

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0016

HE Huidan, YANG Yongsheng, ZHU Jingbin, et al. Effects of seasonal grazing on vegetation water consumption and water utilization efficiency in alpine meadow of the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 130-139. [贺慧丹, 杨永胜, 祝景彬, 等. 季节性放牧对黄河源区高寒草甸植被耗水量及水分利用效率的影响[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 130-139.]

季节性放牧对黄河源区高寒草甸植被耗水量 及水分利用效率的影响

贺慧丹^{1,2}, 杨永胜^{1,3}, 祝景彬^{1,2}, 李红琴^{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, 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: 研究季节性放牧对植被耗水量、水分利用效率的影响, 是探索如何提高高寒草甸水源涵养能力的重要内容之一。以青藏高原三江源高寒草甸季节性放牧样地与自然放牧样地为研究对象, 分析了季节性放牧和自然放牧条件下高寒草甸植被耗水量、水分盈亏量、水分利用效率(WUE)的动态变化及其与环境因素的关系。结果表明: 在植被生长季(5-9月), 季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量在5月开始增加, 7月达最高, 分别为160.94 mm和145.96 mm, 季节性放牧样地植被总耗水量(395.52 mm)比自然放牧样地(348.14 mm)高13.61%。生长季平均来看, 季节性放牧样地和自然放牧样地5-9月水分正盈余, 分别为13.58 mm和70.96 mm, 但在植物生长旺季(8月)略有亏缺。季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量均与降水量呈弱的正相关关系。季节性放牧样地植被地上净初级生产量(ANPP)、地下净初级生产量(BNPP)和总的净初级生产量(NPP)比自然放牧样地分别高 $32.54 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $5.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $38.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 季节性放牧样地ANPP的水分利用效率(WUE)比自然放牧样地高53.85%, 而BNPP、NPP的WUE比自然放牧样地分别低13.06%和9.97%。这表明, 季节性放牧可提高植被生产量和耗水量, 但对高寒草甸WUE的影响因放牧方式不同导致地上、地下生物量分配格局不同而有所差异。

关键词: 高寒草甸; 季节性放牧; 植被耗水量; 水分盈亏; 水分利用效率

中图分类号: S812 文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2017)01-0130-10

0 引言

水作为生态系统中最基本的环境要素之一, 是供给植物生长的主要营养物质, 对植物生命活动、陆生植物分布、净初级生产力及生态系统物质循环等具有重要的影响作用^[1-2]。蒸散作为水循环的重要组成部分, 是连接土壤-植被-大气连续体过程最为重要的纽带^[3], 不仅对植物的生长发育、大气环流、气候调节起到重要作用, 也是联系植物气孔行为、碳交换和水分利用的关键生态过程^[4]。近年来

的全球气候变化对水循环等各个环节产生了重大影响, 降水时空分配格局发生改变, 气候温暖化加剧等一系列问题影响到地表径流的变化, 同时通过不同的方式对蒸散发能力产生影响^[5], 进而影响植被蒸散(耗水量)^[6]。

研究表明, 高寒草甸地区自然降水与过去多年平均基本保持不变或未显著增加, 但气候温暖化幅度十分明显, 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^[7]。进而在叠加人类活动

收稿日期: 2016-08-02; 修订日期: 2016-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501802); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030502); 青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-943Q)资助

作者简介: 贺慧丹(1991-), 女, 山东菏泽人, 2014年毕业于菏泽学院, 现为中国科学院西北高原生物研究所在读博士研究生, 从事全球变化生态学研究。E-mail: hhdan712@foxmail.com

* 通讯作者: 李英年, E-mail: ynli@nwipb.cas.cn.

加剧影响的基础上, 助推了高寒草甸地区草场退化、生产力下降、水分的利用效率降低、生态系统水源涵养功能衰减等一系列问题^[8]。而植被耗水量和水分利用效率(water use efficiency, WUE)是深入理解生态系统水碳循环间耦合关系的重要指标。特别是植被耗水量从传统的 Penman 模拟计算式到联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 计算式看到, 植被耗水量是温度、风速、湿度的函数, 能反映气候各因素的综合影响, 同时地区降水的多少控制着实际蒸散量^[9]。而 WUE 的高低直接关系植被生产量的高低。因此, 研究植被耗水量和 WUE 对揭示草地退化与恢复的影响机制有重要的意义^[10]。

国内外学者对植被耗水量及 WUE 的研究较多^[11], 如武思宏等^[12]对晋西黄土区造林树种耗水量的分析表明, 贫水年生长季内降水量小于同期树木耗水量, 单株树木供耗失衡; 丰水年生长季内, 降水丰沛但季节分配不均, 导致 5 月和 10 月树木供耗失衡, 且丰水年各林木耗水量大于贫水年各林木耗水量。党志强等^[13]对河西走廊紫花苜蓿宿耗水量研究表明, 苗期至分枝期是紫花苜蓿的需水临界期; 分枝期、开花期耗水量最多, 生长速度最快; 结实期和成熟期耗水量较少, 生长较慢, 叶面积系数小。胡亚瑾等^[14]表明覆盖方式对夏玉米产量及水分利用效率有重要影响, 指出垄覆地膜沟覆秸秆栽培模式能够显著提高玉米产量和水分利用效率。马晓丽等^[15]渭北秸秆还田对作物水分利用效率的研究指出, 秸秆还田对土壤蓄水保墒有重要作用, 并可显著提高冬小麦产量、水分利用效率和耗水量, 表现出随秸秆还田量增加而增加。但是, 这些研究多集中于农业或林业生态系统方面^[16], 以畜牧业为主的高寒草甸地区相对较少。高寒草甸作为青藏高原分布最为广泛的植被类型之一, 其分布面积约为 $120 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是青藏高原的重要草地资源^[17]。因此, 在高寒草甸地区开展植被耗水量及 WUE 的研究可为揭示草地退化和恢复机制、增强水源涵养和固碳功能等提供理论依据有重要意义。本文研究了季节性放牧对高寒草甸植被耗水量、生产力及 WUE 的影响, 可为三江源生态环境治理工程实施后的生态效应评估提供参考, 也将对评价青藏高原高寒草甸生态系统的水分涵养功能及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 研究区概况

