

# 牧压梯度下高寒草甸实际蒸散量及植物生产水分有效利用率的研究

贺慧丹<sup>1,2</sup>, 祝景彬<sup>1,2</sup>, 未亚西<sup>1,2</sup>, 李红琴<sup>1,3\*</sup>, 杨永胜<sup>1,3</sup>, 李英年<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 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:**以青海海北高寒草甸为研究对象,分析了禁牧(对照,CK)、轻度放牧(light grazing, LG)、中度放牧(moderate grazing, MG)、重度放牧(heavy grazing, HG)试验地土壤贮水量和利用水量平衡法计算的植被实际蒸散量动态变化,并对不同牧压梯度下高寒草甸的水分有效利用率进行了比较。结果表明,牧压梯度下土壤贮水量在生长季的变化特征基本一致,表现为5月、6月高,7月低,8月以后缓慢升高。5月8日到9月28日0~50 cm土层平均土壤贮水量为CK>HG>LG>MG,分别为(222.82±7.07), (199.71±4.52), (189.00±4.37)和(187.69±3.93) mm,表明放牧使土壤贮水量减小,统计分析表明,禁牧与放牧地之间贮水量差异达极显著水平( $P<0.01$ )。不同牧压梯度上高寒草甸植被实际蒸散量在生长季的变化特征基本一致,表现出5月低,6月开始升高,7月蒸散量达最大,以后逐步下降;整个生长季CK、HG蒸散量较高,LG、MG蒸散量较低,分别为(389.37±3.39)、(355.74±5.54)、(350.17±8.6)和(346.15±1.31) mm。从土壤水分亏缺来看,重牧不利于水源涵养,但禁牧亦影响水源涵养功能的提高,只有适度放牧有利于水源涵养。植被实际蒸散量与降水量呈极显著正相关关系。高寒草甸植被地上地下净初级生产力在生长季的水分有效利用率表现为LG、MG较高,HG较低,CK的水分有效利用率最低,分别为0.55%、0.56%、0.50%和0.37%,说明适度放牧能够提高植被水分有效利用率,而禁牧显著降低植被水分有效利用率。

**关键词:** 牧压梯度; 高寒草甸; 土壤贮水量; 植被实际蒸散量; 水分有效利用率

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.09.005

**中图分类号:** X53

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906(2017)09-1488-06

**引用格式:** 贺慧丹, 祝景彬, 未亚西, 李红琴, 杨永胜, 李英年. 2017. 牧压梯度下高寒草甸实际蒸散量及植物生产水分有效利用率的研究[J]. 生态环境学报, 26(9): 1488-1493.

HE Huidan, ZHU Jingbin, WEI Yaxi, LI Hongqin, YANG Yongsheng, LI Yingnian. 2017. Study on the actual evapotranspiration and the water utilization effectively in alpine meadow under different grazing gradients [J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(9): 1488-1493.

土壤水分运动及含水量高低既是生态系统物质循环和能量流动的基础,又是控制各种营养物质矿化、稳定和转移的必要条件(McMurtrie et al., 1990; Powers, 1990; 李春喜等, 2016),对于植被的生长和繁殖具有重要作用。蒸散在全球或区域气候模式、水文循环过程,以及农业、林业等环境中都具有重要意义(Zhou et al., 2011)。蒸散过程体现了物质和能量的交换,是全球生态系统(大气圈、水圈、岩石圈和生物圈)动态平衡的重要环节,是连接大气水、地表水和地下水等水循环过程最为重要的纽带,也是水陆表面热量平衡和水量平衡的重要因素,蒸散过程伴随着能量的迁移和转化(邴龙飞等, 2012)。放牧是目前草地利用最经济的方式(殷桂涛等, 2016),植物群落特征与牧压梯度密切相关(刘省勇等, 2015),

但不适宜的放牧强度致使草原植被、土壤遭受不同程度的破坏,对植被、土壤有机质、降水截留等产生作用,从而影响蒸散量(李辉东等, 2015)。

青藏高原被誉为“中华水塔”,湖泊、冰川众多,是众多大江大河的发源地。同时,高寒草地植被土壤根系发达,具有较高的持水和滞水能力,对中国东部区域的水资源具有重要的补给和调节作用。由于受人类活动和自然因素的影响,青藏高原高寒草甸生态系统的退化导致了生物多样性降低和水土流失等一系列的生态问题(刘兴元等, 2011; 韩立辉等, 2011; 李东等, 2010; 李晓东等, 2011),为了保护青藏高原的生态环境,需要对草地退化过程中的一系列生态问题进行治理和研究(周华坤等, 2005)。目前,某些高寒草甸生态系统由于长

