

草地不同恢复时限水分动态与生产力的关系

荣浩¹, 何京丽^{1*}, 张欣¹, 张林², 杨红艳²

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 以荒漠草原典型区域不同封育年限的天然草地为研究对象, 研究不同恢复时限下草地初级生产力及土壤水分、植物耗水量、水分利用效率的变化, 分析初级生产力与土壤水、草地生态耗水等水分因子之间的关系, 研究结果表明, 恢复时限在3年以上, 草地初级生产力有显著提高, 恢复时限为5年时草地表层土壤含水量显著高于恢复1年草地、恢复3年草地和放牧样地。水分因子与不同恢复时限下草地初级生产力的相关性依次为水分利用效率 > 土壤含水量 > 耗水量, 不同恢复时限下草地初级生产力与水分利用效率之间呈二次曲线关系 ($y = -33.604x^2 + 407.41x - 346.78$, $R^2 = 0.8772$)。

关键词: 荒漠草原; 地上生物量; 土壤含水量; 水分利用效率

中图分类号: S157.2

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2018)09-0006-05

Relationship between moisture dynamics and productivity in different restoration time limit of grassland

RONG Hao¹, HE Jingli^{1*}, ZHANG Xin¹, ZHANG Lin², YANG Hongyan²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, Inner Mongolia; 2. Inner Mongolia M-grass Ecology and Environment (Group) Co., Ltd., Inner Mongolia 010010, Hohhot)

Abstract: Taking the natural grassland with different enclosure durations in typical desert steppe as the research object, the changes between grassland primary productivity and soil water, plant water consumption and water use efficiency in different restoration time limit were studied. The relationships between primary productivity and water factors such as soil water and water consumption of grassland ecological water consumption were analyzed. The result showed that the grassland primary productivity had been significantly improved when the recovery time limit was over three years, and the grassland surface soil water content was significantly higher than the restoration time limit of one year, three years and grazing area when the recovery time limit was five years. The correlation between water factor and the primary productivity of grassland under different restoration time limits was that water use efficiency > soil moisture > water consumption. There was a two curve relationship between grassland primary productivity and water use efficiency under different restoration time limit ($y = -33.604x^2 + 407.41x - 346.78$, $R^2 = 0.8772$).

Key words: desert steppe; aboveground biomass; soil moisture; water use efficiency

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目“荒漠化退化草地治理技术及示范”(2016YFC0500500)

作者简介: 荣浩(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 草地水土保持与生态用水。

通讯作者: 何京丽(1960—), 女, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向: 牧区水利与水土保持。

草原是我国分布范围最广的陆地植被类型^[1],也是我国主要畜牧业生产基地和国家生态安全的绿色屏障。长期以来由于人们盲目追求牲畜数量,实行掠夺式经营,我国草原大面积超载过牧,水、草、畜失衡,目前我国有95.1%的可利用天然草原存在不同程度的退化,并以每年200万公顷的速度递增^[2]。我国草原大部分处于干旱半干旱地区,水分是制约干旱半干旱地区植物生长发育的关键因素^[3-4],诸多研究表明,天然草原初级生产力与土壤水分之间存在显著正相关关系^[5-7],天然草原在无灌溉和地下水位较低的情况下,土壤水主要靠大气降水有效注入补给,土壤水分在降水补给作用下与植物生长需水期耦合,降水量的增加能显著提高干旱半干旱草原的地上初级生产力^[8]。天然草地封育是目前广泛应用的促进退化草地生态恢复的主要措施,草地封育后可以减少牲畜对土壤、植被的影响,使植物得以休养生息,还有利于改善土壤的理化性质和生物活性^[9-12]。本研究从加强牧区生态建设与草地管理角度出发,选取荒漠草原典型区域不同封禁年限的天然草地进行试验调查,分析土壤水分、草地生态耗水与初级生产力之间的关系,为测算天然草地生产力水平,合理利用水草资源、修复草原生态,促使草原畜牧业向集约化、半集约化管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古四子王旗查干补力格苏木境内,属于典型的中温带大陆性气候,多年平均降水量为298 mm,降水量主要集中在6~9月,占全年降水总量的70%以上;多年平均气温3.4℃,≥10℃的年积温为2200~2500℃,无霜期175 d。试验区主要土壤为淡栗钙土,土壤较瘠薄,土壤有机质含量平均为1.56%,腐殖质层厚度一般为15~45 cm,土壤氮、磷较低,钾较高。草地生产力水平较低,单位面积干草产量为450 kg/hm²~750 kg/hm²,地表水资源贫乏,多为季节性内陆河流,主要供水源以地下水为主。试验区属荒漠草原,主要建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

