

DOI: 10.5846/stxb201301310206

侯向阳, 纪磊, 王珍. 荒漠草原与典型草原 NPP、碳积累对不同降雨年份和利用方式的响应. 生态学报, 2014, 34(21): 6256-6264.

Hou X Y, Ji L, Wang Z. Response of net primary productivity and C accumulation of plant communities in desert steppe and semiarid steppe with different land use types during two hydrologically contrasting growing seasons. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6256-6264.

荒漠草原与典型草原 NPP、碳积累 对不同降雨年份和利用方式的响应

侯向阳*, 纪 磊, 王 珍

(中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010)

摘要: 不同草原利用方式正在影响着内蒙古的草原生态系统, 而且在未来降水空间格局变化的背景下, 它们共同决定了生态系统植被类型、净初级生产力(NPP)和生态系统碳积累。选取内蒙古中部两个重要的草地类型: 荒漠草原和典型草原, 研究不同草原利用方式(围栏禁牧、划区轮牧、割草、自由放牧)植物群落在降雨量不同的两个生长季节地上(ANPP)、地下净初级生产力(BNPP)的变化, 同时也评估了植物群落的碳积累, 研究结果表明: 1) 在降雨量亏缺年份, 与围封相比, 荒漠草原自由放牧区ANPP、BNPP 及碳积累分别下降了 57.1%、51.7% 和 56.0%, 而典型草原自由放牧区分别下降了 18.4%、25.1% 和 17.9%。2) 在降雨量充足年份, 与围封相比, 荒漠草原划区轮牧区 ANPP、BNPP 以及碳积累分别增加了 18.2%、9.8% 和 21.9%, 而典型草原各处理下围封禁牧区 ANPP 仍是最高; 3) 两种草地类型下, 降雨量对自由放牧的调控作用高于其它草地利用方式; 4) 荒漠草原 ANPP 在丰雨年是欠雨年的 2 倍, 而典型草原仅增加了 79.0%, 降雨量对荒漠草原生产力的季节调控作用远高于典型草原。在未来全球气候变暖和降水格局变化的情况下, 荒漠草原降雨量是影响荒漠植物群落 NPP 和碳积累的主导因子。

关键词: 自由放牧; 划区轮牧; 围栏禁牧; 割草

Response of net primary productivity and C accumulation of plant communities in desert steppe and semiarid steppe with different land use types during two hydrologically contrasting growing seasons

HOU Xiangyang*, JI Lei, WANG Zhen

Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Hohhot 010010, China

Abstract: Climate change scenarios predict increases in temperature, changes in precipitation patterns and longer drought periods in most arid and semi-arid regions of the world. Land-use type changes are considered to be the dominant component of global change in terms of impacts on terrestrial ecosystems. Ecosystems in these regions are prone to land degradation, which may be aggravated by climate change. With a changing climate, the effect of different use types and the intensity of changes in the spatial patterns of precipitation will combine to determine ecosystem vegetation types, net primary productivity and C accumulation in the grassland ecosystems of Inner Mongolia, China. A field experiment with different land use types was conducted in two important grassland types in Inner Mongolia: desert steppe (a site in Sunite Banner) and typical steppe (a site in Baiyinxile Banner) to study the response of arid and semi-arid grasslands to different land-use types and precipitation. The change of above-ground net primary productivity (ANPP) and below-ground net primary productivity (BNPP) for each plant community was studied and C accumulation of the plant communities were also assessed

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(70933004); 内蒙古自然科学基金重大项目(2010ZD08); 科技部国际合作项目(2013DFR30760)

收稿日期: 2013-01-31; **网络出版日期:** 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: houxy16@126.com

for four different land use types 1) enclosure, 2) rotational grazing, 3) clipping and 4) grazing during two hydrologically contrasting growing seasons (a dry season and a wet season) both in a desert steppe and in a semiarid steppe. The results follow: 1) In the deficit precipitation year, compared with the enclosure, ANPP, BNPP and C accumulation decreased by 57.1%, 51.7% and 56.0% and by 18.4%, 25.1% and 17.9% under grazing in the desert steppe and the typical steppe, respectively; meanwhile, in the adequate precipitation year, compared with enclosure, ANPP, BNPP and C accumulation increased by 18.2%, 9.8% and 21.9% under rotational grazing in the desert steppe, respectively, whereas ANPP was still the highest in enclosure in the typical steppe; 2) Different grassland use types also have a significant effect on ANPP, BNPP and C accumulation. Compared with other use types, the grazing enclosure was a reasonable land use types both in desert and typical steppe to increase ANPP, BNPP and C accumulation; 3) The different grassland use types had different responses to the change of interannual precipitation. The effect of precipitation on grazing was higher than on other land use types in both the desert steppe and the typical steppe; 4) The ANPP in the wet year was twice that of the dry year in the desert steppe, but ANPP only increased by 79.0% in the wet year when compared with the dry year in the typical steppe. The impact of precipitation was larger on the desert steppe than on the semiarid steppe. ANPP, BNPP and C accumulation in arid and semiarid ecosystems are primarily limited by precipitation. A change of temporal and spatial patterns for precipitation plays an important role in determining ANPP, BNPP and C accumulation. Under future climate change scenarios, precipitation and grassland use types were the principal environmental factors affecting plant community net primary productivity and C accumulation in the arid and semi-arid steppe in northern China.

