

DOI: 10.16742/j.zgxcdxb.2017-05-09

黄河源高寒草甸封育条件下的土壤持水能力

贺慧丹^{1,2}, 李红琴^{1,3}, 祝景彬^{1,2}, 杨永胜^{1,3}, 未亚西^{1,2}, 李英年^{1,3*}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001)

摘要:以青海省玛沁县不同封育年限与自然放牧的高寒草甸为研究对象,通过对土壤容重、土壤饱和持水量、田间持水量及毛管持水量等指标监测,分析不同封育年限下高寒草甸的土壤持水能力及与环境因素的关系。结果表明:随着封育年限延长,封育样地 0~40cm 土层土壤持水量增加,其中 0~10cm 土层的土壤持水量高于 10~20cm 和 20~40cm;封育 12a 后土壤饱和持水量、田间持水量、毛管持水量分别增加 11.34mm、15.14mm、15.05mm,分别按 0.95mm/a、1.26mm/a、1.25mm/a 的速率增加;土壤饱和持水量、田间持水量和毛管持水量与容重呈极显著负相关($P < 0.01$),与有机质及地下生物量呈极显著或显著性正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);土壤持水能力在垂直方向表现为表层高于深层,在封育禁牧梯度上表现为封育高于未封育。研究表明,封育能提高土壤持水能力。

关键词:黄河源;封育;高寒草甸;土壤持水能力

中图分类号:S812 文献标识码:A 文章编号:1673-5021(2017)05-0062-06

高寒草地是青藏高原的重要草地资源,是水源涵养的主要基质^[1]。近年来,区域生态环境恶化造成大面积的草场退化^[2],水土流失加剧,草地生产能力严重降低^[3],持水能力衰减等,直接威胁到青藏高原乃至我国东部地区的生态安全^[4]。草地退化使高寒草甸生态系统的功能不稳定性持续增加,将直接威胁着草地生态系统的健康发展以及下游水资源的分配与补给^[5]。

禁牧封育是三江源生态治理工程中有效恢复和重建植被的方法之一。随封育时间延长,植被固碳与持水能力、土壤水贮存量以及物种多样性均发生改变^[6~8]。前人的研究中多涉及土壤有机碳^[9]、生物量^[10]、多样性^[11]的研究,也有一些研究指出三江源区高寒草甸土壤水源涵养功能与毛管孔隙度密切相关,地上生物量与土壤水源涵养量之间存在显著的正相关关系^[12]。周印东等^[13]认为自然植被的正向演替对表层土壤有机质含量有明显的促进作用,表层土壤田间持水量、容重、总孔隙度等与土壤持水性能相关的指标都与有机质含量呈显著或极显著相关。但这些试验对封育禁牧梯度上土壤持水能力的研究较少。因此,本试验旨在研究不同封育年限土壤持水能力的变化及其影响因素,为探讨最适禁牧年限与持水能力的平衡关系及响应模式提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究位于青海省果洛州玛沁县,年平均气温

-0.5℃,气温低、温差大。年平均降水量 514mm,多集中在 6~9 月份,属高原大陆性半湿润气候,冬季干燥少雨,夏季凉爽湿润。植被为高寒草甸类型,优势种有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、青藏苔草(*Carex siderosticta* Hance.)、异针茅(*Stipa aliena* Keng)、高原早熟禾(*Poa alpigena* Lindm.)。伴生种有鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、异叶米口袋(*Gueldenstaedtia diversifolia* Maxim.)、麻花苳(*Gentiana straminea* Maxim.)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、高原毛茛(*Ranunculaceae*)等^[14]。植被群落结构简单、分异不明显。土壤为高山草甸土,土壤发育年轻,有机质含量高,质地粗、骨性强。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取、实验设计及取样方法

试验样地设在青海省果洛藏族自治州大武镇西 12km 的高寒草甸区,海拔约 3900m。样地共选取水平间距 2km 范围内的 4 块,分别为未封育的自然

* 通讯作者, E-mail: ynli@nwipb.cas.cn

收稿日期:2016-11-15;修回日期:2017-05-11

基金项目:国家重点研究计划(2016YFC0501802);青海省国际合作项目(2015-HZ-801)项目;青海省自然科学基金(2016-ZJ-943Q)

作者简介:贺慧丹(1991-),女,山东菏泽人,在读博士研究生,主要从事全球变化生态学研究, E-mail: hhdan712@foxmail.com.