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0501802); 青海省国际合作项目(2015-HZ-801); 青海省自然基金项目(2016-ZJ-943Q)

**作者简介:** 贺慧丹(1991年生),女,博士研究生,主要从事全球变化生态学研究。E-mail: hhdan712@foxmail.com

\*通信作者: 李红琴(1981年生),女,副研究员,博士,主要从事全球变化生态学研究。E-mail: lihongqin\_00@126.com

**收稿日期:** 2017-07-04

期超载放牧、鼠类危害和气候变暖等影响而退化加剧, 进而影响其水涵养功能(杜际增, 2015; 赵新全, 2011; 张森琦等, 2004)。研究表明, 近年来高寒草甸地区自然降水与过去多年平均降水基本保持不变, 但气候温暖化加剧导致了土壤植被蒸散力加大, 土壤水分散失严重, 植被生长受水分(土壤水分和大气降水)胁迫影响更趋明显(张核真等, 2013; 黄洵等, 2013; 姚玉璧等, 2017)。以往对于蒸散的研究, 在农林业领域中较为系统和深入, 且研究成果较多(张清平等, 2015; Franz et al., 2009; 赵亚丽等, 2014), 但由于观测手段等客观因素的限制, 蒸散一直是水文学领域水文过程研究中较难处理而被许多研究者简单化甚至忽略的因子, 因此蒸散的研究迄今仍然是陆面水文水循环研究中的薄弱点(党安荣等, 2003)。本文以水量平衡法计算分析了高寒草甸牧压梯度下植被实际蒸散量, 并对牧压梯度下高寒草甸植被生产的水分有效利用率进行了比较, 将对评价青藏高原高寒草甸生态系统的水分涵养功能及对植被生产的水分利用状况提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验样地位于青海海北高寒草甸生态系统国家野外科学观测研究站。海北站位于青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地, 地处 37°29'~37°45'N, 101°12'~101°23'E, 海拔 3 200~3 600 m。该区域具有高原大陆性气候特征, 东南季风和西南季风都相对较弱。由于受到高海拔条件的制约, 该区域无明显的四季之分, 仅有冷暖两季的区别, 年平均气温-1.7 °C。冷季气候比较寒冷干燥, 暖季气候相对凉爽湿润。降水主要集中在植被生长季, 每年 5—9 月的降水量约占全年降水总量的 80%(李英年等, 2004)。植被建群种为矮嵩草(*Kobresia humilis*), 主要优势种为异针茅(*Stipa aliena*)、麻花艸(*Gentiana straminea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和紫羊茅(*Festuca rubra*)等(周兴民, 2001)。由于海拔较高、气温较低, 牧草生长相对低矮, 植被的群落结构也相对单一(周兴民等, 1982)。土壤为草毡寒冻锥形土(*Mat-CryicCambisols*), 土壤发育年轻, 土层相对浅薄, 但含有丰富的有机质(乐炎舟等, 1982)。

### 1.2 研究材料及分析方法

#### 1.2.1 实验设计

试验地为冷季放牧草场, 于 2011 年 8 月建立, 参照以往研究(赵新全, 2011), 牧压梯度设置为禁牧(对照, CK)、轻度放牧(LG, 4.5 sheep·hm<sup>-2</sup>)、中度放牧(MG, 7.5 sheep·hm<sup>-2</sup>)和重度放牧(HG,

15 sheep·hm<sup>-2</sup>)。4 个试验地紧邻, 由围栏围封同一牧户的草场而建, 试验羊为当地藏系绵羊。放牧时间为 9 月 20 日—次年 5 月 31 日。

#### 1.2.2 要素监测与分析

##### (1) 土壤含水量及降水量

2013 年 5—9 月每月 8 日、18 日和 28 日采用土钻取土法, 采集 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 各层土壤并测定其质量含水量  $M$ ,  $M=(\text{土壤湿重}-\text{土壤干重})/\text{土壤干重}\times 100\%$ , 设 5 个重复。若遇雨天则延后 2~3 d。现场取样后及时称重, 而后在 85 °C 烘箱中烘干至恒重再称重, 利用差值计算得到土壤含水量。降水量数据取自海北站所观测的资料。