Key Words: grazing; rotational grazing; enclosure; clipping

全球气候变化影响并支配了陆地生态系统植被的组成、分布和生产力的变迁^[1]。天然草原是地球上第一大陆地生态系统,它对全球碳循环以及生态系统服务功能起着至关重要的作用^[2]。作为全球变化影响草原生态系统的两种重要因素,放牧利用方式和降雨量变化改变了草原植被的盖度、植物群落组成、生态系统碳蓄积,甚至整个生物地球化学循环过程^[3-4]。

放牧和割草作为人类管理利用草原生态系统的最主要的途径,是草原上常见的土地利用方式^[5-6]。大多数的研究表明,围栏禁牧有利于退化草地的恢复,但也有研究指出,长期的围栏禁牧不能提高草场的放牧利用价值,禁牧时间太长反而会引起群落初级生产力的下降,凋落物增加,抑制植物的再生以及幼苗的生长^[7]。过度放牧不仅会使植物群落覆盖度下降,物种多样性降低,而且也会造成群落生产力、植物群落固碳能力、土壤养分和持水能力的下降^[8-9]。合理的放牧制度如划区轮牧和季节畜牧业被视为有利于草原生态系统功能稳定的利用方式。近30年,连年的割草同样造成了草地植物群落的净初级生产力(NPP)的下降,草原出现了大面积的退化,生态环境恶化的问题变得日益突出^[10]。因此,

天然草原利用方式的改变,如放牧和割草对草原初级生产力、凋落物,土壤和生态系统的C、N含量等均会产生影响,而且也会对水热等环境条件产生影响。

气候的变化已经引起了全球和区域降水格局的变化^[11],因其变化而导致的干旱在全球各地频繁发生。由于降水空间格局的变化,植物的生理生态过程受到了严重的影响,作为草原生态系统响应气候变化的关键指标,NPP的季节动态变化与降雨量的年际波动呈现出显著的相关^[12]。近年来,国内外研究者对NPP与气候变化关系的报道较多^[13-17],但大多数仍基于一个草原类型的研究,而对不同草原类型之间比较的报道相对较少。因此,选取两个主要受降雨量限制的草地类型作为研究区。本文以不同利用方式为手段,对分别位于半干旱、干旱区的典型草原和荒漠草原在2010年和2012年两个降雨量不同年份的NPP和植物群落碳积累进行了研究,拟解决的关键问题有4个:(1)不同利用方式对植物群落NPP和碳含量的影响;(2)干旱年份不同利用方式对植物群落的NPP和碳含量的效应及机制;(3)降雨量充足的年份不同利用方式对植物群落的NPP和碳含量的效应及机制;(4)降雨年型和利用方式对草地影响的交互作用及意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

分别选取苏尼特右旗(荒漠草原, N42°16'45", E112°47'44", H1184 m)和锡林浩特市白音锡勒牧场(典型草原, N43°32'45", E116°40'30", H1250 m)作为野外试验地点。试验开展时间均为 2010 年和 2012 年植物生长季节(5—9 月, 降雨量不同的两年)。

苏尼特右旗地处荒漠草原区, 属于偏暖的半干旱气候, 年均温为 6.4 °C, 多年平均降雨量为 180.1 mm(1952—2009 年), 降雨量主要集中在 6—9 月。土壤为淡栗钙土。植被为短花针茅(*Stipa breviflora*) + 无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*) + 碱韭(*Allium polystachys*)。

白音锡勒牧场位于温带半干旱区典型草原, 地形为丘间平原, 土壤为暗栗钙土。本地区为温带半干旱大陆性气候, 年均温为 -0.4 °C, 多年平均降雨量为 313.2 mm(1952—2009 年), 主要集中在 7—9 月。植被类型属羊草(*Leymus chinensis*) + 大针茅(*Stipa grandis*) + 旱生杂类草的植物群落。