本研究在青海省果洛州玛沁县进行。玛沁县位于青海省东南部, 是三江源国家级自然保护区的重点生态保护区。玛沁县年平均气温 $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 气温低, 日温差大。年平均降水量 514 mm, 多集中在 6-9 月, 属高原大陆性半湿润气候, 冬半年干燥少雨, 夏半年凉爽湿润。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*)、异针茅(*Stipa aliena*)、高原早熟禾(*Poa alpigena*)。伴生种有鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、异叶米口袋(*Gueldenstaedtia diversifolia*)、麻花苳(*Gentiana straminea*)、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*)等^[18]。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, 粗骨性强。

1.2 研究材料及方法

1.2.1 样地选取及实验设计

试验区设在玛沁县县城西北 5 km 处的果洛州气象局牧业气象生态监测点。监测点位于 $100^\circ 12' \text{ E}$ 、 $34^\circ 28' \text{ N}$, 海拔 3 761 m, 属于高寒草甸植被类型。季节性放牧样地生态监测点于 2003 年围封, 植被覆盖度平均可达 90%。自然放牧样地为当地牧民自然放牧区, 植被覆盖度平均可达 65%。需要说明的是, 这里所指的季节性放牧样地与自然放牧样地其单位面积草场上放牧绵羊的单位只数是一致的, 放牧强度均约为 1.36 只羊单位/ hm^2 , 只是自然放牧样地为全年自然放牧, 季节性放牧样地放牧时间缩短为冬半年的 11 月到次年 5 月, 与自然放牧样地相比放牧时间减少 5 个月。

观测区设在季节性放牧样地与自然放牧样地, 在每个样地设 $10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的观测区, 以观测区的中央点及四个对角点为观测样点。每个试验区植物群落生物量、土钻土壤湿度观测在四个角点和中心点取样, 为 5 个重复; 土壤样品及环刀在两个对角点和中心点取样, 为 3 个重复。

1.2.2 要素测定

(1) 地上、地下生物量及年净初级生产量

2013 年 5-9 月每月 15 日前后, 在上述 5 个观测点左侧 1 m 处进行 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 样方内植物生物量、群落特征等调查。观测时首先用卷尺测量植

被平均高度、点样框法^[19]测定植被盖度,收集枯落物装袋;其次用剪刀齐地面分种剪下绿色植物装袋。收集的样品经 85 °C 烘箱烘至恒重后称重,并累加得到群落地上生物量。监测地上生物量的同期,用内径 10 cm 的根钻分 0~10、10~20 和 20~40 cm 层次收集 50 cm×50 cm 样方内土柱(每个样方 3 个重复,并同层次混合),取回的土柱经砾石分拣、捣碎混合过筛、河水清洗等过程挑拣出包括多年死根在内的生物量装袋,晾干后置于 85 °C 烘箱烘干至恒重后称重得到地下生物量。以监测的月地上最大生物量(一般在 8 月和 9 月)替代地上年净初级生产量,因地下根系新老交织,区分当年新增根系十分困难,即地下净初级生产量(BNPP)以季节观测的最大与最小生物量差值来替代。需要说明的是,在自然放牧样地因放牧家畜觅食将导致地上净初级生产量(ANPP)的测定值可能偏低,考虑到地下净初级生产量远大于地上部分,故分析时采用月地上最大生物量替代地上净初级生产量,仍有实际意义。总的净初级生产量(NPP)为地上、地下净初级生产量之和。

(2) 实际蒸散量、降水量

2013 年 5-9 月每月 8、18、28 日在设计的上述 5 个观测点附近随机取样 5 次,用烘干法测定土壤质量含水率(占干土重的百分比)。用自行设置的渗漏仪测定土壤 40 cm 处水分渗漏量。水分观测遇降水时后延 1~2 天。降水量为果洛州气象局观测资料。实际蒸散量采用耗水量法计算获得,即实际耗水量就是实际蒸散量^[5]。依据无灌溉的水量平衡计算实际蒸散量^[20]:

$$ET = P - f - \Delta S + \Delta Q \quad (1)$$

式中: ET 为实际蒸散量(耗水量, mm); P 为时段降水量(mm); f 为地表径流(mm); ΔS 为时段贮水量的变化量(mm); ΔQ 为某一土壤深层水分渗漏或地下水补给量(mm)。由于实验地设置在地形平坦的草甸,植物生长良好,地表径流发生微弱,可假设 $f=0$ ^[5, 21]。因土壤 40 cm 以下为砾石层,地下水位 3 m 左右,土壤毛管比例极低,地下水对土壤水补给较少^[21-22],可假设 ΔQ 中地下水对土壤层的补给量为零,仅存在土壤渗漏量。另考虑到青藏高原高寒草地绝大部分地区土层保持在 40 cm 以内,故渗漏量取 40 cm 层次的观测值^[20],有:

$$\Delta S = \sum_{L=1}^5 (E_{L1} - E_{L2}) \quad (2)$$

$$E_{L1} = 0.1 \times M \times R \times H \quad (3)$$

式中: ΔS 含义同式(1); E_{L1} 为第 L 层(共 4 个 10 cm 层次)计算时段初($i=1$)、末($i=2$)的土壤贮水量(mm); M 为实测的土壤质量含水率; R 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); H 为土层深度(10 cm)。