##### (2) 净初级生产量

监测时以每个试验区中央点为中心, 设计 20 m×20 m 的观测区, 以中央点及 20 m×20 m 的角点为观测样点, 即每个试验区共设 5 个点(重复)。将 50 cm×50 cm 样方内的绿体用剪刀齐地面剪下后装袋, 再用内径为 8 cm 的根钻分别在 0~10、10~20 和 20~40 cm 层次取土柱, 以测定地下根系生物量, 每个样方 3 个重复。植物生长末期(约 8 月底—9 月初)的生物量达到最大值时的测定值为地上净初级生产量(ANPP)。因高寒草甸地区地下净初级生产量(BNPP)监测非常困难, 一般采用周转量法(当年地下最大生物现存量与最小现存量差值)进行估算(李英年, 1998)。其中, 净初级生产量(NPP)是地上、地下净初级生产量之和。

##### (3) 土壤贮水量( $\Delta W$ ):

采用下式计算土壤贮水量(刘昌明等, 1999):

$$\Delta W = \sum_{L=1}^5 (W_{L1} - W_{L2}) \quad (1)$$

$$W_{L1} = 0.1 \times M \times R \times H \quad (2)$$

式中,  $W_{Li}$  为第  $L$  层(共 5 个 10 cm 层次)  $i$  的土壤贮水量(mm);  $M$  为土壤质量含水量;  $R$  为实测土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $H$  为土层深度(10 cm)。

##### (4) 实际蒸散量

采用地表水分平衡公式进行计算(刘昌明等, 1999):

$$ET = P - f + R - \Delta W + \Delta Q \quad (3)$$

式中, ET 为实际蒸散量(mm);  $P$  为时段降水量(mm);  $f$  为地表径流(mm);  $R$  为灌溉量(mm);  $\Delta W$  为一定时间内土壤贮水量的变化量(mm);  $\Delta Q$  为某一土壤深层水分渗漏或地下水补充量(mm), 由于高寒草甸植被的根系主要分布在浅层土壤, 根系在 40 cm 以下分布较少, 并且草毡表层具有较强的滞水性, 降水下渗不易超过根层, 土壤 50 cm 以下为砾石层, 地下水位 3 m 左右, 地下水对土壤水

补给作用并不明显,故取 $\Delta Q=0$ 。同时,由于实验地地形平坦,且实验地点无集中连续暴雨发生,地表径流较弱,故可忽略地表径流( $f=0$ )。此外,该区域无灌溉( $R=0$ ),故降水是土壤水分的主要来源,即土壤湿度的变化主要受降水的影响。文中还简要地以降水量与实际蒸散量差值计算分析了植物生长期水分亏缺状况,以衡量水源涵养的特征。植被实际蒸散量的季节变化特征,5月是8—28日的合计值,6、7、8、9均为上月28日—本月28日的合计值。

### 1.2.3 植物生产水分有效利用率

高寒草甸实际蒸散消耗单位重量的水分所产生的干物质重量,称水分有效利用率。公式如下(齐鹏春等,2014):

$$P_w = \frac{Y_d}{E_i} \quad (4)$$

式中, $P_w$ 为水分有效利用率; $Y_d$ 为单位土地面积上获得的干物质重量( $g \cdot m^{-2}$ ); $E_i$ 为单位土地面积上消耗于蒸散的总水量( $g \cdot m^{-2}$ )。

运用 Excel 和 SPSS 19.0 软件对所测定的数据进行统计分析

## 2 结果与分析

### 2.1 牧压梯度下植物生长期土壤实际贮水量

禁牧和放牧梯度下,植被生长期0~50 cm土壤贮水量在生长季节变化趋势基本一致(图1)。自5月开始逐渐下降,6—7月初增加,7月中旬后下降迅速,8—9月初升高明显,9月初以后随降水波动减少而缓慢下降。这种变化很大程度上与5月底层土壤维持和地表覆被较多,6月以后降水波动明显,以及植被生

