

DOI:10.16742/j.zgdx.20200129

## 高寒草甸冬季牧场土壤持水能力对草地封育的响应

李红琴<sup>1</sup>, 吴夏璐<sup>1</sup>, 张法伟<sup>2, 3, \*</sup>, 贺慧丹<sup>4</sup>, 祝景彬<sup>4</sup>, 李英年<sup>2</sup>, 曹广民<sup>2</sup>, 周华坤<sup>2, 3</sup>

(1. 洛阳师范学院生命科学学院, 河南 洛阳 471934; 2. 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, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 枣庄学院旅游与资源环境学院, 山东 枣庄 277160)

**摘要:**以祁连山东段冷龙岭南麓的高寒草甸冬季牧场为研究对象, 采用“空间序列代替时间序列”的方法探讨不同草地封育年限(0 年: 自由放牧, 7、10、11、13、16、18、21 和 23 年)对土壤理化性状及持水能力的影响。结果表明, 土壤容重、有机碳和全氮等理化性状对草地封育无显著响应, 其变化幅度小于 5%, 土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量的相对变幅小于 0.5%, 表现出较大稳定性。而土壤理化性状及持水能力随封育年限亦无显著变化趋势, 主要受土壤深度影响( $P < 0.001$ )。另外, 土壤持水能力主要来源于毛管持水量(90.6%), 集中在 0~20cm 的浅层土壤, 受控于土壤容重( $R^2 = 0.87, P < 0.001$ )。综上所述, 该地区高寒草甸的土壤固碳持水功能可能已达到自然饱和稳态, 对草地封育表现出较高的保守性。研究结果可为祁连山区高寒草甸的适应性分区管理提供参考。

**关键词:**高寒草甸; 土壤持水量; 土壤固碳; 封育年限; 适应性管理

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-5021(2021)08-0001-08

祁连山地区是“青藏高原生态屏障”和“北方防沙带”的重要组成部分, 其生态安全战略地位十分显著, 是中国重要的生态功能区和水源涵养地, 因此祁连山国家公园成为首批国家公园体制试点之一<sup>[1]</sup>。高寒草甸是祁连山重要植被类型之一, 是区域生态功能发挥的重要物质基础<sup>[2]</sup>, 但生态系统处于轻度和中度脆弱的过渡区及气候变化的过渡模态<sup>[3]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 由于气候快速变化和超载放牧, 祁连山东部高寒草甸退化态势十分严峻, 退化草地占可利用草地总面积的 90% 左右, 其中 1/3 以上退化严重<sup>[4~5]</sup>。围栏封育做为退化草地恢复治理的一种有效模式<sup>[6~7]</sup>, 因简单易行而在全球大范围推广<sup>[8~10]</sup>。有关草地封育对植被群落特征<sup>[11]</sup>、系统生产力<sup>[12]</sup>、土壤营养<sup>[13]</sup>和系统稳定性<sup>[14]</sup>及生态功能<sup>[15]</sup>等方面多有研究且取得丰硕成果, 但有关长期封育对土壤水源涵养影响的研究则相对较少<sup>[16~18]</sup>, 限制了高寒草甸水源涵养功能的准确评估及封育管理的制定和推广<sup>[19]</sup>。

在高寒草甸的退化演替中, 土壤孔隙度降低<sup>[20]</sup>和(或)植被活根比例下降<sup>[21]</sup>, 削弱了系统饱和和导水率和持水能力, 导致物质循环和能量交换的失衡和紊乱及生态功能减退<sup>[17, 22]</sup>。草地封育可有效降低放牧家畜的选择性采食和践踏作用, 借助生态系统的自然恢复力<sup>[1]</sup>, 从而改变地上植被种类组成和地下根系特征<sup>[6]</sup>及群落演替方向, 促使土壤表层有机质和水稳性团聚体的积累, 改善土壤的水热环

境<sup>[23]</sup>, 提高土壤固碳持水能力<sup>[16]</sup>, 但其恢复效应与封育年限及草地退化状态密切相关<sup>[15]</sup>。高寒草甸植被类型多样, 空间异质性强, 加之祁连山地区的气候变化又处于印度季风模态和西风模态的过渡模态, 生态水文过程及土壤水源涵养功能对草地封育的响应可能更加复杂且不同于其他高寒区域<sup>[3]</sup>。因此有必要深入研究其土壤持水能力对草地封育的响应特征, 为退化高寒草甸的“分区-分级-分段”恢复体系提供技术支撑<sup>[19]</sup>。