(3) 水分盈亏量

水分盈亏量即降水量与蒸散量的差值,考虑到降水对蒸散量影响的相对滞后性,本文对水分盈亏计算的时间尺度为月和生长期。其表达式为^[23-24]:

$$D = P - ET \quad (4)$$

式中: D 为月水分盈亏量(mm); P 和 ET 的含义同式(1)。

(4) 水分利用效率

本文所指的是生态系统水平上的水分利用效率,可用某一阶段内消耗单位重量的水分所产生出的干物质重量来表示,实际上是测定其固碳和耗水两部分。其表达式为^[19]:

$$WUE = \frac{NPP}{ET} \quad (5)$$

式中: WUE 为植被生物量干重的水分利用率,是指单位面积植物每耗水 1 mm 所能固定的有机干物质克数($g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$); ET 含义同式(1)。

2 结果与分析

2.1 生长期植被耗水量及水分盈亏的季节变化

图 1 给出了生长期 5-9 月季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量及降水量的月动态变化。由图可知,季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量季节变化均呈“单峰型”,5-7 月季节性放牧样地与自然放牧样地植被耗水量分别以 59.02 mm/月和 58.01 mm/月的速率上升。7 月达最高值,分别为 160.94 mm 和 145.96 mm,7-9 月基本以 61.34 mm/月和 54.51 mm/月的速率下降。两者月际分配与降水量分布基本一致。也可以看出,季节性放牧对植被耗水量的影响因月份不同而异,5、7、8 月季节性放牧样地的植被耗水量比自然放牧样地高,6 月和 9 月则基本无差异。总体来看,5-9 月季节性放牧样地植被总耗水量(395.52 mm)比自然放牧样地(348.14 mm)增加 13.16% ($P > 0.05$),二者分别比同期降水量低 3.32% 和 14.90%。高寒草甸冬季寒冷,土壤处于冻结状态,一般冷季降水短时留存在地表后蒸发到大气中。2013 年 1-4 月和 10-12 月降水量分别为 27.4 mm 和 11.9 mm,依此计算,玛沁高寒草甸季节性放牧样地与自然放牧样地年蒸散量(耗水量)

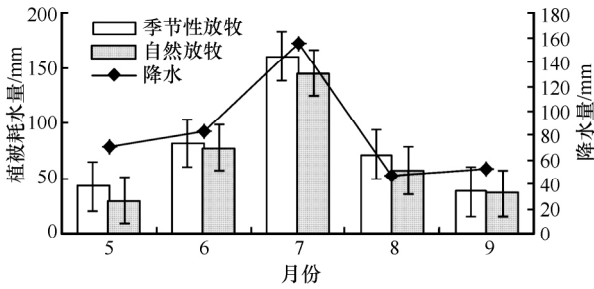


图1 玛沁高寒草甸季节性放牧样地和自然放牧样地 5-9月植被耗水量和降水量

Fig.1 Vegetation water consumption and precipitation of seasonal grazing plots and natural grazing plots from May through September in the alpine meadow ,Maqin

分别可达 434.82 mm 和 387.44 mm。

由图2可知,5、6月季节性放牧样地与自然放牧样地植被生长均有水分正盈余,受温度、地下冰冻融水等影响5月较其他月份盈余量大,分别为28.59 mm和41.55 mm。7月降水量最大,为155.5 mm,比历年同期稍有偏高,季节性放牧样地出现少量水分亏损,而自然放牧样地有所盈余。8

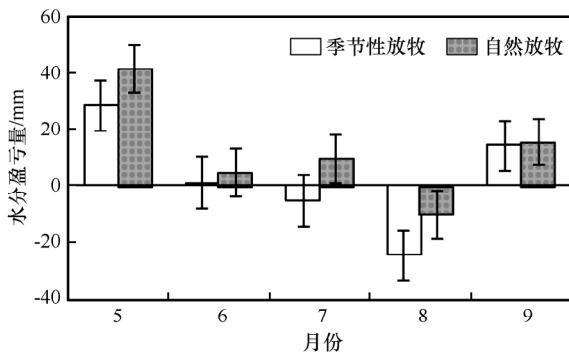


图2 玛沁高寒草甸季节性放牧样地和自然放牧样地 5-9月水分盈亏量

Fig.2 Water profit and deficit of seasonal grazing and natural grazing plots from May through September in the alpine meadow ,Maqin

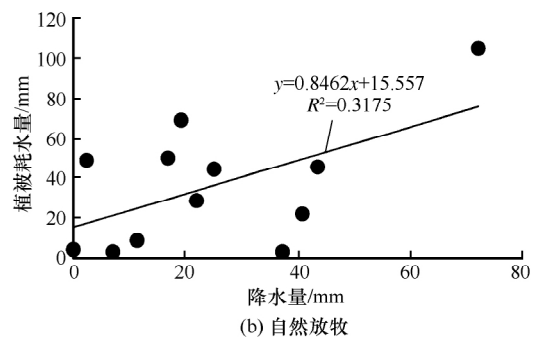
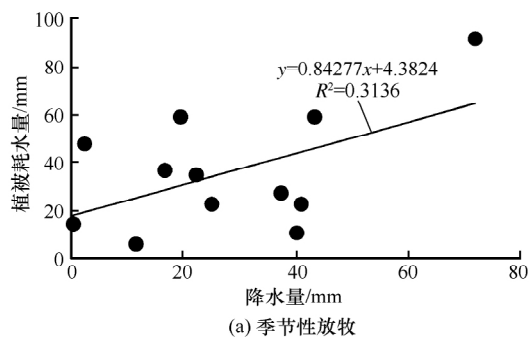


图3 玛沁高寒草甸季节性放牧样地(a)与自然放牧样地(b)植被耗水量与降水量的关系

Fig.3 Relation between vegetation water consumption and precipitation of seasonal grazing plots (a) and natural grazing plots (b) in the alpine meadow ,Maqin