放牧区和封育 1a、4a、12a 的放牧区。需要特别说明的是,青藏高原很难找到完全禁牧的草场,试验样地所选的封育区有短期放牧现象,但放牧的羊多为未成年羔羊,且放牧时间在 11 月到次年 5 月,此时土壤为冻结期,放牧对土壤结构和植被生长影响较小。未封育样地为当地牧民全年自然放牧区。

2013 年植物生长期末的 8 月底,在每个封育与未封育样地中部随机选取 60m 长度,在 0m、30m 和 60m 处,进行测定与取样,即每个区为 3 次重复。具体观测顺序为,首先在 0m、30m 和 60m 处为中心,置 50cm×50cm 样方框,直尺测量平均盖度和高度后,按植物个体测定分种盖度和高度,然后拣出枯落物;之后用剪刀按种分别收集绿体地上部分,并用手刮的方式收集地表由枯落物和牛羊粪组成的碎屑物,再用内径为 8cm 的根钻按 0~10cm、10~20cm 和 20~40cm(由于试验区地质浅薄,20~40cm 差别不大,故 20~30cm 和 30~40cm 层混合并取其平均值进行分析)土层分别采集土样以测定地下生物量(每个样方 3 次重复);最后在 50cm×50cm 样方内挖掘土壤剖面,按 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40cm 土层依次取土壤样品并用内径为 5cm、容积为 100cm³ 的环刀采集原状土壤样品,取样后环刀迅速封盖,用透明胶带密封后带回实验室。

1.2.2 测定指标与方法

1.2.2.1 地上、地下生物量

地上生物量包括上述收集的枯落物、绿体和碎屑物。地下生物量收集方法是取地下生物样品经分拣石粒、清洗后分层装袋。生物量测定采用烘干法,置于 85℃ 的烘箱内烘至恒重后称重。

1.2.2.2 土壤持水量(实际贮水量)、毛管持水量、容重、饱和持水量、田间持水量

取样后环刀迅速封盖并称量鲜重(m),用透明胶带密封后带回实验室,室内清除胶带及污垢,揭去上底盖,仅留带网眼的下底盖放入平底容器中,注入水直至高度恰好在环刀上沿,在水中充分浸透 12h 后,盖上底盖水平取出称重(m_1);之后,把仅带有网眼底盖的环刀放在铺有干沙的平底盘中 2h,盖上底盖称重(m_2);接着,把环刀放在平地盘上 2 昼夜,再称重(m_3)^[15]。

1.2.2.3 水分换算系数(K_2)

取 m_3 中的土壤约 20g(m_4),放在已知质量的铝盒中称量,并置于 105℃ 的烘箱中烘干至恒重称重(m_5),测出土壤水分换算系数,进而得到土壤容

重(g/cm^3)^[15]。

$$\text{饱和持水量(mm)} = \frac{0.01 \times D_i \times B_i \times SC}{\rho}$$

$$SC = \frac{(m_1 - m) - (m_2 - m) \times K_2}{(m_2 - m) \times K_2} \times 1000$$

$$\text{毛管持水量(mm)} = \frac{0.01 \times D_i \times B_i \times FC}{\rho}$$

$$FC = \frac{(m_2 - m) - (m_2 - m) \times K_2}{(m_2 - m) \times K_2} \times 1000$$

$$\text{田间持水量(mm)} = \frac{0.01 \times D_i \times B_i \times CC}{\rho}$$

$$CC = \frac{(m_3 - m) - (m_2 - m) \times K_2 - \frac{1 - K_2}{K_2}}{(m_2 - m) \times K_2} \times 100$$

$$\text{土壤容重}(g/cm^3) = \frac{(m_2 - m) \times K_2}{V}$$

$$K_2 = \frac{m_5}{m_4}$$

式中:SC、FC、CC 分别为土壤饱和持水量(g/kg)、毛管持水量(g/kg)、田间持水量(g/kg); ρ 、 V 、 D_i 、 B_i 分别为水的密度(cm^3)、环刀容积(cm^3)、土层厚度(cm)、土壤容重(g/cm^3); i 代表土壤的分层数($i = 1, 2, 3$)。