1.2 试验设计

在苏尼特右旗选取短花针茅天然草原作为试验区, 样地从 1999 年一直处于自由放牧状态。在地势相对平坦、植被均匀的地段设立试验处理, 分别设立不同草原利用方式处理, 分别为: 自由放牧、季节性放牧和围封禁牧。为达到科学试验设计统计上所有处理的可比较性和对等性, 采用完全随机区组设计, 将选取的短花针茅草原架设围栏, 设立区组与小区。共分 3 个区组, 每个区组随机分布 3 种不同草地利用方式处理, 共 9 个处理区。其中自由放牧小区仍保持当地放牧强度。围封样地处于无放牧状态, 季节性放牧采用划区轮牧周期(7d), 在 6—10 月分别进行为期一周的放牧。季节性划区轮牧与自由放牧区全年载畜率一致为 1.24 只/hm²。

在白音锡勒选取大针茅天然草原作为试验区, 选择有代表性的地段(地势平坦、植被均匀)作为试验区。同样, 为达到科学试验设计统计上所有处理的可比较性和对等性, 实验采用完全随机区组设计, 3 个处理: 自由放牧(从 1979 年后一直作为放牧利用), 割草(一年两次, 5 月和 8 月, 从 1999 年开始)

和围封(1999 年围封以来一直处于未利用状态)。每个处理 3 次重复, 共 9 个处理区。

1.3 数据采集

1.3.1 ANPP 的测定

在 2010 年和 2012 年, 对地上生物量进行测定。在每个样地中, 采用随机抽样法, 随机布设 6 个 1 m × 1 m 测产样方对其进行 5 月份的草产量测定。而同样在每个样地中(放牧开始前), 采用限定随机抽样法, 分别于每个放牧小区内设置活动围栏。苏尼特右旗每个小区设定 18 个活动围栏(1.5 m × 1.5 m), 在活动围栏设置 1 m × 1 m 测产样方分别对 6 月、7 月和 8 月份的草产量进行监测。白音锡勒在活动围栏内设置 6 个(放牧开始前)1 m × 1 m 测产样方对其进行 8 月份的草产量测定。采用齐地面剪割法, 用剪刀齐地面剪取植物地上部分, 分种采集, 在恒温箱 65 °C 下烘 48 h, 称取干重, 用于草地植物 ANPP 的计算。

1.3.2 BNPP 的测定

采用根系内生长法对地下净初级生产力进行测定。2010 年和 2012 年均在生长季节开始前(5 月初), 用根钻(8 cm)在每个处理小区内各随机选取 6 个点, 取 0—30 cm 土层。用 1 mm 的土壤筛将根从土壤中分离取走, 再把无根土回填到原来的土层中并对其进行标记。在每年的生长季节末期(9 月中下旬), 在原来标记的去根系的地方用内径 6 cm 的根钻进行同样的方法进行取样, 用 1 mm 土筛取出当年新长的根系。将根系清洗后装入纸袋, 65 °C 恒温下经 48 h 烘至恒重, 称其干重。通过得到的数据估算单位面积 BNPP。

1.3.3 碳积累评估

生态系统净初级生产力(NPP)=地上净初级生产力(ANPP)+地下净初级生产力(BNPP)。在计算植物群落碳的积累量计算式, 取 45% 作为植株与根系的平均有机碳的含量^[18-19]。

1.4 数据分析

1952—2009 年降雨量与温度数据来源于国家气象局。采用 SAS9.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) 对数据进行统计分析。

2 结果和分析

2.1 微气候的变化

两个地方季节温度变化呈现单峰变化特征, 峰

值均出现在每年的7月份,而在每年的植物返青期和植物枯黄期温度稍低(图1)。两个地方的季节降雨量呈现不一致的变化。苏尼特右旗:2010年降雨量的峰值出现在8月份(63.1 mm),而2012年7月份的季节降雨量最高(166.6 mm);两个生长季节积累的降雨量分别为138.6 mm(2010年)和278.5 mm(2012年)(图1);相比长期的生长季节平均年降雨量(MAP,1952—2009年)180.1 mm,2010年总的生长季节降雨量比长期降雨量降低了23.1%,而2012

年总的生长季节降雨量比长期降雨量提高了54.6%。白音锡勒:2010年降雨量的峰值出现在5月份(96 mm),而2012年7月份的降雨量在整个生长季节最高(178.1 mm);两个生长季节积累的降雨量分别为250.9 mm(2010年)和403.3 mm(2012年)(图1);相比1952—2009年平均年降雨313.2 mm,2010年总的生长季节降雨量比长期降雨量降低了19.9%,而2012年增加了28.7%。