本研究以祁连山东段不同封育年限(0 年: 自由放牧; 7~23 年)的高寒草甸冬季牧场为对象, 在 2017 年 7~8 月植被旺盛生长期, 采集不同层次的土壤样品分析土壤理化性状和持水能力, 探讨土壤水源涵养功能对草地封育的响应特征及潜在生态过程, 为科学评估祁连山高寒草甸水源涵养功能提供理论依据, 也可为高寒草甸的适应性管理提供基础数据<sup>[19]</sup>。由于区域的高寒草甸冬季牧场系统稳定性较高<sup>[24~25]</sup>, 且近 30 年气候的暖湿变化及植被生产力增加的正反馈<sup>[1, 25]</sup>, 本研究假设长期封育对土

\* 通信作者, E-mail: fwzhang@nwipb.cas.cn

收稿日期: 2020-04-18; 修回日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501802); 国家自然科学基金(41730752, 41877547); 青海省科技基础条件平台建设专项项目(2018-ZJ-T09); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)

作者简介: 李红琴(1981-), 女, 河南义马人, 博士, 副教授, 主要从事高寒草地碳水过程的研究, E-mail: lihongqin\_00@126.com

壤理化性状和持水能力的影响有限。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究点概况

为了降低空间异质性导致的气候、土壤质地、植被群落等影响,采样范围集中在青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站(简称海北站)周边5km的高寒草甸冬季牧场。海北站(37°37'N、101°19'E,海拔3200m)地处青藏高原东北隅,位于祁连山东段冷龙岭南麓的大通河谷,具有典型的高原大陆性气候特征,仅有冷季、暖季之分,且雨热同季。该站多年平均气温和降水分别为-1.7℃和580.0mm。植被类型为典型高寒禾草-嵩草草甸,以矮嵩草(*Kobresia humilis*)为建群种,主要优势种有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、麻花苣(*Gentiana straminea*)和甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)等,近10年的地上净初级生产力为430g/m<sup>2</sup>[25]。土壤类型为高寒草甸土,发育相对年轻,粗骨性强,表层有机质含量高,但速效养分低。

### 1.2 样品采集与指标测定

在2017年7~8月期间,采集封育年限梯度样地土壤样品。其中对照样地为未封育样地,为海北站综合观测场毗邻的冬季牧场,放牧时间为每年10月至翌年5月,放牧强度中等(3.75羊单位/hm<sup>2</sup>)。封育7、10、11年的样地为海北站东南2km的放牧梯度试验样地禁牧处理小区。封育13、16、18年的样地,分别为综合观测场内的早期施肥、降水、增温等控制试验的围封样地的对照小区。封育21年和23年的样地分别为综合观测场内的水分观测场(2个)和气象观测场,该场地每3~5年在生长季结束的10月上旬进行人工刈割以清除过度发育的凋落物层。封育年限梯度样地的植被盖度在植被旺盛生长期约为90%~98%,随着封育时间的延长,植被上层优势种多为禾草类植物,耐牧性的莎草类植物逐渐减少[11]。在每个封育年限的样地内,按照“S”形取样的方法,设置3个土壤剖面,采用容积为100cm<sup>3</sup>的环刀采集0~10cm、10~20cm、20~40cm的原状土样,密封之后带回室内测定土壤持水能力。同时,用内径3cm的土钻,采集相同层次的土壤样品装入自封袋,在实验室内阴干、粉碎、过筛后,测定土壤理化性状。所有土壤样品的采集均为3次重复,共计90个样品。

参照《中华人民共和国林业行业标准——森林土壤分析方法》,土壤容重、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量采用环刀法一次性连续测定。土壤有机碳含量和全氮含量分别采用重铬酸钾法和重铬酸钾-硫酸消化法测定[5]。

### 1.3 数据分析

以封育年限为单因素,利用方差分析(One-way analysis of variance)探讨土壤理化性状及持水能力对草地封育的响应特征,并利用LSD(Least significant difference)法进行不同封育年限的多重差异比较。相关分析、逐步回归和一般线性模型则用于检验土壤持水能力与土壤理化性状的关系。统计分析和绘图在OriginPro 2016(OriginLab, USA)软件中完成。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤理化性状对草地封育的响应特征