月季节性放牧样地与自然放牧样地均出现水分亏缺现象,至生长末期(9月),二者土壤水分出现盈余。在整个植被生长季节,与自然放牧样地相比,季节性放牧样地降低了土壤水分的盈余量。

统计发现,5-9月降水量为409.1 mm,季节性放牧样地和自然放牧样地总盈余量分别为13.58 mm和70.96 mm,季节性放牧样地比自然放牧样地低近80%。其中,季节性放牧样地在7、8月,自然放牧样地在8月均出现水分的少量亏损现象,说明高寒草甸植被生长期降水量基本能满足植物生长,但在8月份土壤水分出现短缺,该时期偏干旱^[25]。但研究区5-9月总降水量高于季节性放牧样地和自然放牧样地的植被耗水量,表明样地植被缺水是降水季节性分配不均造成的,这与武思宏等^[12]对黄土高原林木地区的研究结果相似。

2.2 不同环境因素与植被耗水量的关系

图3分析了玛沁高寒草甸5-9月平均植被耗水量与降水量的关系。可以看出,季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量均与降水量呈弱的正相关关系。由图4看出,生长期的5-9月植被耗水量与降水量变化基本一致,但在个别月份出现降水量低于植被耗水量,尤其是季节性放牧样地在7月和8月。这是因为7、8月正是高原地区日照时数较长的时期,植物接收太阳辐射多,生长旺盛,光合作用强烈,大量产生有机物质,所以耗水量也较高。

图5表明,季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量与土壤贮水量并未表现出显著相关性($P > 0.05$)。图4(a)也可看出5-9月季节性放牧样地土壤贮水量除7月突然升高外,总体呈逐渐降低趋势,且9月为最低值。植被耗水量变化则与其不同,5-7月迅速升高,7月达到最大值,7-9月又

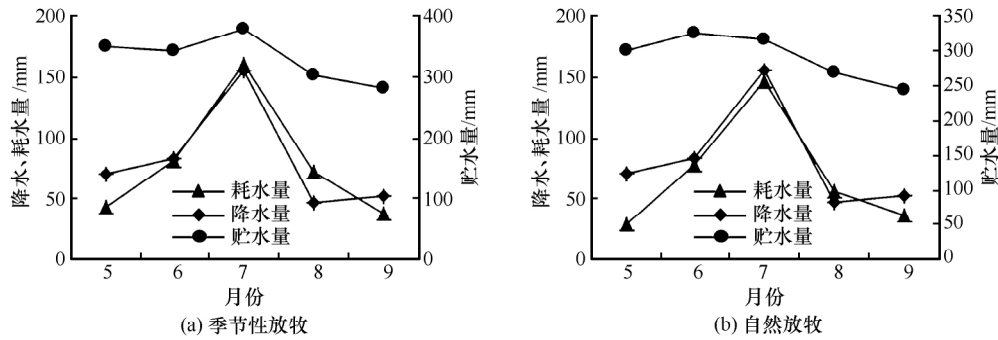


图 4 玛沁高寒草甸 5-9 月季节性放牧样地 (a) 与自然放牧样地 (b) 植被耗水量、降水量与土壤贮水量的变化

Fig. 4 Monthly variations of vegetation water consumption, precipitation and soil water storage of seasonal grazing plots (a) and grazing plots (b) from May through September in the alpine meadow, Maqin

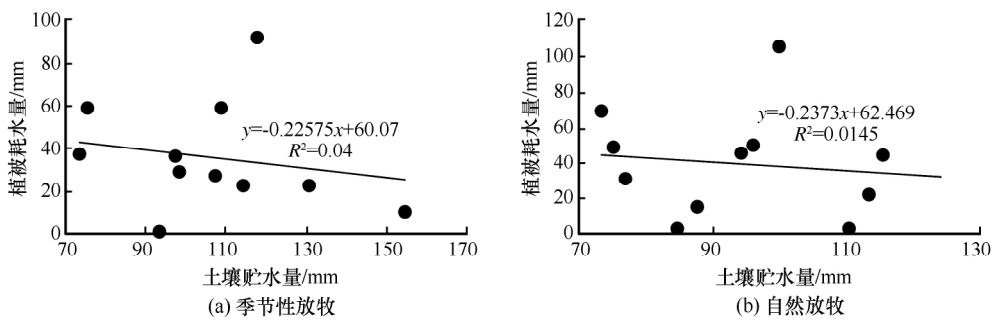


图 5 玛沁高寒草甸季节性放牧样地 (a) 与自然放牧样地 (b) 植被耗水量与土壤贮水量的关系

Fig. 5 Relation between vegetation water consumption and soil water storage of seasonal grazing plots (a) and natural grazing plots (b) in the alpine meadow, Maqin

迅速降低,但 5 月植被耗水量(42.91 mm)与 9 月植被耗水量(38.25 mm)基本无差异。自然放牧样地土壤贮水量与植被耗水量变化趋势和季节性放牧样地相似[图 4(b)],7 月植被耗水量最大,土壤贮水量则稍增加后又降低,9 月低于 5 月。

2.3 植被水分利用效率

水分的利用效率受植物生物量、植被耗水量共同作用,而植被耗水量又与降水量呈弱的正相关。另外,植物的 WUE 还受温度、CO₂ 浓度、土壤水分、光照等各种因素的影响。但植物 WUE 增加,不代表植物生产量增加^[1]。本研究中 ANPP 采用 9 月初最大测定值,所以植被耗水量采用生长期的 5-9 月的总耗水量。表 1 可以看出,季节性放牧样地 5-9 月 ANPP 的 WUE 比自然放牧样地高