1.2.2.4 土壤有机碳

收集的土壤样品过筛后带回室内自然阴干,利用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质的含量。土壤有机碳(SOC, $Kg C/m^2$)采用以下公式^[6]:

$$SOC = \sum D_i \times B_i \times OM_i \times S / 1000$$

式中: D_i 、 B_i 、 i 意义同上; OM_i 和 S 分别为土壤有机碳含量(%)和对应面积(cm^2)。

1.2.3 实验数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤持水能力

2.1.1 土壤最大持水能力

由表 1 可见,不论是封育还是未封育试验区,饱和持水量均随土层的加深而降低,自然放牧的未封育区和封育 1a、4a、12a 试验区,自表层 0~10cm 到 20~40cm 层次分别降低了 5.41、2.55、5.21 和 4.67mm,降低幅度分别为 10.4%、4.8%、9.3% 和 8.7%。从 0~40cm 总体来看,封育措施提高了土壤的饱和持水量,与自然放牧的未封育(190.62mm)相比,封育 1a(199.27mm)、4a(210.90mm)、12a

(201.96mm)分别增加了 8.65、20.28、11.34mm,其中以 10~20cm 层次增加最为明显,且封育 4a 后表

现较为突出。总的来看,各层次土壤饱和持水量的趋势是封育样地大于未封育样地。

表 1 不同封育年限下各土层土壤饱和持水量、田间持水量、毛管持水量

Table 1 The soil saturated water-holding capacity, capillary water-holding capacity and field capacity in different depth under the condition of different fencing years

土壤层次 Depth(cm)	类型 Type	土壤持水能力 (mm) Soil water-holding capacity(mm)		
		饱和持水量 Soil saturated water-holding capacity	田间持水量 Capillary water-holding capacity	毛管持水量 Field capacity
0-10	CK	51.7±3.25 ^{aA}	39.27±2.99 ^{abA}	44.51±2.74 ^{abA}
	1a	51.63±2.34 ^{aA}	39.40±0.84 ^{aA}	44.05±1.64 ^{aA}
	4a	55.98±1.83 ^{aA}	40.37±1.63 ^{abA}	44.78±1.57 ^{aA}
	12a	53.48±0.58 ^{aA}	43.55±1.81 ^{bA}	47.81±1.02 ^{bA}
10-20	CK	46.30±3.82 ^{aA}	34.66±4.28 ^{aA}	38.88±4.50 ^{abB}
	1a	49.46±3.00 ^{abA}	39.91±3.62 ^{abB}	43.62±3.91 ^{aA}
	4a	53.38±3.25 ^{abB}	39.18±1.95 ^{aA}	42.79±0.91 ^{aA}
	12a	50.87±2.31 ^{abAB}	39.79±2.12 ^{abB}	42.61±3.50 ^{abB}
20-40	CK	92.62±3.64 ^{aA}	67.54±6.78 ^{abA}	78.93±0.58 ^{abB}
	1a	98.18±2.51 ^{aA}	64.9±1.66 ^{abB}	86.68±3.00 ^{abA}
	4a	101.54±4.69 ^{abB}	71.81±4.84 ^{abA}	85.52±4.14 ^{abA}
	12a	97.62±2.30 ^{abB}	73.27±2.76 ^{bbB}	86.95±1.06 ^{bbB}
0-40	CK	190.62±2.70 ^{abB}	141.47±2.63 ^{abB}	162.32±2.63 ^{aC}
	1a	199.27±1.22 ^{abB}	144.21±4.17 ^{abC}	174.35±0.33 ^{abB}
	4a	210.90±2.49 ^{aC}	151.36±2.29 ^{abB}	173.09±1.00 ^{bbB}
	12a	201.96±2.21 ^{aC}	156.61±3.28 ^{bcB}	177.37±2.35 ^{bcB}

注:表中小写字母表示同层次不同处理比较,大写字母表示同处理不同层次比较,字母相同表示没有显著性差异

Note: The same small and capital letter mean no significant difference in different sample plot in same layer and same sample plot in different layers, respectively.

2.1.2 土壤田间持水量

封育与未封育试验区土壤田间持水量也均随土壤深度的增加而降低(表 1)。随封育年限延长,0~40cm 土层土壤田间持水量均呈增加趋势,与自然放牧地相比,封育 1a、4a、12a 分别增加了 2.74、9.89、15.14mm。这种增加趋势在 10~20cm 土层表现最为明显。与未封育相比,封育 12a 后 0~10cm、10~20cm、20~40cm 土层田间持水量分别增加了 10.9%、14.8%、8.5%。