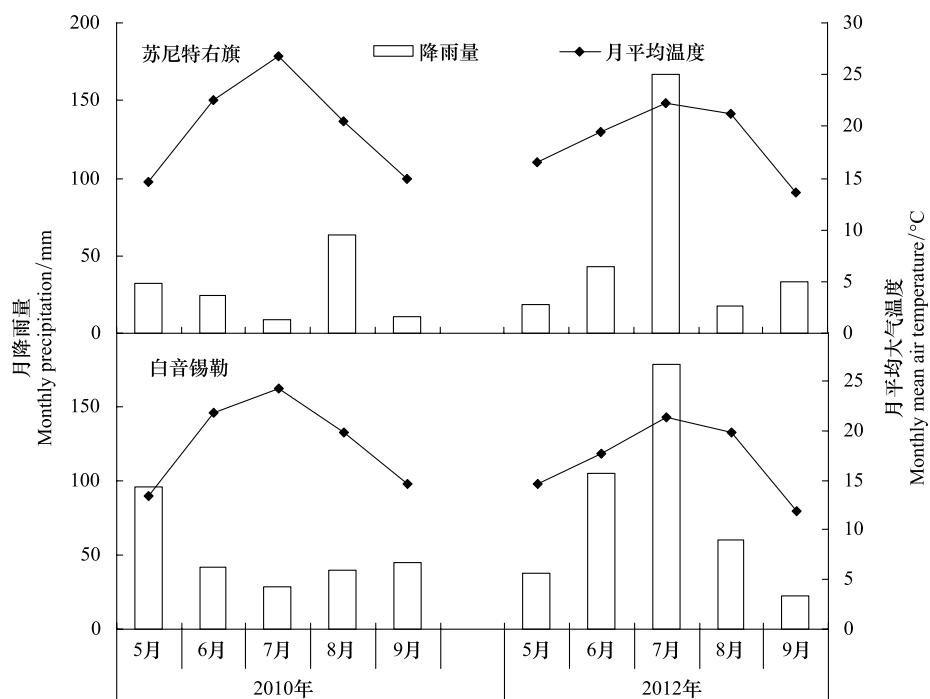


图1 2010年和2012年苏尼特右旗和白音锡勒月降雨量(柱子)和月平均气温(线)

Fig.1 Monthly precipitation (bars) and monthly mean air temperature (line) at Xisu Banner and Baiyinxile in 2010 and 2012

2.2 不同年际间的ANPP、BNPP和碳积累的变化

在2种草原类型中,以降雨量为主要差异的年份、草原不同利用方式以及交互作用都对返青期和生长高峰期ANPP、BNPP和群落碳积累产生了显著性影响($P < 0.05$,表1)。两种草原类型的各项指标的变化为:苏尼特右旗(荒漠草原)的丰雨年生长高峰期ANPP、BNPP和碳积累显著高于欠雨年,分别为5.1、3.7和3.7倍(表1)。荒漠草原生态系统中,ANPP、BNPP和碳积累,围封禁牧处理显著高于自由放牧,除返青期ANPP,划区轮牧也与自由放牧有显著性差异。其各指标在植物生长旺盛期变化顺序均是围封禁牧>划区轮牧>自由放牧;白音锡勒(典型草原)的各处理下差异显著,在降雨量充足的年份生长旺盛期ANPP、BNPP和碳积累是欠雨年份的

1.5—1.7倍。各项指标在生长旺盛期不同利用方式下的变化顺序均为围封禁牧>割草>自由放牧(表1);不同利用方式下,两种草原类型植物返青期不一致,即返青期的ANPP只有荒漠草原生态系统中表现为显著性差异($P < 0.05$,表1),而白音锡勒不同利用方式各指标的变化方式一致。

2.3 不同利用方式下植物群落ANPP、BNPP和植物群落碳积累的变化

苏尼特右旗-干旱的2010年:相比于自由放牧和划区轮牧,围栏禁牧区ANPP的季节动态在每个月份均最高(图2);各处理下的ANPP在9月份均最高,其变化顺序为围封禁牧(80.19 g/m^2)>划区轮牧(42.77 g/m^2)>自由放牧(32.42 g/m^2)。湿润的2012年:ANPP的变化呈单峰变化趋势,峰值出现在

8月份,而在植物生长初期和枯黄期值最低(图2);除8月份,其它月份围封禁牧区的ANPP均是最高,8月份的ANPP的变化顺序为划区轮牧(231.40

g/m^2)>围封禁牧(189.23 g/m^2)>自由放牧(175.99 g/m^2)(图2)。

表1 不同利用方式对苏尼特右旗和白音锡勒植物返青期和生长旺盛期地上净初级生产力(g/m^2),BNPP和植物群落碳积累的影响

Table 1 Effect of different land use types on above-ground net primary productivity in early period of plant growth and growing season, BNPP and plant community C accumulation in Sunite Banner and Baiyinxile