53.85%,而 BNPP 和 NPP 的 WUE 则分别比自然放牧样地低 13.06%和 9.97%。也可看出,季节性放牧对 BNPP 和 NPP 的 WUE 的影响比对 ANPP 的 WUE 小。放牧使样地地上生物量一部分转化为动物食物,从而影响 WUE,所以这里不能简单解释为季节性放牧提高对水分的利用效率。但总体来看 BNPP 和 NPP 远大于 ANPP,受到的影响相对较小,对季节性放牧样地 WUE 的分析仍有意义。

3 讨论

3.1 植被耗水量与水分盈亏

植被耗水量受多种因素的影响,与降水量、光照强度、温度、大气、土壤和植物生长状况等相关。本研究中季节性放牧样地和自然放牧样地的植被耗

表 1 玛沁高寒草甸季节性放牧样地与自然放牧样地生长期植被生产量的水分利用率

Table 1 Vegetation production and water utilization efficiency of seasonal grazing plots and natural grazing plots in the alpine meadow, Maqin

指标	季节性放牧			自然放牧		
	ANPP	BNPP	NPP	ANPP	BNPP	NPP
生产量/(g·m ⁻²)	78.75	1 151.74	1 230.49	46.21	1 145.78	1 191.99
WUE/(g·m ⁻² ·mm ⁻¹)	0.20	2.91	3.11	0.13	3.29	3.42

水量变化均呈“单峰”趋势,在7月具有最大值,其中5-9月均是季节性放牧样地大于自然放牧样地,但6月和9月季季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量差异不明显,这与何园球等^[26]、李英年等^[27]的研究结果一致。主要是因为5月植物进入返青生长期,植被叶片面积小蒸腾低。但由于季节性放牧样地植被枯落物堆积,覆盖度较大,一定程度上会影响降水下渗,大部分降水以蒸发形式被消耗,增加了耗水量。自然放牧样地由于长期连续放牧,枯落物覆盖度较低^[28],表层易受5月低温影响,植被蒸腾和蒸散作用都较季节性放牧样地弱,耗水量相对较低。6月温度回升,土壤蒸发增强,植物也进入返青生长后期,蒸腾耗水较5月明显增加。这一时期自然放牧样地受冬季放牧活动影响,地表覆盖物很少,甚至裸露,降水在重力作用下部分下渗留在土壤中,但裸露的地表在温度影响下蒸发较强。另外,自然放牧样地受家畜啃食,植被蒸腾光合作用都比季节性放牧样地弱。多种因素作用下导致季节性放牧样地耗水量较自然放牧样地高。7、8月是植被强壮生长期,相对充足的水热条件使植被蒸腾和土壤蒸发作用强烈,耗水量达到最大值。季节性放牧样地植被覆盖度高,冠面水分蒸发高也是耗水量高于自然放牧样地的原因之一。9月植被生长逐渐停止,无论是季节性放牧样地还是自然放牧样地植被蒸腾作用都减弱,植被耗水量开始下降。

高寒草甸水分盈亏量不仅受制于温度、降水、光照等影响植被蒸腾和土壤蒸发的因素,还受土壤冻结层水分等的影响^[29]。植物从5月初萌动发芽到叶面积达最大时期的8月初,温度逐渐升高,耗水量逐渐增加,至9月因植物枯黄而降低。表现出5月受地下冰冻融水补给有大量盈余,7-8月出现不同程度的亏损,9月有所盈余。6月之前正值青藏高原气候干旱时期,但5月有土壤冰冻融水的补给,不至于出现水分亏缺现象。6月土壤基本解冻,此时土壤冰冻融水仅在深层100 cm以下存在,大气降水并未达较高的水平,植被耗水增加后水分盈余减少严重。特别是季节性放牧样地,由于枯落物层的“缓冲”及增加地表“粗糙度”的作用,相对自然放牧样地土壤温度低,土壤解冻和植物物候发育期均有不同程度的推迟,枯落物层在缓解土壤蒸发的同时维持了较大的土壤湿度。同时,也易截留降水,冠面蒸发较大,表现出耗水相对较高。而自然放牧样地经冬季放牧,地表近似裸露,并受冬季劲风影响,土壤表面形成一定的“干土层”,土壤湿

度相对季节性放牧样地较低,有降水产生时一部分水将及时补充到土壤。期间新生长的植物蒸腾小,植被耗水相对季节性放牧样地低,导致了6月较5月水分盈亏量明显下降。6月下旬以后,温度升高,大气降水丰富,植物叶面积增大,季节性放牧样地的覆盖物在良好的水热条件下快速分解。两样地的主要差异在于季节性放牧样地仍有少量的枯落物保存,且未受放牧干扰的后续影响,在相同水热条件影响下,降水与耗水差异减小。季节性放牧样地与自然放牧样地水分盈亏量基本相似且保持在较低的水平,而且这种状况可维持到9月。需要指出的是,8月环境气温逐渐降低,但季节性放牧样地上年度留存一定量的枯落物及立枯物可缓解土壤降温 and 降湿,土壤温度和湿度较自然放牧样地高。受该类环境条件影响,季节性放牧样地部分植物仍有较强的光合生长而出现较大的蒸腾耗水,进而引起水分亏缺。这与杜嘉等^[30]对三江平原森林、湿地、旱田和水田生态系统的研究结果有所不同。他们指出春季(5月)水分亏损现象严重,在降水相对集中的6-8月水分亏损量相对较少,其中6-7月有少量盈余,而9月由于降水量减少出现亏损。这表明高寒草甸地区的冻融层对水分盈亏量有重要作用,尤其是植物返青生长初期,同时枯落物覆盖度也会产生一定影响。

