恢复时间延长而逐渐升高。赖草样地各层含量都较高。相关性分析表明,速效钾和全钾之间相关性显著($P<0.05$)。

2.4 不同植被被覆下有机质含量变化

紫花针茅退化样地有机质含量全面低于其他3个样地。不同样地间同一土层分析结果表明,赖草样地各层土壤有机质含量最高,早熟禾和垂穗披碱草样地各层之间有机质含量相近,没有出现显著差异($P>0.05$);紫花针茅样地30~40 cm 土层和40~60 cm 土层有机质含量与其他3个样地相近。植被生长变异对上层土壤有机质影响更大,而对深层土壤影响效果不明显,可能与样地凋落物对表层和深层土壤输入的差异有关。

有机质与全量养分之间相关性分析表明,有机质含量与全氮、全磷和全钾含量之间都表现出了极显著相关($P<0.01$),而有机质含量与速效养分之间也都呈现出了极显著相关关系($P<0.01$)。

2.5 不同植被被覆下土壤容重及土壤 pH 值变化

土壤容重基本均表现为随土层加深而增高。4个样地相比较,赖草样地土壤容重相对最低,其他3个样地各层之间含量相近,趋势也基本一致。

4个样地土壤 pH 值均表现出相同规律性,各层土壤间 pH 值相近,未出现显著差异($P>0.05$),但是紫花针茅退化样地各层土壤 pH 值均高于其余3个样地。不同样地同一土层间相比较,除10~20 cm 外,紫花针茅退化样地都显著高于早熟禾样地 pH 值,其他2个样地各层土壤 pH 值也都低于或者

显著低于紫花针茅退化样地。

3 讨论

3.1 不同植被被覆生长对速效养分含量的影响

青藏高原环青海湖是生态脆弱而敏感的地区,面临普遍存在的过度利用草地退化等生态难题。草地退化和恢复程度不同,其植被演替、被覆变化、水分利用、根系活动等不同,造成地表植被生长的大环境和根部微环境的差异;而放牧活动的外在驱动和凋落物输入的差异,逐渐加重了这种分化(张静妮等,2010)。紫花针茅退化样地放牧较重,植被生长状况差(植被盖度25%,退化为斑块状),速效养分含量普遍低,与其他对退化样地的研究结果相一致(邹丽娜等,2009;张静妮等,2010)。早熟禾样地各速效养分含量高而稳定,这与样地封育减牧时间长而恢复程度好有关;垂穗披碱草样地虽然恢复时间相对短,植被盖度相对低(45%),但是速效养分含量除表层土壤速效钾显著低于早熟禾草地外,表层土壤速效氮和速效磷含量未出现显著差异,说明退化严重的温性草原在有效恢复措施下,植被恢复还需要一段时间,但是土壤已经基本得到恢复,土壤恢复先于植被恢复。赖草样地下层土壤速效养分含量也相对高于其他样地,这可能与赖草根系较深发达有关,在深层土壤有较活跃的生命活动;同时也可能与风沙的堆积从而导致外来养分输入有关。

3.2 不同植被被覆生长对全量养分及有机质含量的影响

高寒草地退化程度与土壤有机质含量变化密切相关(陈涛等,2011),草场管理措施影响到高寒草地土壤状况(刘兵等,2007)。土壤有机质含量受植物凋落物和死亡根系分解等因素影响,凋落物对土壤有机质的归还还是增加有机质含量的重要途径,而土壤中有机质含量的高低往往影响到系统土壤质地和其他全量养分含量。紫花针茅退化草地有机质含量最低,与这一样地放牧强度大,系统初级生产能力低,凋落物补充进入系统少有关。而经过6a的减牧封育之后,垂穗披碱草各层土壤有机质含量已经与经过30a减牧封育的早熟禾样地较为接近,土壤中有机质得到了充分的补充和恢复。这与杜锋等(2007)对黄土丘陵区的研究结果不同,黄土丘陵区草地撂荒6a内,全氮、全磷和全钾含量呈持续下降趋势,而与马祥华和焦菊英(2005)对黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复的结果相似,这可能与样地类型

和利用方式有关;赖草样地由于自身植被生长状况好和外来沉降沙尘的补充,各层有机质含量都是最高,拦截沙尘中携带的营养物质可能是一个重要的补充。紫花针茅退化样地表层土壤全氮含量最高,可能与放牧家畜较多的粪尿归还有关(Devoto & Medan, 2004);而垂穗披碱草样地全量养分含量(全氮、全磷、全钾)虽然都略低于早熟禾样地,但是基本没有显著差异,说明退化温性草原土壤有机质及全量养分的恢复在6 a左右,与速效养分的恢复规律基本一致。土壤养分的持续恢复,有利于草地的进展演替。有机质及全量养分含量在40 cm以下缓慢降低并趋于稳定(罗亚勇等, 2012)。

3.3 植被-土壤养分变化的协同关系

生态学理论认为,很多生物和非生物因素决定生物群落的结构和动态变化。营养元素是植物和动物生长必不可少的,在自然生态系统,植物得到的养分几乎全部来自于植物体死亡分解以及很少量的大气输入和土壤矿物质风化(Whitehead, 2001)。植被恢复过程中的土壤养分变化与恢复时间密切相关。温仲明等(2005)研究表明,除P外,各养分都随植被恢复而呈增加趋势;植被恢复也影响到土壤养分状况,不同植被恢复类型对土壤有机质、全氮、有效氮、速效磷的影响存在明显差异。而植被类型的演替变化,既可能与土壤养分含量变化导致的植物对养分的不同选择性利用有关(Baer *et al.*, 2004),也与放牧家畜的选择性采食及环境的扰动有关。