封育年限对不同层次的土壤容重、全氮含量和有机碳含量等理化性状均未有显著影响(图1)。对对照样地的0~10cm土壤容重、全氮含量和有机碳含量分别为0.78±0.11g/cm<sup>3</sup>、6.57±2.02g/kg和

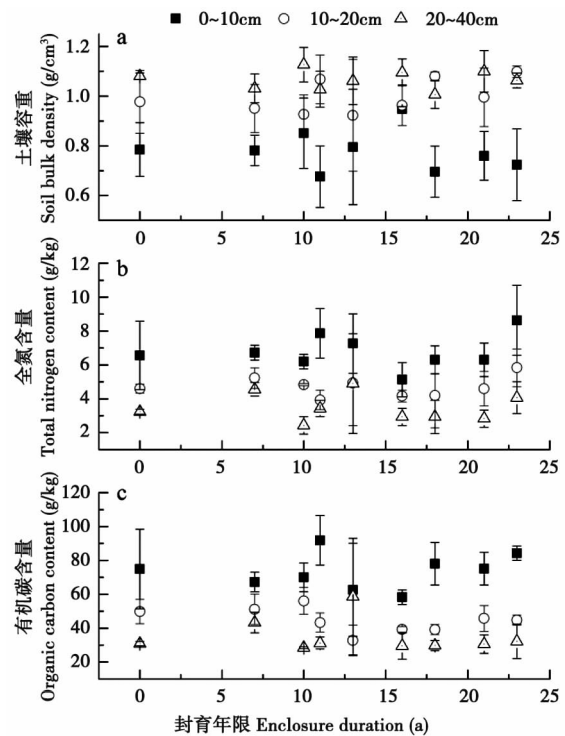


图1 草地封育对不同土层的土壤容重、全氮含量和有机碳含量的影响

Fig. 1 The influence of grassland enclosure on soil bulk density, total nitrogen content and organic carbon content

74.93±23.46g/kg,封育处理导致的土壤理化性状的变化幅度小于5%,差异均不显著,且随封育年限的增加无明显变化趋势(图1)。草地封育对10~20cm和20~40cm的土壤理化性状也没有显著影响。不同封育年限的土壤有机碳/全氮(C/N)之间也没有显著差异。土壤理化性状与土壤层次(哑变量)及封育年限的一般线性模型的模拟结果表明土壤层次是土壤理化性状变异的主要控制因子( $P < 0.001$ ,表1),而封育年限的主效应及其与土壤层次的交互效应均不显著。因此,草地封育没有显著改变研究区的土壤理化性状,即祁连山东段高寒草甸冬季牧场的土壤理化性状对草地封育表现出较高的稳定型。

## 2.2 土壤持水能力对草地封育的响应特征

不同封育年限下的高寒草甸土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均无显著变化(图2)。对对照样地0~40cm的土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别为186.4±6.7mm、168.8±3.2mm和160.9±2.6mm,封育处理导致的相对变幅均小于0.5%,差异均不显著。持水能力与封育年限无显著相关关系。土壤0~10cm、10~20cm和20~40cm的饱和持水量约占0~40cm饱和持水量的36.5%、32.9%和30.1%,随封育年限增加无显著变化趋势。土壤持水能力与土壤层次及封育年限的一般线性模型模拟结果也表明土壤层次的主效应( $P < 0.001$ ,表1),而非封育年限及其二者的交互效

表1 土壤容重、全氮含量、有机碳含量、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量与封育年限和土壤层次及饱和持水量与土壤容重和有机碳含量的一般线性模型模拟结果

Table 1 The result of general linear models of soil bulk density, total nitrogen content, soil organic carbon, saturated water content, capillary water content and field water content with enclosure durations and soil depths, and saturated water content with soil bulk density and soil organic carbon