3.2 植被耗水量与各因素的关系

降水量是影响植被耗水量的因素之一,范晓梅等^[9]对长江源区高寒草甸研究指出蒸散与降水正相关。王信增等^[31]也指出土壤水分是影响植被蒸散的因素之一。本研究表明季节性放牧与自然放牧条件下植被生长期耗水量均与降水量呈弱的正相关,5-9月动态变化趋势一致。其中,5-7月降水量逐渐增加且5、6月高于同期耗水量,植被不受水分胁迫影响。随气温回升,植物开始生长,光合和蒸腾作用增强,植被的耗水量随之加大。7月水热条件良好,但降水量低于季节性放牧样地植被耗水量却高于自然放牧样地。这是因为季节性放牧样地受动物踩踏啃食等干扰小,植被生长较好,植被耗水量也较高。降水在7月达到最大值,植被耗水量受到限制也在7月最高,之后开始下降。水分短缺成为这一时期季节性放牧样地的限制因素。

本研究结果显示季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量均与土壤贮水量无显著相关性。这主要是因为高寒草甸植被耗水量与土壤贮水量在不同的植被生长阶段受不同因素影响。5-6月土壤贮

水量主要来自降水和土壤冰冻融水的补给,植被矮小蒸腾作用弱,耗水少,土壤贮水量在降水和冰冻融水的双重补给下具有较高值。7-9月主要来自降水补给,7月植物耗水量最高,但降水量也急剧增多,土壤贮水量也高。8-9月,降水较7月降低,在无深层冰冻融水补给情况下,土壤贮水量比7月低。与5月相比,9月植被需水量也较低,但没有深层冰冻融水补给,使得土壤贮水量较5月低。另外,土壤贮水量整体呈下降趋势,但在季节性放牧样地7月出现明显的升高,变化剧烈,自然放牧样地则变化平缓。这是因为7月在相同的降水条件下,季节性放牧样地放牧时间短,土壤容重比自然放牧样地小^[32],土壤空隙度大,降水更容易入渗。同时,季节性放牧样地有较厚的枯落物腐殖质作为缓冲层,在外界温度高时有保水作用,大大缓解了土壤水的损失^[33]。枯落物腐殖质还影响5、6月冰冻融水对上层补给的后续作用^[34],截留降水影响贮水量的同时又使降水大部分用于蒸发。上述多种因素影响下,最终产生7月土壤贮水量突然增加的现象。总的来说,植被的耗水量主要与降水、植被生长过程中的蒸散有关。而土壤贮水量主要受植被生长、冻融变化发生的水分转运以及降水补充等共同作用,一定程度上还受覆盖度^[35]、土壤质地的影响^[36]。除非遇到极端的干旱天气,否则,每个月均维持了较高的土壤贮水量且月际变化不明显,导致植被耗水量与土壤贮水量之间无显著相关性。

3.3 植物的水分利用效率

本研究发现季节性放牧提高了植被的 ANPP、BNPP 和 NPP,但 BNPP、NPP 的 WUE 却小于自然放牧样地。这说明一个地区的净初级生产量高并不代表对水分的利用效率高,同时也说明,放牧方式或放牧强度影响导致地上、地下生物量分配格局不同,其 WUE 存在一定的差异。这是由于较大根系对产量的促进作用会被蒸腾耗水增加的作用所抵消,使植被 WUE 降低^[37]。季节性放牧样地受动物影响小,植被地下生物量大,地下生物量促进植物进一步生长,加强光合、蒸腾作用,使植被耗水量增加,生产量和耗水量的综合作用使得 WUE 反而较低。相反,一些研究指出^[38-40] WUE 季节和年变化趋势与生产量一致,WUE 在生产量高的季节或年份较高。如 Hu 等^[41]对中国四个典型草地生态系统研究表明,生产量与 WUE 季节变化趋势相同,均是生长旺季较高,生长初期和生长末期较低。出现这种差异可能是因为地域不同,本研究位于高寒

草甸地区,但更深层的原理需要进一步探讨。

4 结论

本文通过分析得到以下结论:

(1) 生长期 5-9 月季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量均先增加后降低,并在 7 月具有最大耗水量,分别可达 160.94 mm 和 145.96 mm。说明季节性放牧与自然放牧并未影响到植被耗水量的季节变化规律,但季节性放牧样地植被耗水量比自然放牧样地平均增加 13.61%,虽然并未达到显著性差异($P > 0.05$),但仍能说明季节性放牧可提高植被耗水量。若考虑冷季土壤冻结后降水基本被蒸发,则 2013 年玛沁高寒草地季节性放牧样地与自然放牧样地年蒸散量(耗水量)分别可达 434.82 mm 和 387.44 mm。

(2) 生长期 5-9 月季节性放牧样地和自然放牧样地总体有水分正盈余,分别为 13.58 mm 和 70.96 mm,降水量大于植被耗水量。5 月有较大盈余量,6 月和 9 月季节性放牧样地和自然放牧样地盈余差异较小,7 月季节性放牧样地受水分限制而自然放牧样地有少量盈余,8 月严重亏缺。

(3) 季节性放牧样地和自然放牧样地植被耗水量均与降水量变化趋势一致,并呈弱的正相关关系($P < 0.05$)。土壤贮水量与植被耗水量相关系数较小,但与季节性放牧样地植被耗水量变化基本相似,与自然放牧样地植被耗水量无相关。

(4) 季节性放牧样地 ANPP、BNPP、NPP 大于自然放牧样地,表现为季节性放牧一定程度上能提高植被的生产量。但季节性放牧样地 ANPP 的 WUE 大于自然放牧样地的 WUE, BNPP、NPP 的 WUE 小于自然放牧样地 BNPP、NPP 的 WUE,说明植物生产量和耗水量高,WUE 不一定高。同时表明,高寒草甸 WUE 的影响因放牧方式不同导致地上、地下生物量分配格局不同而有所差异。

参考文献(References):