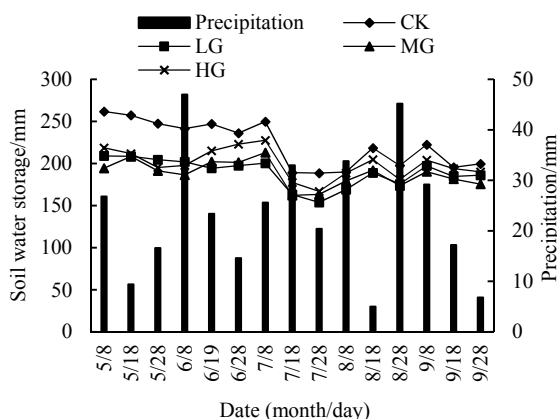


图1 2013年植物生长期0~50 cm土壤实际贮水量及降水量季节动态(月/日)

Fig. 1 Seasonal dynamic of soil actual water storage and precipitation in 0~50 cm of plant growing period in 2013  
降水量系前10 d累积降水量  
Precipitation is 10 days cumulative precipitation between every two observations

长过程中叶面积、生物量积累等变化有关。

在植物生长季,牧压梯度导致同一时期土壤实际贮水量不尽一致(图1)。5—6月初,CK表现出较高的土壤贮水量。而放牧地土壤贮水量低,且相互间差异小并高低交替。6月中旬以后,CK贮水量与放牧梯度试验地差距减小,但仍然最高,这种差异可维持到9月底。从5月8日—9月28日0~50 cm土层的平均变化来看,土壤贮水量表现为 $CK > HG > LG > MG$ ,分别为222.82, 199.71, 189.00和187.69 mm,其中LG与MG之间差异不显著,而其他各处理组之间差异显著,说明CK与放牧地相比保持有较高的土壤贮水量。

### 2.2 牧压梯度下海北高寒草甸植被蒸散量的季节动态及其影响分析

表1所示为海北高寒草甸牧压梯度下植被生长季植被实际蒸散量的季节变化特征(5月是8—28日的合计值,6、7、8、9均为上月28日—本月28日的合计值)。表1可见,不同牧压梯度下高寒草甸植被实际蒸散量在生长季的变化特征基本一致。蒸散量表现出在生长季初期的5月较低,6月开始升高,7月蒸散量达到最大值,以后逐步下降。随季节变化基本呈现出单峰式曲线变化过程,与同期气温、降水变化趋势一致。统计发现,在植物生长期CK、LG、MG和HG植被的实际蒸散量分别为389.37、350.17、346.15和355.74 mm,经统计分析表明,禁牧状况下植被实际蒸散量与放牧地差异显著,重牧区实际蒸散量最高,轻牧次之,中牧最低,但处理间差异不显著。

表1 牧压梯度下海北高寒草甸植被蒸散量的季节动态

Table 1 Seasonal dynamic of vegetation evapotranspiration under grazing gradient in Haibei alpine meadow

Item	Grazing gradient	May	June	July	August	September	Total
Precipitation/mm		26.0	85.0	79.0	84.0	53.2	327.2
Vegetation evapotranspiration/mm	CK	40.30	96.29	126.60	74.91	51.24	389.37
	LG	30.48	92.05	122.74	62.12	42.79	350.17
	MG	29.11	74.92	117.08	73.70	51.34	346.15
	HG	49.32	57.34	135.05	69.91	44.12	355.74
Vegetation water deficit/mm	CK	14.32	11.30	47.6	-9.09	-1.95	62.17
	LG	4.48	7.05	43.74	-21.88	-10.41	22.97
	MG	3.11	-10.08	38.08	-10.30	-1.86	18.94
	HG	23.32	-27.66	56.05	-14.09	-9.08	28.54

根据植被蒸散量与降水量计算出生长季月际植被水分亏缺量(表1),5月和7月属土壤水亏缺时期,而8月和9月降水有所盈余,从生长季来看,CK、LG、MG和HG均存在水分亏缺现象,分别为61.17、22.97、18.94和28.54 mm, LG和MG亏缺量较少,从植被蒸散量与降水量差值的植被水分亏缺量来看,重牧不利于水源涵养,但封育禁牧亦影响水源涵养功

能的提高，只有适度放牧有利水源涵养。

在植被生长过程中，不同牧压梯度下的植被蒸散量季节变化与同期降水量存在显著的正相关关系，所不同的是，CK、LG、MG 和 HG 条件下，受家畜啃食后残留的枯落覆盖物及植物生长量不同，植物叶面积、覆被等对降水的截留差异较大，导致实际蒸散量与降水量的相关系数有所不同。CK、LG、MG 和 HG 的植被蒸散量均与降水量存在正相关关系，相关系数分别为 0.687、0.764、0.710 和 0.641。