因变量 Dependent	因素 Factor	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean square	P P value
土壤容重	土壤层次	2	1.39	0.69	< 0.001
	封育年限	1	0.00	0.00	0.60
	封育年限×土壤层次	2	0.02	0.01	0.35
	残差	84	0.97	0.01	
土壤全氮	土壤层次	2	168.66	84.33	< 0.001
	封育年限	1	0.00	0.00	0.97
	封育年限×土壤层次	2	0.72	0.36	0.82
	残差	84	149.98	1.79	
土壤有机碳	土壤层次	2	24814.50	12407.30	< 0.001
	封育年限	1	61.80	61.80	0.54
	封育年限×土壤层次	2	246.90	123.50	0.48
	残差	84	13952.70	166.10	
饱和持水量	土壤层次	2	1855.81	927.90	< 0.001
	封育年限	1	0.01	0.01	0.98
	封育年限×土壤层次	2	19.75	9.88	0.51
	残差	84	1226.92	14.61	
饱和持水量	土壤容重	1	1732.78	1732.78	< 0.001
	有机碳	1	979.61	979.61	< 0.001
	土壤容重×有机碳	1	8.20	8.20	0.18
	残差	86	381.91	4.44	
毛管持水量	土壤层次	2	1710.55	855.27	< 0.001
	封育年限	1	3.31	3.31	0.65
	封育年限×土壤层次	2	4.29	2.15	0.87
	残差	84	1328.68	15.82	
田间持水量	土壤层次	2	1880.31	940.15	< 0.001
	封育年限	1	0.28	0.28	0.89
	封育年限×土壤层次	2	3.72	1.86	0.89

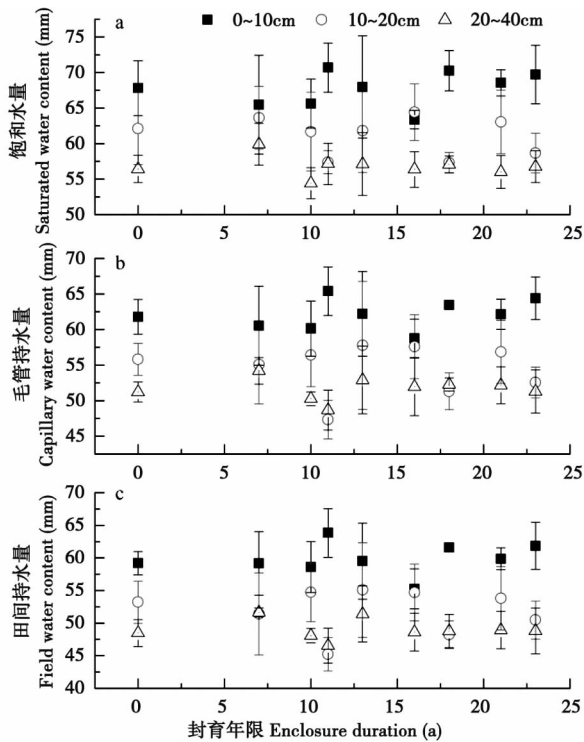


图2 草地封育对不同土层的饱和持水量、毛管持水量和田间持水量的影响

Fig. 2 The influence of grassland enclosure on saturated water content, capillary water content, and field water content

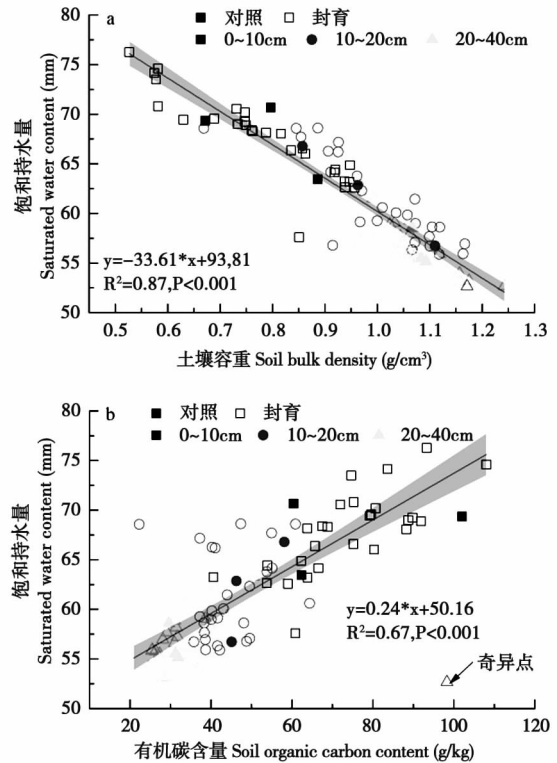
应是土壤持水能力变化的主要影响因素。因此,高寒草甸冬季牧场的土壤持水能力对草地封育表现出显著的保守性。