- [1] A Lamusa, Jiang Deming, Li Xuehua, et al. Study on the dynamic change of soil moisture content in some typical plantations in Horqin sand land[J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(5): 604-609. [阿拉木萨,蒋德明,李雪华,等.科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(5): 604-609.]
- [2] Xiao Dongmei, Wang Miao, Ji Lanzhu. Influence of water stress on growth and biomass allocation of dominant tree species in mixed forest of broad-leaved and Korean pine at Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 93-97. [肖冬梅,王淼,姬兰柱.水分胁迫对长白山阔叶红松林主要

- 树种生长及生物量分配的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 93-97.]
- [3] Bing Longfei, Su Hongbo, Shao Quanqin, et al. Changing characteristic of land surface evapotranspiration and soil moisture in China during the past 30 years[J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, 14(1): 1-13. [邴龙飞, 苏红波, 邵全琴, 等. 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, 2012, 14(1): 1-13.]
- [4] Yair A, Raz-Yassif N. Hydrological processes in a small arid-catchment: scale effects of rainfall and slope length[J]. Geomorphology, 2004, 61(1/2): 155-169.
- [5] Reziwanguli Maimaitiyiming, Yang Jianjun, Liu Wei. Changing characteristics of potential evapotranspiration, air temperature and precipitation in Ebinur Lake basin from 1957 to 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 69-76. [热孜宛古丽·麦麦提依明, 杨建军, 刘巍. 艾比湖流域1957-2013年潜在蒸散、气温、降水变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 69-76.]
- [6] Li Hongqin, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Water consumption of alpine meadow and the influence of the meteorological factors on the vegetation biomass accumulation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 176-181. [李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 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, 2013, 27(9): 176-181.]
- [7] Li Lin, Zhu Xide, Wang Qingchun, et al. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai Plateau using GIS[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 320-328. [李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 320-328.]
- [8] Du Jizeng, Wang Genxu, Li Yuanshou. Rate and causes of degradation of alpine grassland in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers during the last 45 years[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(6): 5-15. [杜际增, 王根绪, 李元寿. 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, 2015, 24(6): 5-15.]
- [9] Fan Xiaomei, Liu Guangsheng, Wang Yibo, et al. Influence of vegetation coverage on evapotranspiration of alpine meadow in headwaters of the Yangtze River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6): 17-26. [范晓梅, 刘光生, 王一博, 等. 长江源区高寒草甸植被覆盖变化对蒸散过程的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 17-26.]
- [10] Hu Zhongmin, Yu Guirui, Wang Qiufeng, et al. Ecosystem level water use efficiency: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498-1507. [胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.]
- [11] Donovan L A, Dudley S A, Rosenthal D M, et al. Phenotypic selection on leaf water use efficiency and related ecophysiological traits for natural populations of desert sunflowers[J]. Oecologia, 2007, 152(1): 13-25.
- [12] Wu Sihong, Bi Huaxing, Zhu Qingke, et al. Estimation and analysis of water consumption of the main afforestation species in west Shanxi Province in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(4): 550-557. [武思宏, 毕华兴, 朱清科, 等. 晋西黄土区主要造林树种耗水量测算与分析[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 550-557.]
- [13] Dang Zhiqiang, Zhao Guiqin, Long Ruijun. Water consumption and water-consuming law of alfalfa in Hexi Corridor[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(3): 67-71. [党志强, 赵桂琴, 龙瑞军. 河西地区紫花苜蓿的耗水量与耗水规律初探[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 67-71.]
- [14] Hu Yajin, Wu Shufang, Feng Hao, et al. Effects of different mulching models on soil moisture and summer maize yields[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(6): 699-708. [胡亚瑾, 吴淑芳, 冯浩, 等. 覆盖方式对夏玉米土壤水分和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6): 699-708.]
- [15] Ma Xiaoli, Jia Zhikuan, Xiao Enshi, et al. Effects of wheat-residue application on soil water and water use efficiency in the Wei-bei Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 59-64. [马晓丽, 贾志宽, 肖恩时, 等. 渭北旱塬秸秆还田对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 59-64.]
- [16] Zhao Yali, Xue Zhiwei, Guo Haibin, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(17): 3359-3371. [赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 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, 2014, 47(17): 3359-3371.]
- [17] 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. [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.]
- [18] 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. [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.]
- [19] Li Xinrong, He Minzhu, Zerbe S, et al. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scale[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(8): 932-940.
- [20] Liu Changming, Wang Huixiao. Water transfer processes of soil-plant-atmosphere continuum interface and water saving control[M]. Beijing: Science Press, 1999. [刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [21] Qi Peitong, Gu Song, Tang Yanhong, et al. Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 202-211. [戚培同, 古松, 唐艳鸿, 等. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 202-211.]
- [22] Liang Sihai, Wan Li, Li Zhiming, et al. The effect of permafrost on alpine vegetation in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1): 45-52. [梁四海, 万力, 李志明, 等. 黄河源区冻土对植被的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 45-52.]
- [23] Tao Yufen, Wang Lixiang, Han Shifeng, et al. Water production potential and development in dryland farming area of northern China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993. [陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰, 等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[M]. 北京: 气象出版社, 1993.]
- [24] Zhao Jubao, Xu Zhuling, Zhong Zhaozhan, et al. Water balance in dryland farming of northern China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [赵聚宝, 徐祝龄, 钟兆站, 等. 中国北方旱地农田水分平衡[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