2.1.3 土壤毛管持水量

从表 1 可以看出,不同土层毛管持水量封育后较未封育试验区普遍稍有提高,但自封育开始到封育 12a 各层之间变化不明显,差异很小。0~10cm 土层的毛管持水量封育 12a 后增加明显,增加了 3.1mm。从 0~40cm 整体来看,封育 1a、4a、12a 的土壤毛管持水量分别为 174.35、173.09、177.37mm,表现出封育 12a 最大,封育 4a 最小,封育 1a 居中,与自然放牧的未封育(为 162.32mm)相比,分别增加了 12.03、10.77、15.05mm。

上述分析表明,饱和持水量、田间持水量和毛管

持水量随禁牧年限增加均有所增加,虽然增加幅度并未达显著性检验水平,但可以说明封育可以提高土壤的持水能力,而且封育时间越长,其持水能力越强。与未封育相比,封育 12a 后 0~40cm 整层饱和持水量、田间持水量和毛管持水量分别增加 11.34、15.14、15.05mm,基本分别按 0.95mm/a、1.26mm/a、1.25mm/a 的速率增加。

2.2 封育和未封育状况下土壤持水能力的影响因素分析

分析发现(表 2),饱和持水量、田间持水量和毛管持水量均与地下生物量、土壤有机碳呈现极显著或显著性的正相关关系($P<0.05$ 或 $P<0.01$),而与土壤容重呈现极显著的负相关($P<0.01$),与地上生物量呈现弱的负相关($P<0.10$)。

3 讨论

土壤持水能力受土壤容重、土壤有机质、地下生物量等多种因素的共同影响。随着封育年限的延长,0~40cm 整层土壤持水量有所增加,封育 12a 后饱和持水量、田间持水量和毛管持水量分别增加

表 2 土壤持水能力与各因素的相关性

Table 2 The correlation of soil water-holding capacity and various factors

土壤持水能力(mm) Soil water-holding capacity(mm)	容重(g/cm ³) Soil bulk density	地下生物量(Kg/m ²) Underground biomass	地上生物量(Kg/m ²) Aboveground biomass	有机碳(Kg C/m ²) Organic carbon
饱和持水量	-0.704**	0.750*	-0.312	0.832**
田间持水量	-0.766**	0.638*	-0.271	0.713*
毛管持水量	-0.842**	0.718*	-0.201	0.769*

注:表中*表示在 0.05 水平显著性相关,**表示在 0.01 水平极显著性相关。

Note: * mean significant correlation($P < 0.05$), ** mean highly significant correlation($P < 0.01$).

11.34、15.14、15.05mm, 总体高于未封育样地。李红琴等^[16]指出围栏封育使 0~40cm 土层平均容重降低 6%, 土壤毛管持水量和饱和持水量分别增加了 16% 和 14%, 并分别按照每年 1.95mm 和 1.77mm 的速率增加, 这与本研究的结果一致。曹丽花等^[17]在对当雄草原不同退化草甸的研究中指出草甸退化导致的土壤容重变化首先表现在表层, 家畜践踏使天然草原的根系有向表层聚集的趋势。本研究表明, 饱和持水量、田间持水量和毛管持水量在不同封育年限下均随土壤深度增加而减少, 0~10cm 的持水量均高于 10~20cm 和 20~40cm 层次, 封育对上层土壤持水量影响较大。另外, 自然放牧条件下, 放牧全年均可发生, 家畜踩踏压实, 增加了土壤容重, 不仅限制了植物的光合生产, 而且地表覆盖的减少加大了土壤蒸发, 无效损耗量增加, 降低了土壤持水量。而封育样地放牧时间较短, 植被生长良好, 家畜觅食趋于平稳并减少了奔跑活动, 对土壤践踏较弱, 一定程度上使土壤容重降低, 毛管孔隙度增大, 吸水力增大, 有利于土壤的水源涵养。同时, 封育措施下家畜觅食后仍还有少量的枯落物留存地表, 在增加了覆被盖度^[18]的同时, 增加了土壤的有机质补给。另外, 封育可使牧草生长有休息的机会, 有利于光合物质的积累, 在这基础上土壤容重、生物量、土壤有机质等均发生变化, 覆盖物还影响到植被的蒸散和土壤有机质的提高。这与刘娜娜等^[19]研究结果相一致。表明封育不仅影响土壤容重提高植被生产力, 同时有利于生物固碳和土壤持水能力的提高。