### 2.3 牧压梯度下高寒草甸植被生产的水分有效利用率的比较

牧压梯度的影响下，高寒草甸植被净初级生产量、地表覆盖程度等具有较大的差异性，导致植被生产力的水分有效利用率产生较大的差异（由于植物 9 月初测定值为地上净初级生产量，所以蒸散量采用 5 月 8 日—9 月 8 日的累计值）。由表 2 可知，地上净初级生产量和总净初级生产量的最大值均为 LG，地下净初级生产量最大为 MG，而 CK 与 HG 的值相对较小，由此说明适度放牧有利于提高植被的地上地下净初级生产量，特别是禁牧条件下，其总净初级生产量最低；此外，在牧压梯度下植被地上地下的净初级生产量的转换与分配发生变化，CK、LG、MG、HG 的地下净初级生产量分别为地上净初级生产量的 2.66、3.10、4.14 和 3.61 倍。净初级生产量的这种不同分布将导致其植被地上地下及总的净初级生产量的水分利用率有所不同。CK、LG、MG 和 HG 总的地上地下水利用效率分别是 0.37%、0.55%、0.56%和 0.50%。

表 2 牧压梯度下高寒草甸植被净初级生产力与水分有效利用率的变化特征

Table 2 Variation characteristic of NPP and WUE under grazing gradient in Haibei alpine meadow

Item	CK	LG	MG	HG
ANPP/(g·m <sup>-2</sup> )	344.61	418.86	333.65	340.84
BNPP/(g·m <sup>-2</sup> )	915.01	1 297.98	1 381.01	1 230.42
NPP/(g·m <sup>-2</sup> )	1 259.62	1 716.84	1 714.66	1 571.25
Evapotranspiration	342.58	315.00	307.30	317.74
AWUE/%	0.10	0.13	0.11	0.11
BWUE/%	0.27	0.41	0.45	0.39
WUE/%	0.37	0.55	0.56	0.50

## 3 讨论

### 3.1 土壤贮水量及植被蒸散量

土壤水分的变化主要受降水和蒸散（发）过程的影响，与土壤水分补给量和消耗量的大小密切相关。韩丙芳等（2015）研究不同生态恢复措施对黄土丘陵区典型草原土壤水分时空变异的影响时发现，土壤水分的变化可分为强烈水分丢失期、土壤水分蓄积期和缓慢蒸发期。本研究表明，不论是禁

牧还是放牧，植被生长季 0~50 cm 土壤贮水量、植被蒸散量在生长季节的变化趋势基本一致。0~50 cm 土壤实际贮水量在生长季均表现出 5 月、6 月相对较高，7 月较低，8 月、9 月变化缓慢，而植被实际蒸散量刚好相反，呈现单峰式变化规律。这种变化与黄土丘陵地区有一定差异。海北高寒草甸地区 5 月冻结的土壤开始由表层向深层解冻，解冻后的土壤冻结层水分在温度梯度的作用下补充到上层，深层土壤仍然处于冻结状态，阻隔了水分的下渗。加之此时牧草处于返青初期，生长缓慢，植株矮小，叶片面积小，植被蒸腾量低，低温条件下土壤表层蒸发也受到限制，土壤实际贮水量相对较高，但植被蒸散量较低。6—7 月初，降水增多，对土壤水的补给明显，提高了土壤贮水量。虽然植被仍未达较高的覆盖度，土壤蒸发明显，加上一定强度的植被蒸腾，导致蒸散量增加明显，植被蒸散量高。7 月中旬后期，降水减少，植被生长旺盛，叶面积大，该期良好的辐射、热量条件使植被和土壤发生强烈的蒸腾蒸发作用，植被耗水明显，土壤水散失严重，土壤贮水量下降显著。8—9 月初降水又明显增多，虽然植被仍有较高的蒸散量，但降水补给明显，土壤贮水量增加。9 月初以后，植被基本停止生长，植被的蒸腾作用减弱，并且此时的生物量最大，一部分枯体倒伏在地表，增大了土壤表层的密闭性，使土壤表层蒸发减弱。同时环境温度降低，土壤出现冻结现象，利于土壤对水分的保持。虽然降水减少，但植被实际蒸散量也显著降低，导致土壤水分略有提高，土壤贮水量随降水波动明显。