- [25] Meng Lin, Mao Peichun, Zhang Guofang. Study on the alfalfa productivity and water consumption in suburb plain area of Beijing [J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(4): 36-40. [孟林, 毛培春, 张国芳. 京郊平原区苜蓿生产能力与耗水规律的研究[J]. *草业科学*, 2007, 24(4): 36-40.]
- [26] He Yuanqiu, Shen Qirong, Wang Xingxiang, et al. Effect of soil moisture and phosphorus supply on water consumption and water use-efficiency by paddy rice cultivated in aerobic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 901-907. [何园球, 沈其荣, 王兴祥, 等. 不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 901-907.]
- [27] Li Yingnian, Cao Guangmin, Bao Xinkui. Analysis on water consumption and water consumption rule of alpine meadow in its growing period [J]. *Agricultural Meteorology*, 1996, 17(1): 41-43. [李英年, 曹广民, 鲍新奎. 高寒草甸植被生育期耗水量和耗水规律的分析[J]. *中国农业气象*, 1996, 17(1): 41-43.]
- [28] Wang Mingjun, Han Guodong, Cui Guowen, et al. Effects of grazing intensity on the biodiversity and productivity of meadow steppe [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(5): 862-868. [王明君, 韩国栋, 崔国文, 等. 放牧强度对草甸草原生产力和多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 862-868.]
- [29] Zhang Lele, Zhao Lin, Li Ren, et al. Investigating the influence of soil moisture on albedo and soil thermodynamic parameters during the warm season in Tanggula Range, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 351-358. [张乐乐, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原唐古拉地区暖季土壤水分对地表反照率及其土壤热参数的影响[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 351-358.]
- [30] Du Jia, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Study on water consumption and water budget in the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(2): 155-163. [杜嘉, 张柏, 宋开山, 等. 三江平原主要生态类型耗水分析和水分盈亏状况研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(2): 155-163.]
- [31] Wang Xinzeng, Jiao Feng, Liu Yuanxin, et al. Relationships between soil moisture and environmental factors at different spatial scales [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 319-323. [王信增, 焦峰, 刘源鑫, 等. 不同空间尺度土壤水分与环境因素的关系[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 319-323.]
- [32] Li Fengxia, Li Xiaodong, Zhou Bingrong, et al. Effects of grazing intensity on biomass and soil physical and chemical characteristics in alpine meadow in the Source of Three Rivers [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 11-18. [李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 等. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(1): 11-18.]
- [33] Li Guangnan, Jia Yanfeng, Fan Haoming, et al. Effect of undisturbed litter on soil temperature and freeze-thaw process of black soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6): 1680-1687. [李光南, 贾燕锋, 范昊明, 等. 原状枯落物覆盖对土壤温度及冻融过程的影响[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(6): 1680-1687.]
- [34] 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. [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.]
- [35] Qi Pengchun, Liu Zhi, Xiao Jibing, et al. Effects of straw mulching on soil temperature and humidity during the overwintering period of winter wheat in the west of Liaoning Province [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 60(3): 1-5. [齐鹏春, 刘志, 肖继兵, 等. 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*, 2014, 60(3): 1-5.]
- [36] Dong Liguang, Li Shengbao, Jiang Qi, et al. Soil moisture storage of different land use types in Ningxia semi-arid hilly area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 184-189. [董立国, 李生宝, 蒋齐, 等. 宁夏半干旱黄土丘陵区不同土地利用类型土壤贮水量变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(10): 184-189.]
- [37] Li Fusheng, Kang Shaozhong, Zhang Fucang. Effects of CO₂ enrichment nitrogen and water on photosynthesis evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3): 387-393. [李伏生, 康绍忠, 张富仓. CO₂浓度、氮和水分对春小麦光合、蒸散及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 387-393.]
- [38] Grunzweig J M, Lin T, Rotenberg E, et al. Carbon sequestration in arid-land forest [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(5): 791-799.
- [39] Li Huidong, Guan Dexin, Yuan Fenghui, et al. Water use efficiency and its influential factor over Horqin meadow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 478-488. [李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 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*, 2015, 35(2): 478-488.]
- [40] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, et al. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 65-82.
- [41] Hu Zhongmin, Yu Guirui, Fu Yuling, et al. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and amongst four grassland ecosystems in China [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1609-1619.

Effects of seasonal grazing on vegetation water consumption and water utilization efficiency in alpine meadow of the source regions of the Yellow River

HE Huidan^{1,2}, YANG Yongsheng^{1,3}, ZHU Jingbin^{1,2}, LI Hongqin^{1,3}, WEI Yaxi^{1,2}, LI Yingnian^{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: Research of seasonal grazing impact on vegetation water consumption and water utilization efficiency is one of the important contents of how to improve the capacity of water conservation. Taking the alpine meadow under the condition of seasonal grazing and natural grazing in Maqin, Qinghai Province as the research object, the dynamic changes of vegetation water consumption, water surplus and deficit, vegetation productivity and water utilization efficiency and their relations with environmental factors were analyzed. The results show that in vegetation growing season (from May to September), vegetation water consumption first increase in May and then drop in the seasonal grazing plots and natural grazing plots. The maximum water consumption is in July, up to 160.94 mm, and 145.96 mm, respectively. The total vegetation water consumption of seasonal grazing plots (395.52 mm), 13.61% more than that of natural grazing plots (348.14 mm). On average, from May to September, water surplus amount of seasonal grazing plots and natural grazing plots is 13.58 mm and 70.96 mm, respectively. But they all have a slight deficit in August. The vegetation water consumptions of seasonal grazing plots and natural grazing plots are all weak positively correlated with precipitation, and have nothing to do with soil moisture storage. Seasonal grazing can increase the amount of vegetation production. The aboveground and belowground net primary productions and the total net primary production are $32.54 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $5.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, and $38.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, larger than those in natural grazing plots. The water utilization efficiency of aboveground net primary production in seasonal grazing plots is higher than that in natural grazing plots. Besides, belowground net primary production and total net primary production in seasonal grazing plots are lower than those in natural grazing plots by 13.06% and 9.97%, respectively, showing that seasonal grazing can improve the vegetation production and water consumption, but the impact on water utilization efficiency depends on a lot of indexes.

Key words: alpine meadow; seasonal grazing; vegetation water consumption; water surplus and deficit; water utilization efficiency

(本文编辑: 武俊杰)