### 2.3 土壤持水能力和土壤理化性状的关系

相关分析表明高寒草甸土壤饱和持水量与土壤容重、有机碳含量、全氮含量、毛管持水量和田间持水量均具显著相关性( $P < 0.05$ )。相关系数( $r$ )的绝对值表明土壤容重和有机碳含量是土壤饱和持水量的重要调控因素(图3)。土壤饱和持水量与土壤容重和有机碳含量的一般线性模型的模拟结果进一步表明二者主效应均显著( $P < 0.001$ ,表1),但土壤容重的标准系数为 $-0.99$ ,其绝对值远大于有机碳的 $-0.16$ ,暗示土壤容重( $R^2 = 0.87, P < 0.001$ ,图3)是高寒草甸土壤持水能力的主要调控因子。

土壤饱和持水量与毛管持水量和田间持水量的偏相关分析表明,毛管持水量( $r = 0.26, P = 0.013$ ),而非田间持水量是土壤饱和持水量的显著影响因素,其占饱和持水量的90.6%。0~40cm的土壤饱和持水量和0~10cm、10~20cm和20~40cm的土壤饱和含水量的逐步回归分析表明三者的作用均显著( $P < 0.001$ ),而0~10cm和10~20cm的标准回

归系数(0.84和0.90)略大于20~40cm的(0.53),表明土壤持水能力变化主要受浅层(0~20cm)土壤持水能力的影响。



阴影区为拟合直线95%的置信区间,奇异点没有纳入回归分析  
The shadow area means fitted line at 95% confidence, and the spike was excluded in linear regression

图3 土壤饱和持水量与土壤容重和有机碳含量的相关关系  
Fig. 3 The relationship between saturated water content with soil bulk density and soil organic carbon content

## 3 讨论

### 3.1 草地封育与土壤理化性状

祁连山东段南麓高寒草甸冬季牧场的土壤理化性状对草地封育没有表现出显著响应(图1),这与青海泽库县高寒草甸<sup>[9]</sup>和黄河源玛多县高寒草甸<sup>[11]</sup>及高寒草原<sup>[16]</sup>的正响应研究结果不一致。这与本研究选取的对照样地草毡表层及其放牧管理方式有关。(1)高寒草甸致密而厚实的草毡表层可缓解家畜的践踏作用,同时限制植物的生长,削弱植物根系对土体的外应力崩解作用,降低草地封育通过植物群落组成和根系生长策略的影响程度<sup>[13,21]</sup>;(2)研究对象冬季牧场的放牧时间集中在土壤冻结期,家畜的选择性采食和践踏作用对植物生长和土壤结构的直接影响较为有限,从而导致土壤容重对长期封育无显著响应<sup>[16]</sup>。至于土壤碳、氮等营养元

素的无显著响应,可归因于微生物活动强度和底物的化学性质。一方面,研究区土壤水分适宜,微生物活动主要受土壤温度的调节<sup>[11]</sup>,封育虽然显著降低土壤瞬时速度的变化幅度,但对土壤温度的均值没有显著影响<sup>[23, 27]</sup>,导致草地封育对微生物活动强度的影响有限。另一方面,虽然长期封育会导致植被群落由莎草类植物向禾草类植物转变<sup>[25]</sup>,但二者的碳氮比较接近,对微生物分解底物化学性质的作用较弱<sup>[28]</sup>。因此,综合区域草地的可持续发展和放牧文化的传承,且中度干扰理论<sup>[11]</sup>和增温试验<sup>[29]</sup>均发现长期封育会降低高寒草甸植物多样性和草场质量,本研究认为适度放牧而并非长期封育是祁连山东段高寒草甸冬季牧场土壤理化性状维持的适应性管理措施。