3.4 不同植被被覆生长对植被恢复的启示

青海湖流域是维系青藏高原东北部生态安全的重要屏障(李小雁等, 2008),但脆弱的草原生态系统和不断加剧的外部扰动,使系统处于不断退化状态。对于温性草原退化草地,土壤养分的恢复时间大约在6 a左右,而植被的恢复演替时间要更长一些,土壤的恢复状况也影响到植被的恢复。草地土壤恢复呈现随着时间延长从表层恢复向深层恢复的特点,并且多数养分含量与有机质含量显著相关,所以对草地的利用要适度,而对退化草地的恢复也要给以足够的时间才能得到较好的恢复效果,否则可能半途而废。自然扰动下的草地土壤研究表明,青海湖区草原受自然扰动影响较大,青海湖区生态系统脆弱加强对自然扰动的研究很有必要。

致谢 感谢青海省作物分子育种重点实验室给予的经费和实验条件支持。

参考文献

- 曹广民, 杜岩功, 梁东营, 等. 2007. 高寒高草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理. 山地学报, 25(6): 641-648.
- 陈涛, 杨武年, 徐瑶. 2011. 那曲地区不同退化程度的草地土壤养分特征分析. 中国农学通报, 27(9): 227-230.
- 杜锋, 梁宗锁, 徐学选, 等. 2007. 陕北黄土丘陵区撂荒草地群落生物量及植被土壤养分效应. 生态学报, 27(5): 1673-1683.
- 伏洋, 张国胜, 李凤霞, 等. 2008. 环青海湖地区生态与环境恢复治理途径. 草业科学, 25(7): 4-10.
- 李昌龙, 肖斌, 王多泽, 等. 2011. 石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替与土壤养分相关性分析. 生态学杂志, 30(2): 241-247.
- 李小雁, 许何也, 马育军, 等. 2008. 青海湖流域土地利用/覆被变化研究. 自然资源学报, 23(2): 285-296.
- 李以康, 林丽, 张法伟, 等. 2010. 小嵩草群落—高寒草甸地带性植被放牧压力下的偏途顶极群落. 山地学报, 28(3): 257-265.
- 李志丹, 干友民, 泽柏, 等. 2004. 退化草地群落演替趋向研究进展. 四川草原, (5): 5-7.
- 刘兵, 吴宁, 罗鹏, 等. 2007. 草场管理措施及退化程度对土壤养分含量变化的影响. 中国生态农业学报, 15(4): 45-48.
- 刘忠宽, 汪诗平, 陈佐忠, 等. 2006. 不同放牧强度草原休牧后土壤养分和植物群落变化特征. 生态学报, 26(6): 2048-2056.
- 罗天祥, 石培礼, 罗辑, 等. 2002. 青藏高原植被样带地上部分生物量的分布格局. 植物生态学报, 26(6): 668-676.
- 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 2012. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征. 生态学杂志, 31(2): 254-260.
- 马祥华, 焦菊英. 2005. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系. 中国水土保持科学, 3(2): 15-22.
- 孙波, 施建平, 杨林章. 2007. 陆地生态系统土壤观测规范. 北京: 中国环境科学出版社.
- 陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 2006. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. 地理学报, 61(7): 720-728.
- 王根绪, 程国栋, 沈永平. 2002. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. 冰川冻土, 24(6): 693-700.
- 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 等. 2005. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化. 应用生态学报, 16(11): 2025-2029.
- 杨元合, 朴世龙. 2006. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 30(1): 1-8.
- 姚檀栋, 朱立平. 2006. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. 地球科学进展, 21(5): 459-464.
- 张静妮, 赖欣, 李刚, 等. 2010. 贝加尔针茅草原植物多样性及土壤养分对放牧干扰的响应. 草地学报, 18(2): 177-182.

- 周国英, 陈桂琛, 赵以莲, 等. 2004. 施肥和围栏封育对青海湖地区高寒草原影响的比较研究. I. 群落结构及其物种多样性. *草业学报*, **13**(1): 26-31.
- 周兴民, 赵新全, 曹广民, 等. 2001. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社.
- 邹丽娜, 周志宇, 颜淑云, 等. 2009. 玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应. *中国草地学报*, **31**(6): 80-87.
- Akiyama T, Kawamura K. 2007. Grassland degradation in China: Method of monitoring, management and restoration. *Grassland Science*, **53**: 1-17.
- Baer SG, Blair JM, Collins SL, et al. 2004. Plant community responses to resource availability and heterogeneity during restoration. *Oecologia*, **139**: 617-629.
- Devoto M, Medan D. 2004. Effects of grazing disturbance on the reproduction of a perennial herb, *Cypella herbertii* (Lindl.) Herb. (Iridaceae). *Plant Systematics and Evolution*, **243**: 165-173.
- Fraser SW, Rooyen TH, Verster E. 1987. Soil-plant relationships in the central Kruger National Park. *Koedoe-African Protected Area Conservation and Science*, **30**: 19-34.
- Hooper DU, Vitousek PM. 1998. Effects of plant composition and diversity on nutrient cycling. *Ecological Monographs*, **68**: 121-149.
- Whitehead DC. 2001. Nutrient Elements in Grassland: Soil-Plant-Animal Relationships. New York: CABI Publishing.
-
- 作者简介** 李以康,男,1973年生,副研究员,在读博士,主要从事草地生态学研究。E-mail: liyikang501@163.com
责任编辑 王伟
-