利用方式 Land use type	苏尼特右旗 Sunite Banner				白音锡勒 Baiyinxile			
	返青期 Early growing season	生长旺季 Growing season	地下净 初级生产力 BNPP	碳积累 Carbon accumulation	返青期 Early growing season	生长旺季 Growing season	地下净 初级生产力 BNPP	碳积累 Carbon accumulation
自由放牧 Grazing	5.9b	96.1b	605.3b	319.3b	29.1b	239.8b	1475.3b	771.8c
划区轮牧 Rotational grazing	5.0b	129.1a	757.7a	402.7a				
围封禁牧 Enclosure	26.8a	131.3a	796.4a	419.0a	28.1b	293.8a	1795.5a	940.2a
割草 Clipping					40.0a	248.9b	1741.4a	895.6b
2010	6.2b	38.8b	305.4b	160.7b	33.0a	196.8b	1344.6b	693.6b
2012	18.9a	198.9a	1134.3a	599.9a	31.8a	324.9a	1996.8a	1044.8a
	方差分析 ANOVA				$P>F$			
处理 Treatment	<0.001	0.002	<0.001	<.0001	<0.001	0.003	<0.001	<.0001
年 Year	<0.001	<0.001	<0.001	<.0001	0.473	<0.001	<0.001	<.0001
处理×年 Treatment × Year	<0.001	<0.001	<0.001	<.0001	0.063	0.286	<0.001	<.0001

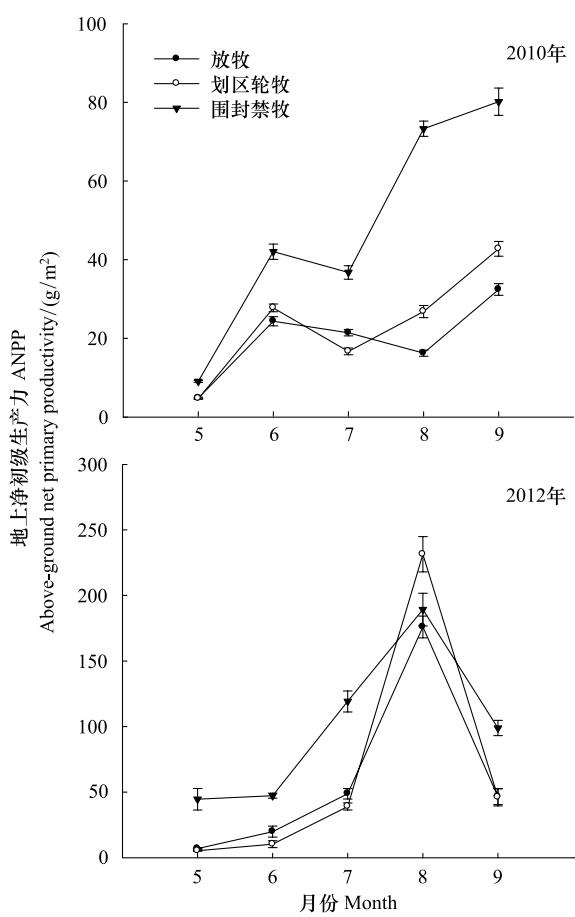


图2 苏尼特右旗不同利用方式下地上净初级生产力的月变化
Fig.2 The change of above-ground net primary productivity under different land use types at Sunite Banner

干旱年份,围封禁牧区BNPP最高(450.2 g/m^2),自由放牧区的BNPP最低(217.0 g/m^2 , $P < 0.05$,图3);而湿润年份,划区轮牧的BNPP最高(1266.5 g/m^2),自由放牧区的BNPP最低(993.7 g/m^2 , $P < 0.05$,图3)。干旱与湿润年份植物群落的碳积累量与BNPP呈现一直变化的规律,即干旱年份围封禁牧区的碳积累量最高($238.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),而湿润年份划区轮牧区的碳积累量最高($674.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,图3)。

荒漠草原不同利用方式下草原NPP与碳积累干旱年份和湿润年份响应不同:1)自由放牧区的ANPP变化幅度最大,其增加了9.83倍,而割草区的BNPP和碳积累增加的倍数最高,在湿润年份比干旱年份分别提高了4.08和4.43倍;2)各处理下,围封禁牧的ANPP、BNPP和碳积累的变化幅度最小,分别增加了1.58、1.53和1.54倍(图2,图3)。

白音锡勒干旱的2010年:在植物返青期的5月份,割草区ANPP最高(39.2 g/m^2 , $P < 0.05$),而在植物生长旺盛的8月份,围封禁牧区的ANPP最高(219.8 g/m^2 , $P < 0.05$,图4)。湿润的2012年:同样在植物刚开始生长的5月份,割草区的ANPP最高(40.7 g/m^2 , $P < 0.05$),而在植物生长旺盛的8月份,其各处理下ANPP的变化顺序为围封禁牧