尽管不同牧压梯度下土壤贮水量及蒸散量季节变化趋势一致，但牧压梯度作用导致土壤实际贮水量和植被蒸散量在同一时期不尽一致。从 5 月 8 日—9 月 28 日来看，0~50 cm 整层土壤平均贮水量表现为 CK>HG>LG>MG，虽然生长季不同月份的土壤贮水量有一定的波动变化，但整体上 CK 的土壤贮水量保持最大。特别是 5—6 月初，CK 因常年禁牧，没有放牧家畜的践踏，土体疏松，土壤容重减小，孔隙度增大，禁牧还可使地表覆盖物多，覆盖物作为土壤（植被）-大气界面水分变化的“缓冲器”，不仅可延缓降水直接渗入土壤，更大程度上保护土壤水不致大量散失到大气，而且也有效降低了热量由表层向深层的传递，从而减缓了冻结土壤的融化，使融冻层对土壤水分的补给作用延长；同时，禁牧地因土壤持水能力增强，形成了较高的土壤贮水量。而放牧地受家畜啃食和践踏，植被覆盖相对较低，土壤较硬实，土壤贮水量低，且牧压梯度相互间差异小并高低交替。禁牧与重牧的实际蒸散量较高，这是由于完全禁牧条件下地表保有多

年的枯落物,对降水入渗到土壤的过程有一定的缓冲作用,加之地上生物量的截留作用,加强了降水入渗到土壤之前这个阶段的蒸发,故最终蒸散量较大;而重牧组由于过度放牧,牲畜对土壤表层的践踏较为严重,致使土壤表层较为硬实,不利水分入渗到土壤,加之植被盖度相对较低,土壤水分蒸发强烈,故最终植被实际蒸散量较高。

### 3.2 环境因素对植被蒸散量的影响

毫无疑问,植被实际蒸散量受到温度、降水、植物生长过程中地上地下生物量累积、植被盖度、叶面积指数、土壤物理性质等多重因素影响。特别是在高寒草甸的自然生态系统中降水量是土壤水的主要补给源,也是蒸发蒸腾的水源,即土壤贮水量除受植物生长过程中发生的蒸散作用影响外,很大程度受制于降水量的控制,而土壤贮水量的高低直接或间接地通过地表过程影响植被的蒸散量。本研究发现不论是禁牧还是不同放牧强度试验区,其植被的蒸散量与降水量呈现极显著的正相关关系( $P<0.01$ ),因放牧强度不同,其相关程度略有差异,但均达到显著水平。禁牧或放牧强度下植被蒸散量与降水量的相关性还说明,在降水保持一致的状况下,植被蒸散量还受到地表面枯落物、叶面积、生物量、净初级生产量、碎屑物等一系列因素的影响,同时也受到家畜对土壤践踏的影响而导致土壤硬实程度不一。例如,植被蒸散量与植被年地上地下净初级生产量呈现负相关趋势(表2),表现出净初级生产量越低,植被蒸散量越高。表明,放牧或禁牧通过改变土壤等相关因素而对蒸散量产生影响。

### 3.3 植被生产量的水分利用率

海北高寒草甸地区的降水主要集中在植被的生长季,5—9月降水量约占全年降水量的80%(李英年等,2004)。高寒草甸的整个生长过程可分为5月(植物初期营养生长期)、6—7月(植物强度生长期)、8—9月(植物生长末期)(李红琴等,2013)。但由于不同月份气候环境和植被生长状况的不同,使得植被生长过程中水分消耗差异较大。已有研究表明,退化的高寒草地除植被状况发生明显变化外,其土壤理化性质也发生显著的变化,进而影响到其水源涵养功能(熊远清等,2011)。放牧强度增加会造成草地植物功能群组成发生变化,物种多样性及地上净初级生产力降低,枯落物及土壤覆被减少,土壤有机碳含量下降,土壤孔隙度降低,土壤容重增加,土壤持水能力下降(Wheeler et al., 2002)。由表2可知,高寒草甸植被在生长季的水分有效利用率表现为 $MG>LG>HG>CK$ 。禁牧样地由于没有牲畜的啃食,立枯及枯落物较多,这对大气降水有一定的截留作用,尤其是在生长季初期,