### 3.2 草地封育与土壤水源涵养功能

高寒草甸的水源涵养功能主要来源于土壤持水能力,而土壤饱和持水量是土壤储存和调节水分能力的反映,受控于土壤毛管孔隙度<sup>[20]</sup>或者植物活根吸附<sup>[21]</sup>。祁连山高寒草甸冬季牧场的土壤饱和持水量和封育年限无显著关系,这与封育可提升退化草地土壤水源涵养功能的结论<sup>[16, 26]</sup>不一致。由于对照样地牧压较低且集中在冬季,其植被生长较好且多被做为原生植被或者退化梯度的参照<sup>[21]</sup>,对照样地土壤有机碳含量较高而容重较低,封育对改善土壤有机质和孔隙度及其静电吸附的作用有限<sup>[26]</sup>,导致封育处理下土壤孔隙度<sup>[20]</sup>和牧草活根比例<sup>[21]</sup>及持水能力无显著响应(图2)。这与该区域禁牧可降低土壤水源涵养功能的结论相似<sup>[18]</sup>。0~40cm土壤毛管孔隙度和毛管持水量分别为 $56.3 \pm 1.1\%$ 和 $168.8 \pm 3.2\text{mm}$ ,约占土壤总孔隙度和饱和持水量的87.7%和90.6%,表明毛管孔隙度是高寒草甸土壤水源涵养功能的主体<sup>[20]</sup>。因此长期封育无法显著提升祁连山东段高寒草甸冬季牧场的土壤水源涵养功能。但需要说明的是,该结果仅适用于轻度放牧或中度放牧,且尚未显著退化的高寒草甸冬季牧场,针对重度退化或极度退化的高寒草甸仍需要草地封育甚至人工重建等措施进行功能恢复和提升<sup>[19]</sup>。

### 3.3 土壤碳、氮、水的饱和稳定性

对照样地的0~40cm土壤容重为 $0.98 \pm 0.05\text{g}/\text{cm}^3$ ,接近于高寒草甸未退化的判别标准<sup>[20~21]</sup>,而土壤全氮、有机碳密度分别为 $1.6 \pm 0.05\text{kg}/\text{m}^2$ 和 $17.2 \pm 1.4\text{kg}/\text{m}^2$ ,也接近于青藏高原高寒草甸范围的上限<sup>[30]</sup>,表明研

究区土壤有机碳和全氮可能接近于自然饱和稳态。研究区土壤饱和持水量与三江源区<sup>[20, 26]</sup>及祁连山区未退化高寒草甸<sup>[21]</sup>的结果接近,却显著高于青海玛多县的高寒草原<sup>[16]</sup>,表明该区域土壤持水能力良好,同时也暗示评估高寒草地水源涵养功能时需充分考虑植被类型的差异。因此,祁连山东段高寒草甸冬季牧场土壤碳、氮、水等生态功能接近或处于自然饱和和稳态,具有较强的时间稳定性<sup>[24~25]</sup>,这可能是长期封育对土壤碳水功能无显著影响的内在机制。

研究区气候的暖湿化对植被群落的影响表现为群落中高产型的禾草增多<sup>[25]</sup>,且禾草类植物的根冠比(5.8)显著大于莎草类植物(2.4),可导致地下根系生物量增多和土壤容重降低及饱和含水量升高<sup>[20]</sup>。而草地封育无显著影响的结果暗示长期封育削弱甚至逆转了气候暖湿变化对区域土壤持水能力提升的正效应。由于本研究仅从土壤碳水功能评估草地封育的作用,后续的研究应该包含牧民生产生活和野生动物保护等关键参数,以便全面评估草地封育的经济效益和生态效益,构建高寒草地恢复适应性管理模式<sup>[1, 15]</sup>。

## 4 结论

草地封育对祁连山东段南麓的高寒草甸冬季牧场的土壤容重、有机碳含量和全氮含量的影响幅度小于5%,土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量的相对变幅小于0.5%,说明草地封育对区域土壤理化性状和土壤持水能力无显著影响。毛管持水量约占土壤持水能力的90.6%,主要受土壤容重影响。本研究区域冬季牧场的固碳持水等生态功能已接近高寒草甸自然饱和状态,且对草地封育表现出具有较强的稳定性。

### 参考文献 (References):

- [1] 贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 66-80.  
He Jinsheng, Liu Zhipeng, Yao Tuo, et al. Analysis of the main constraints and restoration techniques of degraded grassland on the Tibetan Plateau[J]. *Science and Technology Review*, 2020, 38(17): 66-80.
- [2] Li X L, Gao J, Brierley G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24: 72-80.
- [3] 姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院刊, 2017,

32(9): 976-984.

Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaogen, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and Indian monsoon on Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 976-984.