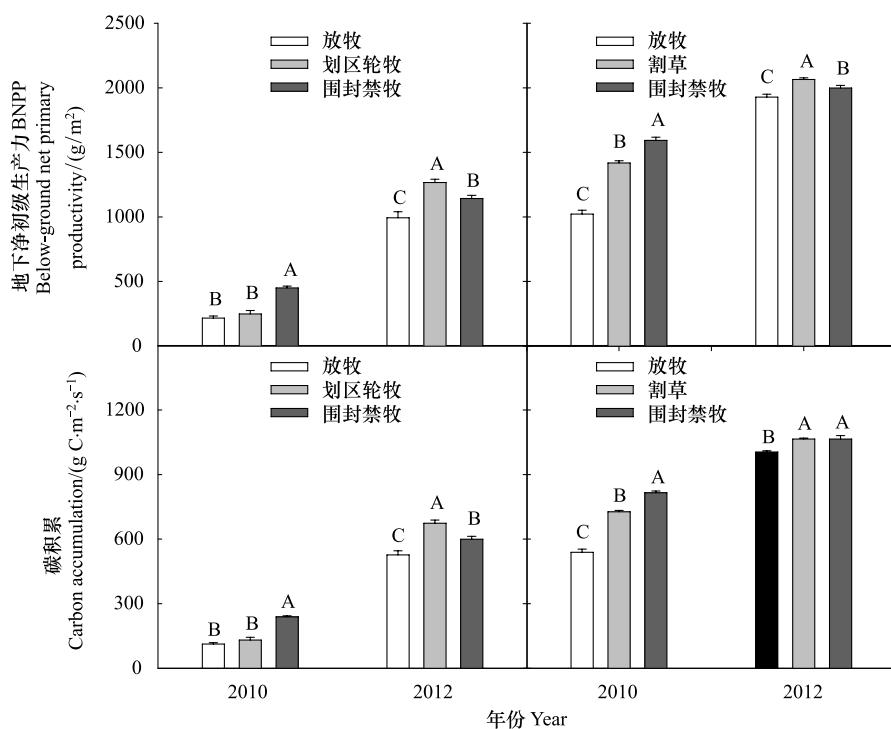


图3 不同利用方式对苏尼特右旗与白音锡勒植物群落 BNPP 和碳积累的影响

Fig.3 The change of below-ground net primary productivity (BNPP) and plant community C accumulation under different land use types in growing season at both Sunite Banner and Baiyinxile

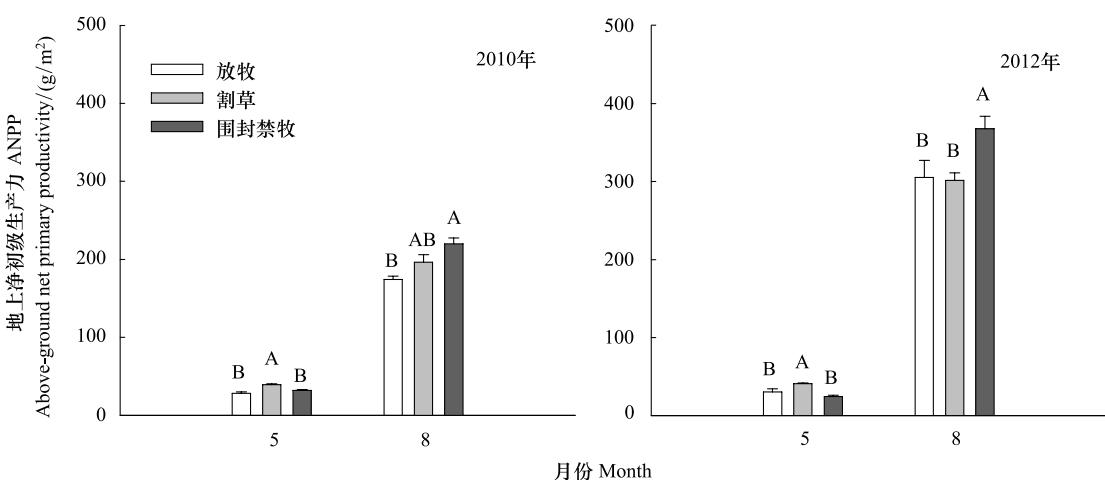


图4 不同利用方式对白音锡勒植物生长初期和生长旺盛期地上净初级生产力的变化

Fig.4 The change of above-ground net primary productivity under different land use types in early period of plant growth and growing season in Baiyinxile

(367.8 g/m^2) > 自由放牧 (305.0 g/m^2) > 割草 (301.5 g/m^2) ($P < 0.05$, 图 4)。干旱年份 BNPP 的变化趋势为围封禁牧 (1592.9 g/m^2) > 割草 (1418.7 g/m^2) > 自由放牧 (1022.3 g/m^2)，而湿润年份的变化规律为割草 (2064.1 g/m^2) > 围封禁牧 (1998.0 g/m^2) > 自由放牧 (1928.3 g/m^2)，($P < 0.001$, 图 3)。干旱年份植物群落的碳积累变化规律与 BNPP 的变