选择恢复年限分别为1年(1 a)、3年(3 a)、5年(5 a)的天然草地,以放牧草地作为对照(CK),恢复草地连续封育期间不进行放牧或刈割,植物种以短花针茅、冷蒿为主,枯落物较多;放牧草地为自然放牧状态,放牧强度为中度放牧(4.3羊单位/hm²),放牧草地植物种以杂类草、一二年植物为主,植物群落结构简单,草层低矮,有裸露地表。

1.2.2 试验方法

植物生长初期(6月初)、生长盛期(7月底)和生长末期(9月初)在恢复1 a草地、恢复3 a草地、恢复5 a草地、放牧草地(对照)内随机布设3条100 m样带,沿样带每隔10 m布设1个1 m×1 m样方,地上初级生产力采用收割法从地上部生物量取样测定,即将样方内植物地面以上的所有绿色部分齐地刈割,不分植物种按样方分别装进纸袋,65℃恒温下烘至恒重,称其干重,测定植物群落地上生物量;测定生物量的同时,采用土钻法采集0~20 cm土壤样品,装入铝盒,随后用电子秤测定湿土加盒重,带回实验室在105℃下烘至恒重,测定其土壤含水量。

耗水量反映了草原植物群落水分的收支情况,试验区强降水过程少,地势较平坦,地下水位深,植物群落低矮稀疏,土层相对较薄,径流、深层渗漏和补给及植物截流等对0~50 cm土层的土壤储水量影响不大,故可利用简化的水分平衡公式来计算草地耗水量^[13-14],即:

$$W_i = W_{i-1} + R_i - E_{ii}, \quad (1)$$

式中: W_i 、 W_{i-1} 分别为时段末和时段初土壤水分储量, R_i 为时段内降水量, E_{ii} 为时段内耗水量,单位均为 mm。

水分利用效率用以描述植物产量与消耗水量之间关系,在群体水平上,考虑全生育期 WUE 可表示为下式^[15-16]:

$$WUE = Yd/ET \quad (2)$$

式中: WUE 为水分利用效率, kg/(hm²·mm); Yd 为时段内地上生物量, kg/hm²; ET 为时段内蒸散量,即耗水量, mm。

对试验区的降雨进行观测记录,降雨过程和降雨量利用2台反斗式自记雨量筒记录逐次降雨的起始时间,每1 min记录一次降雨量,降雨量精确至0.1 mm,降雨强度, mm/min。观测时间段内试验区各月降水量值见表1。

表1 2017年试验区观测期内各月降水量(mm)

月份	5	6	7	8	9	合计
降水量	7.1	64.3	79.1	74.8	11.6	236.9

1.2.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件对所测数据进行统计分析,用平均值表示测定结果,分别对各个施肥处理及对照进行单因素方差分析,采用 Excel2010 制图。

2 结果与分析

2.1 草地初级生产力变化

草地植被的初级生产力是草地生态系统结构和功能的综合体现,是植物生物生态学特性和外界环境条件共同作用的产物^[17-18]。荒漠草原植物一般是4月份末返青,10月份枯黄,整个生长季中生物量表现出明显的季节动态。不同恢复时限的天然草地地上生物量的变化基本相似,植物从返青到枯落是一个物质积累过程,随着植物的生长发育,地上生物量不断增加,8月下旬至9月上旬达到高峰。从表2可以看出,生长初期不同恢复时限植物群落的地上生物量均显著低于生长盛期和末期,并且,恢复第3年、第5年草地在生长初期、盛期和末期植物群落地上生物量之间的变化差异均达到显著水平($P < 0.05$),植物季节生长规律明显。放牧利用后的天然草地随着封育年限的延长,植物生长不同时期的地上生物量均明显增加,生长末期植物地上生物量达到最大,恢复1a草地、恢复3a草地、恢复5a草地比同一时期的放牧草地地上生物量分别提高 13.02 g/m^2 、 38.25 g/m^2 、 43.76 g/m^2 ,变化差异达到显著水平($P < 0.05$);生长末期恢复3a和恢复5a的地上生物量显著高于恢复1a草地($P < 0.05$),说明荒漠草原恢