- [4] 赵军, 党国锋. 祁连山草地资源利用面临的问题及治理对策[J]. *草业科学*, 2003, 20(7): 1-4.
- Zhao Jun, Dang Guofeng. The problems in grassland resource utilization and management strategy in Qilian Mountain[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(7): 1-4.
- [5] 张光茹, 李红琴, 杨永胜, 等. 基于主成分分析对退化高寒草甸不同恢复方式下草地质量的综合评价[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 76-83.
- Zhang Guangru, Li Hongqin, Yang Yongsheng, et al. Comprehensive evaluation of grassland quality under different restoration methods in degraded alpine meadow based on principal component analysis[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(2): 76-83.
- [6] Deng L, Zhang Z, Shanguan Z. Long-term fencing effects on plant diversity and soil properties in China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 137(1): 7-15.
- [7] 王玉琴, 王宏生, 宋梅玲, 等. 秋季刈割对高寒退化草地植被和土壤生态属性的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(3): 61-69.
- Wang Yuqin, Wang Hongsheng, Song Meiling, et al. Effects of autumn clipping on vegetation and soil ecological properties of degraded alpine grassland[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 61-69.
- [8] Kang L, Han X, Zhang Z, et al. Grassland ecosystems in China: Review of current knowledge and research advancement [J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 2007, 362: 997-1008.
- [9] 杨永胜, 张莉, 未亚西, 等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 56-63.
- Yang Yongsheng, Zhang Li, Wei Yaxi, et al. Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water-holding capacity in Zeku alpine meadow in the headwater region of three rivers in China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 56-63.
- [10] 范燕敏, 武红旗, 靳瑰丽, 等. 封育对荒漠草地生态系统 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2018, 40(3): 78-83.
- Fan Yanmin, Wu Hongqi, Jin Guili, et al. Effects of enclosure on stoichiometric characteristics of C, N, P in desert grassland ecosystem [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(3): 78-83.
- [11] Wu G, Du G, Liu Z, et al. Effect of fencing and grazing on a *Kobresia*-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2009, 319(1): 115-126.
- [12] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳储量及其固持速率的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4270-4276.
- He Nianpeng, Han Xingguo, Yu Guirui. Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4270-4276.
- [13] Shang Z, Deng B, Ding L, et al. The effects of three years of fencing enclosure on soil seed banks and the relationship with above-ground vegetation of degraded alpine grasslands of the Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2013, 364(1-2): 229-244.
- [14] 李媛媛, 董世魁, 李小艳, 等. 围栏封育对三江源区退化高寒草地植物光合作用及生物量的影响[J]. *草地学报*, 2012, 20(4): 621-625.
- Li Yuanyuan, Dong Shikui, Li Xiaoyan, et al. Effect of enclosure on vegetation photosynthesis and biomass of degraded grasslands in headwater area of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(4): 621-625.
- [15] Sun J, Liu M, Fu B, et al. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1405-1414.
- [16] 李红琴, 乔小龙, 张德铨, 等. 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 195-200.
- Li Hongqin, Qiao Xiaolong, Zhang Yili, et al. Effects of fencing on the soil water conversation in Maduo alpine grassland-source of Yellow River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 195-200.
- [17] 贺慧丹, 李红琴, 祝景彬, 等. 黄河源高寒草甸封育条件下的土壤持水能力[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 62-67.
- He Huidan, Li Hongqin, Zhu Jingbin, et al. Soil water-holding capacity under the condition of fencing in alpine meadow of the source region of Yellow River[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 62-67.
- [18] 祝景彬, 贺慧丹, 李红琴, 等. 高寒草甸草地土壤贮水量对牧压梯度的响应[J]. *中国草地学报*, 2018, 40(4): 88-94.
- Zhu Jingbin, He Huidan, Li Hongqin, et al. The response of soil water storage to different grazing gradients in an alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(4): 88-94.
- [19] 尚占环, 董全民, 施建军, 等. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展——兼论三江源生态恢复问题[J]. *草地学报*, 2018, 26(1): 1-21.
- Shang Zhanhuan, Dong Quanmin, Shi Jianjun, et al. Research progress in recent ten years of ecological restoration for ‘black soil land’ degraded grassland on Tibetan Plateau—Concurrently discuss of ecological restoration in Sangjiangyuan Region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 1-21.
- [20] 徐翠, 张林波, 杜加强, 等. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2388-2399.
- Xu Cui, Zhang Linbo, Du Jiaqiang, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33