化规律一致，即围封禁牧 ($815.7 \text{ g Cg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 割草 ($726.7 \text{ g Cg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 自由放牧 ($538.4 \text{ g Cg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)，而湿润年份植物群落的碳积累量在割草和围封禁牧区无显著差异，自由放牧区的碳积累量仍是最低 ($P < 0.001$, 图 3)。

典型草原不同利用方式下草原 NPP 与碳积累干旱年份和湿润年份响应不同：1) 自由放牧区的

ANPP、BNPP 及碳积累的变化幅度最大,其分别增加了 0.75,0.88 和 0.87 倍;2)割草区 ANPP 增加的倍数最低(0.54 倍),而 BNPP 和碳积累在围封禁牧区增加倍数最低,分别为 0.25 和 0.31 倍(图 3,图 4)。

3 讨论

3.1 不同利用方式的影响

草原利用方式(放牧、割草等)、环境因子的干扰(火灾、干旱等)以及环境条件(气候条件、土壤类型等)都会对草原生态系统 NPP 以及碳积累产生影响^[20-21]。

本研究中,两种草原类型的 ANPP、BNPP 和碳积累量在自由放牧处理下均最低,表明放牧导致了植物群落的退化。任海彦等研究表明,过度放牧显著改变了植物群落资源分配策略,植物群落的功能性状发生改变,植物个体地上部分趋于矮小化,从而导致了植物群落生态系统结构及功能发生衰退^[22]。这一结论在本研究中亦得到证实,自由放牧情况下,植物群落在自由放牧区其 BNPP/ANPP 的值显著高于其它草原利用方式,说明植物为了适应长期放牧干扰,提高耐牧性,将更多的营养物质分配在地下,提高资源的吸收,使其对外界环境表现出表型可塑性的变化^[23]。

Ojima 等^[24]的研究认为,围封禁牧条件下植被得以恢复,凋落物在地表的积累影响了土壤温度和土壤水分,进而影响了凋落物的分解速率,从而影响了碳循环,适当的放牧可以减少草地碳的排放,增加土壤碳的储存。无论怎样,何念鹏等研究认为^[25],长期禁牧显著提高了温带草原的碳储量,温带草原具有巨大的碳固持能力,但随着生态系统的恢复过程,其固碳能力会逐渐下降,并最终达到一个平衡状态,即草原生态系统处于弱的碳源-碳汇相互转化状态,这种转化过程和强度主要受到降雨量的控制^[26]。在本研究中,与其它草原利用方式相比(割草、自由放牧和划区轮牧),在两种草原类型下围栏禁牧方式是各利用方式下相对好的草原保护模式。围栏禁牧和其它利用方式生物量的差异与围栏有密切的关系。围栏禁牧有效地控制了牲畜对植物的采食与践踏,促进了植物生长,增加了植物的高度以及群落的盖度,同时,土壤的营养以及土壤水分的涵养也得以提高,植物的光合作用增加,从而促使了围栏

禁牧区地上、地下生产力以及碳积累的增加。同时,本试验的研究结果也只是强调围栏禁牧具有巨大的固碳能力,但并未对围栏禁牧后的草地固碳过程以及未来发展趋势进行揭示。本研究连同 MacNeil^[27]的研究一致认为利用方式通过改变群落生产力状况从而影响了草原生态系统碳的积累。

3.2 降雨量的影响

不同利用方式对草原植被的影响主要体现在草原植物群落的生产力上^[28],但在干旱与半干旱的草原生态系统中,大多数情况下,水分是控制植物群落初级生产力的主要驱动力,是最重要的限制性资源^[29-31]。

胡中民等的研究认为,降雨量与草原生态系统生产力存在密切关系,随着年均降雨量的增加,内蒙古温带草原生态系统 ANPP 呈指数增加的趋势^[29],BNPP^[30]以及碳积累^[18]也呈明显增加的趋势。同样,Huxman 等也指出,NPP 随年度降雨量增加呈显著的线性增加趋势^[32]。本研究表明,内蒙古的两种草原类型 NPP 呈现非线性的变化,NPP 与碳积累的变化幅度高于生长季降水量的变幅。在半干旱(白音锡勒)和干旱区(苏尼特右旗),生长季降雨量的增加对 ANPP 的增加作用高于年度降雨量的降低对 ANPP 带来的负面影响。而且,降雨量也对两种草原碳储量的调控起着积极的作用^[25-26]。苏尼特右旗,在 2010 年生长季节积累的降雨量为 138.6 mm,其地上部分生产力仅为 32.6 g/m²;而在 2012 年积累的降雨量为 278.5 mm,其降雨量相比干旱年份增加了将近 2 倍,但 ANPP 在提高降雨量的情况下提高超过了 5 倍(179.96 g/m²)。同样,对于 BNPP 和碳积累量增加倍数都高于降雨量的增加倍数。白音锡勒,2012 年生长季节降雨量比 2010 年增加了 60.7%,而生长季节的植物 ANPP 在 2012 年比 2010 年增加了 79.0%,同样季节 ANPP 的增长量高于对生长季节降雨的积累量。一些研究也证实我们的研究结果,如 Sherry 通过模拟降雨量试验对北美高草草原的进行了研究,其研究结果发现在降雨量双倍增加的干旱年份,植物群落的 ANPP 呈现显著增加的趋势,而在降雨量相对充足年份其影响不太显著^[33],其变化也是呈非线性的变化。相似的研究结果在 Peñuelas 等^[34]得到证实。因此,无论线性还是非线性的变化,降雨量变化对水分受限的干旱与半干旱草地生