这些降水作为无效降水直接蒸发到大气中,对植被生长影响较小。而适度放牧枯落物较少,能够提高植被水分有效利用率。

本研究探讨了牧压梯度下高寒草甸土壤贮水量和植被实际蒸散量的季节变化特征,并对不同牧压梯度下高寒草甸的水分有效利用率进行了比较,对于青藏高原高寒草甸的水源涵养和生态环境保护具有重要参考价值。但是,高寒草甸土壤贮水量和植被实际蒸散量受到降水、温度等环境因素和植被生长状况的共同影响。土壤贮水量与植被实际蒸散量的相互作用关系,以及降水、温度、地上生物量、地下生物量等因素对土壤蒸发、植被蒸腾的具体影响机制,仍有待进一步研究。

## 4 结论

(1)牧压梯度下土壤贮水量在生长季节的变化特征基本一致,植被生长期0~50 cm土壤实际贮水量表现为5月、6月份相对较高,7月份达到极低值,然后8月、9月份缓慢升高。即随季节变化土壤水分可分为春季水分补给期、夏季波动消耗期和冬季冻结水分稳定聚集期。5月8日—9月28日0~50 cm土层平均土壤贮水量表现为 $CK>HG>LG>MG$ ,整体上CK的土壤贮水量保持最大,说明CK能使土壤贮水量增加,放牧使土壤贮水量减小。

(2)不同牧压梯度下高寒草甸植被实际蒸散量在生长季的变化特征基本一致,蒸散量表现出自5月有所降低,至6月开始升高,7月蒸散量达到最大值,以后逐步下降。不同牧压梯度下的植被实际蒸散量在同一时期存在一定差异,5月、6月植被实际蒸散量差异较大,7月、8月、9月差异较小,总体上,CK与HG的植被实际蒸散量较大。植被实际蒸散量与降水量呈极显著正相关关系。在生长季水分处于亏缺状态,但LG和MG亏缺较少,可能与提高了水源涵养能力有关。

(3)高寒草甸植被在生长季的水分有效利用率表现为LG、MG较高, HG较低, CK的水分有效利用率最低,说明适度放牧能够提高植被水分有效利用率。

### 参考文献:

- FRANZ R, THOMAS W, ADM L, et al. 2009. A strip adjustment approach for precise georeferencing of ALOS optical imagery [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 47(12): 4083-4091.
- MCMURTRIE R E, BENON M L, LINDER S, et al. 1990. Water nutrient interactions affecting the productivity of stands of *Pinus radiata* [J]. *Forest Ecology and Management*, 30(1-4): 415-423.
- POWERS R F. 1990. Nitrogen mineralization along an altitudinal gradient: Interactions of soil temperature, moisture and substrate quality [J]. *Forest Ecology and Management*, 30(1-4): 19-29.
- WHEELER M A, TRILICA M J, FRASIER G W, et al. 2002. Seasonal grazing affects soil physical properties of a montane riparian community [J]. *Journal of Range Management*, 55(1): 49-56.