- (8): 2388-2399.
- [21] Li J, Zhang F, Lin L, et al. Response of the plant community and soil water status to alpine *Kobresia* meadow degradation gradients on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Ecological Research*, 2015, 30(4): 589-596.
- [22] Zeng C, Zhang F, Wang Q, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 478: 148-156.
- [23] Cheng H, Wang G, Hu H, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River, China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54: 1755-1762.
- [24] 周华坤,周立,赵新全,等.青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究[J].科学通报,2006,51(1):63-69.  
Zhou Huakun, Zhou Li, Zhao Xinquan, et al. Stability of alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1):63-69.
- [25] Li H, Zhang F, Li Y, et al. Thirty-year variations of above-ground net primary production and precipitation-use efficiency of an alpine meadow in the north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Grass and Forage Science*, 2015, 71(2): 208-218.
- [26] 杨永胜,李红琴,张莉,等.封育措施对巴塘高寒草甸植被群落结构及土壤持水能力的影响[J].山地学报,2016,34(5): 606-614.
- Yang Yongsheng, Li Hongqin, Zhang Li, et al. Effects of fencing measurement on vegetation community structure and soil water-holding capacity in Batang alpine meadow[J]. *Mountain Research*, 2016, 34(5): 606-614.
- [27] 张法伟,郭竹筠,李以康,等.青海湖发茆草干草原植被退化对土壤温湿特征的影响[J].干旱区研究,2013,30(2): 219-225.  
Zhang Fawei, Guo Zhuyun, Li Yikang, et al. Effect of soil temperature and volumetric moisture content on vegetation degeneration over the *Achnatherum splendens* steppe around the Qinghai Lake, China[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(2): 219-225.
- [28] 王文颖,王启基,王刚,等.高寒草甸土地退化及其恢复重建对植被碳、氮含量的影响[J].植物生态学报,2007,31(6): 1073-1078.  
Wang Wenying, Wang Qiji, Wang Gang, et al. Effects of land degradation and rehabilitation on vegetation carbon and nitrogen content of alpine meadow in China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1073-1078.
- [29] Klein J, Harte J, Zhao X. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Applications*, 2007, 17(2): 541-557.
- [30] Yang Y, Fang J, Tang Y, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 1592-1599.

## The Response of Soil Water Holding Capacity of Alpine Meadow in Winter Pasture to Enclosure

LI Hong-qin<sup>1</sup>, WU Xia-lu<sup>1</sup>, ZHANG Fa-wei<sup>2,3</sup>, HE Hui-dan<sup>4</sup>,  
ZHU Jing-bin<sup>4</sup>, LI Ying-nian<sup>2</sup>, CAO Guang-min<sup>2</sup>, ZHOU Hua-kun<sup>2,3</sup>

(1. College of Life Science, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, China;

2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Region, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 4. College of Tourism, Resources and Environment, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

**Abstract:** The alpine meadow in winter pasture in the eastern Qilian Mountains was selected as the research subject to explore the effect of different enclosure durations (0: natural grazing, 7, 10, 11, 13, 16, 18, 21, and 23 years) on soil physicochemical characteristics and water holding capacity by using the substitution method of space for time. The results showed that soil physicochemical characteristics such as soil bulk density, organic carbon content, and total nitrogen content had no significant response to enclosure, in which the variation was less than 5%. And the relative variation of soil saturated water content, capillary water content, and field water content was less than 0.5%. Furthermore, there were no significant changes in soil physicochemical characteristics and soil water holding capacity with the increase of enclosure duration, which was significantly affected by soil depth ( $P < 0.001$ ). Moreover, the soil water holding capacity was mainly from capillary water holding capacity (90.6%), which was concentrated in 0~20 cm shallow soil layer, and was mainly controlled by soil bulk density ( $R^2 = 0.87, P < 0.001$ ). In summary, the soil carbon fixation and water holding capacity of alpine meadow in this area might have reached the saturation state, showing a high conservation to enclosure. These findings of the study can provide references for the adaptive regional management of alpine meadow in Qilian Mountains.

**Key words:** Alpine meadow; Soil water holding capacity; Soil carbon fixation; Enclosure durations; Adaptive management

【责任编辑 吴尧】