吴启华等^[20]在对海北站高寒草甸的研究中指出土壤贮水量、最大持水量和毛管持水量与地下生物量、土壤有机质均呈现显著的正相关关系, 与土壤容重呈现极显著的负相关关系。这与本研究对三江源站高寒草甸的分析结论一致。表明放牧使土壤容重增加, 土壤表层板结, 不利于水分入渗, 而封育使植被退化逐渐恢复, 地下生物量增加, 同时增加了土壤有机质和全氮含量, 改变土壤结构, 增加毛管孔隙

度, 土壤疏松, 容重降低, 有利于土壤持水, 这与易湘生等^[21]的研究结论相似。

土壤持水量的变化在小尺度上, 主要受到土壤、地形和植被的影响^[22], 与土壤容重、土壤表面植被覆盖度和根系生长量及分布状况有关。在大范围主要受到气候及碳氮循环影响, 通过土壤和植被碳氮含量、有机质含量等对土壤持水量产生作用。

4 结论

4.1 随着封育年限的延长, 封育样地 0~40cm 土层土壤持水能力增加, 总体高于未封育样地, 其中, 0~10cm 的持水量高于 10~20cm 和 20~40cm 土层。封育 12a 后饱和持水量、田间持水量和毛管持水量分别增加 11.34、15.14、15.05mm, 基本分别按 0.95mm/a、1.26mm/a、1.25mm/a 的速率增加, 说明封育对上层土壤持水量的影响较大, 可改善土壤持水性能, 提高土壤持水能力。

4.2 土壤的持水能力受多种因素共同作用, 并主要受土壤容重、有机质、地下生物量的影响, 与土壤容重呈极显著的负相关($P < 0.01$), 与土壤有机质、地下生物量呈极显著或显著的正相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

参考文献 (References):

- [1] 李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 475-482.
Li Hongqin, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Variations of production and water use efficiency of the vegetation in alpine meadow[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 475-482.
- [2] 刘省勇, 崔国文, 牛壮, 等. 放牧对小叶章种群特征及土壤主要养分含量的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(6): 79-84.
Liu Shengyong, Cui Guowen, Niu Zhuang, et al. Effects of grazing on population characteristics of *deyeuxia angustifolia* and content of main soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(6): 79-84.
- [3] 李媛媛, 董世魁, 李小艳, 等. 围栏封育对黄河源区退化高寒草地植被组成及生物量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2):

- 275-279.
Li Yuanyuan, Dong Shikui, Li Xiaoyan, et al. Effect of grassland enclosure on vegetation composition and production in headwater of Yellow river[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(2): 275-279.
- [4] 李登宣, 王澄海. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 89-99.
Li Dengxuan, Wang Chenghai. The relation between soil moisture over the Tibetan Plateau in spring and summer precipitation in the eastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 89-99.
- [5] 王祥, 郑伟, 朱亚琼, 等. 人工草地建植对昭苏盆地山地草甸碳水通量特征的影响[J]. 中国草地学报, 2017, 39(2): 1-10.
Wang Xiang, Zheng Wei, Zhu Yaqiong, et al. Effects of plowing and sowing on carbon and water fluxes in mountain meadow in Zhaosu Basin[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(2): 1-10.
- [6] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮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.
- [7] Wu G, Liu Z, Zhang L, et al. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1-2): 331-337.
- [8] Bilotta G S, Brazier R E, Haygarth P M. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 94: 237-280.
- [9] 刘晓琴, 吴启华, 李红琴, 等. 不同封育年限高寒草甸植被/土壤碳密度及净生态系统 CO₂ 交换量的比较[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 848-856.
Liu Xiaoqin, Wu Qihua, Li Hongqin, et al. A Comparison of the vegetation/soil carbon density and net ecosystem CO₂ exchange of alpine meadow with different enclosure durations [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 848-856.
- [10] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 等. 封育与放牧对三江源区高寒草甸植物和土壤碳储量的影响[J]. 草原与草坪, 2012, 32(5): 41-46.
Fan Yuejun, Hou Xiangyang, Shi Xiaohong, et al. The response of carbon reserves of plants and soils to different grassland managements on alpine meadow of three headwater source regions[J]. *Grassland and Turf*, 2012, 32(5): 41-46.
- [11] 董乙强, 安沙舟, 孙宗玖, 等. 禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠植被特征的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(1): 93-99.
Dong Yiqiang, An Shazhou, Sun Zongjiu, et al. Effects of grazing exclusion on vegetation characteristics in moderately degraded desert grasslands of *Seriphidium transiliense* [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(1): 93-99.
- [12] 徐翠, 张林波, 杜加强, 等. 三江源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.
- [13] 周印东, 吴金水, 赵世伟, 等. 子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化[J]. 西北植物学报, 2003, 23(6): 895-900.
Zhou Yindong, Wu Jinshui, Zhao Shiwei, et al. Change of soil organic matter and water holding ability during vegetation succession in Ziwuling region[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(6): 895-900.
- [14] 周华坤, 赵新全, 赵亮, 等. 高山草甸垂穗披碱草人工草地群落特征及稳定性研究[J]. 中国草地学报, 2007, 29(2): 13-25.
Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Zhao Liang, et al. The community characteristics and stability of the *Elymus nutans* artificial grassland in alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(2): 13-25.
- [15] 丁绍兰, 杨乔媚, 赵串串, 等. 黄土丘陵不同林分类型枯落物层及其林下土壤持水能力研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 104-108.
Ding Shaolan, Yang Qiaomei, Zhao Chuanchuan, et al. Study on water-holding ability of litter and soil in different forest distributions in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 104-108.
- [16] 李红琴, 乔小龙, 张德镗, 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] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 当雄草原不同退化草甸土壤含水量及容重分布特征[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 746-751.
Cao Lihua, Liu Heman, Zhao Shiwei. The distribution of soil water contents and bulk density on degraded grassland at Dangxiong[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 746-751.
- [18] 聂莹莹, 王国庆, 彭芳华, 等. 围栏封育对呼伦贝尔草原群落特征的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(1): 87-92.
Nie Yingying, Wang Guoqing, Peng Fanghua, et al. Effects of enclosure on community characteristics in Hunlunbuir meadow steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(1): 87-92.
- [19] 刘娜娜, 赵世伟, 杨永辉, 等. 云雾山封育草原对表土持水性的影响[J]. 草地学报, 2006, 14(4): 338-342.
Liu Nana, Zhao Shiwei, Yang Yonghui, et al. Study on water-holding capacity of the top soil of a steppe reserve in the Yunwu Mountains, Guyuan, Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(4): 338-342.
- [20] 吴启华, 毛邵娟, 刘晓琴, 等. 牧压梯度下高寒杂类草甸土壤持水能力及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3):