- ZHOU J B, WANG C Y, ZHANG H, et al. 2011. Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat-summer maize cropping system [J]. *Field Crops Research*, 122(2): 157-163.
- 邴龙飞, 苏红波, 邵全琴, 等. 2012. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 14(1): 1-13.
- 党安荣, 王晓栋, 陈晓峰. 2003. ERDAS IMAGINE 遥感图像处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社: 1-101.
- 杜际增, 王根绪, 李元寿. 2015. 近 45 年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J]. *草业学报*, 24(6): 5-15.
- 韩丙芳, 马红彬, 沈艳, 等. 2015. 不同生态修复措施对黄土丘陵区典型草原土壤水分时空变异的影响[J]. *水土保持学报*, 29(1): 214-219.
- 韩立辉, 尚占环, 任国华, 等. 2011. 青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对斑秃面积变化的响应[J]. *草业学报*, 20(1): 1-6.
- 黄洵, 黄民生, 黄飞萍. 2010. 福建省温室气体排放影响因素分析[J]. *热带地理*, 33(6): 674-680.
- 乐炎舟, 左克成, 张金霞, 等. 1982. 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点[C]. 高寒草甸生态系统(第 1 集). 北京: 科学出版社: 19-33.
- 李春喜, 郭雪妮, 张黛静, 等. 2016. 轻度干旱胁迫下黄淮麦区不同基因型小麦的响应分析[J]. *生态环境学报*, 25(9): 1446-1452.
- 李东, 黄耀, 吴琴, 等. 2010. 青藏高原高寒草甸生态系统土壤有机碳动态模拟研究[J]. *草业学报*, 19(2): 160-168.
- 李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 2013. 高寒草甸植被耗水量及生物量积累与气象因子的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 27(9): 176-181.
- 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 2015. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素[J]. *生态学报*, 35(2): 478-488.
- 李晓东, 傅华, 李凤霞, 等. 2011. 气候变化对西北地区生态环境影响的若干进展[J]. *草业科学*, 28(2): 286-295.
- 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 2004. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. *高原气象*, 23(4): 558-567.
- 李英年. 1998. 高寒草甸植物地下生物量与气象条件的关系及周转值分析[J]. *中国农业气象*, 19(1): 37-39, 43.
- 刘昌明, 王会肖等. 1999. 土壤-植物-大气界面水分过程与节水调控 [M]. 北京: 科学出版社.
- 刘省勇, 崔国文, 牛壮, 等. 2015. 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*, 37(6): 79-84.
- 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 2011. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究[J]. *草业学报*, 20(1): 167-174.
- 齐鹏春, 刘志, 肖继兵, 等. 2014. 辽西地区冬麦越冬期秸秆覆盖对土壤温度和湿度的影响[J]. *陕西农业科学*, 60(3): 1-5.
- 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等. 2011. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. *生态学报*, 31(19): 5780-5788.
- 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 2017. 气候变暖对马铃薯生长发育及产量影响研究进展与展望[J]. *生态环境学报*, 26(3): 538-546.
- 殷桂涛, 董婉珍. 2016. 不同放牧强度对草地植被群落特征的影响[J]. *草食畜牧*, (1): 45-50.
- 张核真, 路红亚, 洪健昌, 等. 2013. 藏西北地区气候变化及其对草地畜牧业的影响[J]. *干旱区研究*, 30(2): 308-314.
- 张清平, 田莉华, 刘渊博, 等. 2015. 黄土高原一年生饲草作物产量与水分利用效率[J]. *干旱区研究*, 32(2): 251-257.
- 张森琦, 王永贵, 赵永真, 等. 2004. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J]. *冰川冻土*, 26(1): 1-6.
- 赵新全. 2011. 三江源退化草地生态系统恢复与可持续管理[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 2014. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 47(17): 3359-3371.
- 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[J]. *草业学报*, 14(3): 31-40.
- 周兴民, 李建华. 1982. 海北高寒草甸生态系统定位站的主要植被类型及地理分布规律[C]. 高寒草甸生态系统(第 1 集). 北京: 科学出版社: 9-18.
- 周兴民. 2001. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社: 1-297.

## Study on the Actual Evapotranspiration and the Effective Utilization of Water in Alpine Meadow under Different Grazing Gradients

HE Huidan<sup>1,2</sup>, ZHU Jingbin<sup>1,2</sup>, WEI Yaxi<sup>1,2</sup>, LI Hongqin<sup>1,3\*</sup>, YANG Yongsheng<sup>1,3</sup>, LI Yingnian<sup>1,3</sup>

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:** Dynamic of soil water storage and actual evapotranspiration calculated by water balance method was studied in HaiBei alpine meadow under different grazing intensities including grazing exclusion (CK), light grazing (LG), moderate grazing (MG) and heavy grazing (HG) and water utilization efficiency was also compared. The results showed that soil water storage varied similarly in the growing season. It was higher in May and June. Then it decreased in July and increased slowly in August. The average soil water storage in the layer of 0~50 cm in different grassland from May 8th to Sep. 28th showed a trend that CK>HG>LG>MG, with the accurate number of (222.82±7.07), (199.71±4.52), (189.00±4.37) and (187.69±3.93) mm, respectively, showing that grazing exclusion could increase soil water storage and the difference between grazing exclusion and grazing was significant. The actual evapotranspiration had the similar seasonal change in the growing season in different grassland. It was lower from May, and began to rise from June, reaching peak in July and declining gradually later. In the growing season, the actual evapotranspiration of CK、HG was higher and LG、MG was lower, with the accurate number of (389.37±3.39), (355.74±5.54), (350.17±8.63) and (346.15±1.31) mm. The evapotranspiration had a significant positive correlation with precipitation. The water utilization efficiency of LG、MG was higher than that of HG and CK, with accurate number of 0.55%, 0.56%, 0.50% and 0.37%. This implied that moderate grazing could improve the water utilization efficiency while grazing exclusion had an opposite influence.

**Key words:** grazing gradient; alpine meadows; soil water storage; actual evapotranspiration; water utilization effectively