复3年以上草地初级生产力有明显提高。

2.2 土壤表层水分变化

2017年5~9月,试验区降水量为236.9mm,降水主要集中在6~8月,占测定时间段内总降水量的92.1%,其中7月最大为79.1mm,5月降水量最低只有7.1mm(表1)。天然草地土壤水分主要靠大气降水补给,由于受到下垫面条件、土层渗透性、气流风速以及水分蒸散等多因素的制约,大气降水不能全量注入,根据牧区草地降水量和有效利用率研究,降水有效利用率约占降水量的60~70%^[19]。测定不同恢复时限草地和放牧草地不同植物生育期土壤含水量的变化发现(图1),植物生长初期由于自然降水较少,水分蒸发量大,天然草地土壤含水量偏低,恢复1a草地土壤含水量最低,为4.3%,不同恢复草地之间、恢复草地与放牧草地之间土壤含水量变化差异均未达到显著水平。随着6~8月降雨对土壤有效注入量的增加,植物生长盛期各个样地的土壤水分均达到最大,生长盛期土壤水分满足天然状态下植物生长耗水要求,后期随着降水量的减少和植物成熟,土壤含水量逐渐降低。围栏封育直接减少家畜采食与践踏,促进地上生物量的积累,植被及凋落物的增加减少了地表水分蒸发,植物生长盛期恢复5a草地0~20cm土层土壤含水量为11.3%,显著高于恢复1a草地、恢复3a草地和放牧草地($P < 0.05$),生长末期恢复5a草地表层土层土壤含水量显著高于放牧样地($P < 0.05$),恢复1a与3a草地的土壤含水量与放牧样地之间变化差异不显著。

表2 不同恢复时限草地地上生物量变化(g/m^2)

恢复期(年)	生长初期	生长盛期	生长末期
1	10.56abA	48.90bB	53.98bB
3	13.65bA	57.65cB	79.21cC
5	15.03bA	60.20cB	84.72cC
对照 CK	8.12aA	36.72aB	40.96aB

注:不同小写字母表示同列不同处理差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示同行不同处理差异显著($P < 0.05$)。

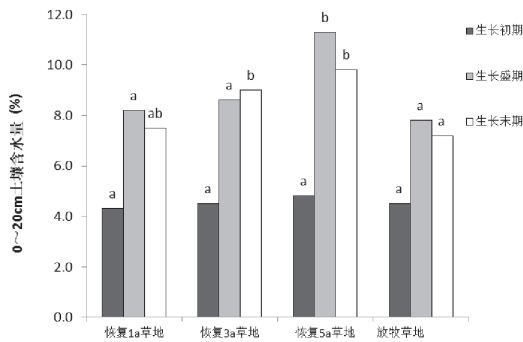


图1 不同恢复时限草地 0~20 cm 土层土壤含水量变化 (%)

2.3 草地初级生产力与水分因子的相关性

试验区天然草地为荒漠草原,草地类型为短花针茅+冷蒿+无芒隐子草,在光热、降水、土壤等常规自然条件下,天然草地受水分影响,生育期内随水分消耗的增加,饲草干物质积累量亦在增加。分析荒漠草原封育草地地上生物量与土壤含水量、耗水量之间的关系发现(图2),地上生物量随着表层土壤含水量的提高而增加,二者呈线性相关关系($y=10.282x-32.5, R^2=0.8114$);地上生物量与耗水量之间呈二次曲线关系,即随着地上生物量的增加植物耗水量出现先增加后减少的趋势($y=-0.0029x^2+1.24025x-71.791, R^2=0.7655$);地上生物量与水分利用效率之间也呈二次曲线关系($y=-33.604x^2+407.41x-346.78, R^2=0.8772$)。从地上生物量与表层土壤含水量、耗水量、水分利用效率的相关性来看,水分因子与草地初级生产力的相关程度为,水分利用效率>土壤含水量>耗水量,说明在各项水分因子中,水分利用效率对封育草地初级生产力的贡献最大。