590-598.

Wu Qihua, Mao Shaojuan, Liu Xiaoqin, et al. Analysis of the water-holding capacity in alpine forb meadow under grazing gradient and relevant influence factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 590-598.

- [21] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 黄河源区草地退化对土壤持水性影响的初步探究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1708-1716.

Yi Xiangsheng, Li Guosheng, Yin Yanyu, et al. Preliminary study for the influences of grassland degradation on soil water retention in the source region of the yellow river[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1708-1716.

- [22] Parent A, F Anctil, Parent L, et al. Characterization of temporal variability in near-surface soil moisture at scales from 1h to 2 weeks[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325(1-4): 56-66.

Soil Water-holding Capacity under the Condition of Fencing in Alpine Meadow of the Source Region of Yellow River

HE Hui-dan^{1,2}, LI Hong-qin^{1,3}, ZHU Jing-bin^{1,2}, YANG Yong-sheng^{1,3}, WEI Ya-xi^{1,2}, LI Ying-nian^{1,3}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: Taking the alpine meadow under the condition of different fencing years and grazing in Maqin, Qinghai Province as the research object, through the monitoring of soil bulk density, soil saturated water holding capacity, capillary water holding capacity and field capacity, the soil water-holding capacity and its relationship with environmental factors were analyzed. The results as follows: In the whole layer of 0~40 cm, The field capacity of different plots had an increasing tendency overall, the soil water-holding capacity in 0~10 cm soil layer was higher than 10~20 cm and 20~40 cm. After fencing 12 years, soil saturated water holding capacity, capillary water holding capacity and field capacity increased by 11.34 mm, 15.14 mm and 15.05 mm respectively, at a increase rate of 0.95 mm, 1.26 mm and 1.25 mm per year respectively. Soil water storage were negatively correlated with soil bulk density significantly ($P < 0.01$), and positively correlated with organic carbon content and underground biomass ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). In the vertical direction, the surface soil water-holding capacity was higher than the deep, and in the fencing and grazing prohibition gradient, soil water-holding capacity in fencing plot was higher than grazing plot. It showed that fencing can improve the soil water-holding capacity.

Key words: Source region of Yellow River; Fencing; Alpine meadow; Soil water-holding capacity

【责任编辑 李 平】