3 结论与讨论

在退化草地的恢复措施中,天然草地封育恢复草地植被是最为常见的措施之一,研究表明封

育初期植物地上生物量呈上升趋势,在一定年限后上升速率逐渐下降,一般在8~10年时达到最大值,其后缓慢下降^[20],因此草地封育不应是无期限的,封育恢复一段时间后,可进行适当利用,促使草地生态系统的能量流动和物质循环保持良性状态。本研究中,荒漠草原恢复第三年后草地地上生物量开始平稳增加,恢复第五年地上生物量达到 84.72 g/m^2 ,闫玉春等^[21]研究表明围封7年左右的草地,已经达到或接近其生产潜力的峰值,继续围封将不利于其维持较高的生产力。

水分是影响草原初级生产力的重要因素,植被与水分之间存在密切联系,封育后的荒漠草原随着初级生产力的提高,土壤水分发生不同程度的变化,同时水分的变化又反作用于植被。孙栋元等^[22]研究认为,荒漠区封育沙地土壤水分变化过程中,不同的恢复年限、不同的植被类型、不同的恢复方式等都对土壤水分含量产生深刻的影响。土壤水的动态变异与草地植物耗水规律相耦合^[23],土壤水为草地植被生存和发育提供必需消耗的水量,自然状态下土壤湿度越大,供应水量越充足,植物生长越旺盛,耗水越多,反之亦然。目前对于土壤水分和耗水量等其他水分形式与生物量关系的研究在栽培牧草方面成果较多^[24-26],植被的耗水效率虽很少用于分析天然生态系统,但耗水效率基本上显示出生产力与总蒸发量的关系,种群的生产力取决于它的遗传特性和环境,而环境和种群又共同决定总蒸发量^[27]。封育后荒漠草原初级生产力与水分利用效率相关性最好,其次为土壤含水量、耗水量,侯琼等^[28]的研究也表明与内蒙古典型草原区牧草产量关系的密切程度是土壤水分>耗水量>降水量,土壤水分的有效性主要取决于土壤含水量以及释水量,而土壤性状和降水决定了土壤蓄调水的能力。较高的水分利用效率意味着可以利用有限的资源获得更多的光合产物,提高生产能力^[29],因此可以从水分利

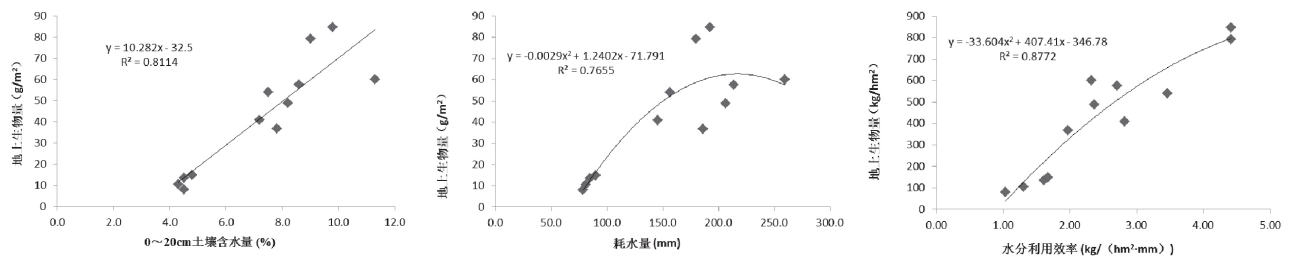


图2 地上生物量与土壤含水量、耗水量、水分利用效率的关系

用效率的角度来分析植被对降水的利用,利用水分利用效率与草地初级生产力之间的二次曲线关系,预测围栏封育草地生产力水平,为合理利用水草资源、修复草原生态提供依据。

参考文献:

- [1] 李博,雍世鹏,李瑶,等.中国的草原[M].北京:科学出版社,1990:59-61.
- [2] 姜立鹏,覃志豪,谢雯,等.基于MODIS数据的草地净初级生产力模型探讨[J].中国草地学报,2006,28(6):72-82.
- [3] 杨阳,韩国栋,李元恒,等.内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应[J].草业学报,2012,21(6):8-14.
- [4] 张娜,梁一民.黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究[J].草业学报,2002,11(2):72-78.
- [5] 王顺利,王荣新,敬文茂,等.祁连山干旱山地草地生物量对水分条件的响应[J].干旱区地理(汉文版),2017,40(4):772-779.
- [6] 方楷,宋乃平,魏乐,等.荒漠草原不同地形条件下土壤水分和地上生物量的时空分异[J].干旱区研究,2012,29(4):641-647.
- [7] 王萌,徐冰,张大勇,等.内蒙古草原锡林河流域植物群落生物量及多样性沿土壤水分含量梯度的变化[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(4):445-449.
- [8] Heisler-White J L, Knapp A K, Kelly E F. Heisler-White J. L. A. K. Knapp, and E. F. Kelly. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary production in a semi-arid grassland. *Oecologia*[J]. *Oecologia*, 2008, 158(1):129-140.
- [9] Chen F R, Cheng J M, Yu L N, et al. Effects of fencing and grazing on the biomass of typical steppe in the Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6):1079-1084.
- [10] 王国庆,杜广明,聂莹莹,等.我国围栏封育对群落特征影响的研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2017(13):75-77.
- [11] 张志华,李小雁,蒋志云,等.内蒙古典型草原区退耕方式对植物群落特征与土壤特性的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(3):74-80.
- [12] 闫玉春,唐海萍,辛晓平,等.围封对草地的影响研究进展[J].生态学报,2009,29(9):5039-5046.
- [13] 侯琼,魏学占,宋学峰.不同水分因子对内蒙古典型草原牧草产量的影响[J].草业科学,2009,26(2):5-10.
- [14] 陈佐忠,汪诗平.中国典型草原生态系统[M].北京:科学出版社,2000.
- [15] Kramer P J, Kozlowski T T. *Physiology of woody plants*[M]. London:Academic Press, 1979.443 ~ 444.
- [16] 刘文兆.作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系[J].自然资源学报,1998,23(1):23-27.
- [17] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, et al. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂[J]. *Science*, 2002, 298:1987-1990.
- [18] Ramakrishna R N, Charles D. K, Hirofumi H, et al. Climate driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300:1560.
- [19] 穆少杰,游永亮,朱超,等.中国西北部草地植被降水利用效率的时空格局[J].生态学报,2017,37(5):1458-1471.
- [20] 汪海霞,吴彤,禄树晖.我国围栏封育的研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2016(9):89-92.
- [21] 闫玉春,唐海萍.围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响[J].西北植物学报,2007,27(6):1225-1232.
- [22] 孙栋元,王辉,马仲武,等.干旱荒漠区封育沙地土壤水分变化研究[J].西北林学院学报,2007,22(2):49-53.
- [23] 程晓莉.草地荒漠化过程中植被、土壤及水分的动态耦合[D].南京:南京大学,2003.
- [24] 王京,高志娟,舒佳礼,等.黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播草地生产力与土壤水分利用研究[J].西北农业学报,2016,25(2):173-181.
- [25] 王海青,田育红,黄薇霖,等.不同灌溉量对内蒙古人工草地主要牧草产量和水分利用效率的影响[J].生态学报,2015,35(10):3225-3232.
- [26] 赵文智,牛最荣,常学礼,等.基于净初级生产力的荒漠人工绿洲耗水研究[J].中国科学:地球科学,2010(10):1431-1438.
- [27] Warren Webb, Stan Szarek, William Lauenroth,等.天然林、草原、荒漠生态系统的耗水量与初级生产力[J].陕西林业科技,1981(6).
- [28] 侯琼,魏学占,宋学峰.不同水分因子对内蒙古典型草原牧草产量的影响[J].草业科学,2009,26(2):5-10.
- [29] 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.