态系统产生了深刻的影响。

本研究中,尽管放牧对植物群落产生了负面影响,但降雨量对放牧有明显的调控作用。对干旱、湿润年份不同利用方式下草原 NPP 与碳积累的研究发现:在干旱年份,自由放牧以及划区轮牧对荒漠草原产生负面影响,而在降雨量充足的 2012 年,荒漠草原则区轮牧的地上、地下生产力以及碳积累均最高,且自由放牧区的生产力也显著增加。同样,干旱的 2010 年,自由放牧以及割草对典型草原有负面影响,而在降雨量充足的年份,白音锡勒的放牧与割草区的生产力也显著提高。降雨量起着对草地 NPP 以及碳积累起着极其重要的作用,尤其对于荒漠草原,植物处于亚健康的状态,降雨量促进了植物的生长。本文证实,在降雨量充足的情况下,割草、放牧等不同利用方式对草原生态系统 NPP 和碳积累的影响逐渐减小。此外,吴孝兵研究认为草原载畜率与地上生物量呈正相关关系^[35],而降雨量对地上生物量有明显的调控作用,即在降雨量高的年份,草原草产量的增加导致了牧民的牲畜数量明显增加;而在降雨量少的年份,牧草的生长期缩短,草原植物群落中劣质牧草,杂草以及毒草的比例明显增加,导致了牧草产量和品质下降,这直接影响草原的畜牧业生产^[36],同样牧民在草原上投入牲畜头数量也相应的减少。因此,本研究强调不同利用方式以及降雨量共同制约了草原生态系统的 NPP 和碳积累。

References:

- [1] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report Climatic Change: The Physical Science Basis. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [2] Hall D O, Scurlock J M O, Ojima D S, Parton W J. Grasslands and the global carbon cycle: modeling the effects of climate change // The Carbon Cycle. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 102-114.
- [3] Zhang C H, Wang M J, Wu L B T E, Jiang Y H. Responses of ANPP to climate change in Inner Mongolia Typical Steppe-a Simulation study. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(6): 1229-1237.
- [4] Long H L, Li X B, Huang L M, Wang H, Wei D D. Net primary productivity in grassland ecosystem in Inner Mongolia and its relationship with climate. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(7): 781-791.
- [5] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, Wang Y S, Li Y N, Zhao X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(2): 237-243.
- [6] Li G Y, Sun S C. Plant clipping may cause overestimation of soil respiration in a Tibetan alpine meadow, southwest China. *Ecological Research*, 2011, 26(3): 497-504.
- [7] Zuo W Q, Wang Y H, Wang Y F, Shi G X. Effects of enclosure on the community characteristics of *Leymus chinensis* in degenerated Steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 12-19.
- [8] Garibaldi L A, Sembrat M, Chaneton E J. Grazing-induced changes in plant composition affect litter quality and nutrient cycling in flooding Pampa grasslands. *Oecologia*, 2007, 151(4): 650-662.
- [9] Sembrat M, Garibaldi L A, Chaneton E J. Grazing history effects on above-and below-ground litter decomposition and nutrient cycling in two co-occurring grasses. *Plant and Soil*, 2008, 303(1/2): 177-189.
- [10] Tong C, Wu J, Yong S, Yang J, Yong W. A landscape-scale assessment of steppe degradation in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(1): 133-149.
- [11] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Willimas D D, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Rebecca Shaw M, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [12] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, Knight R W, Jamason P F, Hennessy K J, Suppiah R, Page C M, Wibig J, Fortuniak K, Razuvayev V N, Douglas A, Forland E, Zhai P M. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climate Change*, 1999, 42(1): 243-283.
- [13] Li Y P, Yang T B. Wavelet analysis on annual mean temperature and rainfall change of Qaidam Basin during last 50 years. *Arid Land Geography*, 2007, 30(5): 708-713.
- [14] Pu Z C, Zhang S Q, Li J L. Facts and features of climate change into warmth and damp in the Tianshan Mountains area in the recent 36 years. *Arid Land Geography*, 2008, 31(3): 409-415.
- [15] Bahn M, Knapp M, Garajova Z, Pfahringer N, Cernusca A. Root respiration in temperate mountain grasslands differing in land use. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 995-1006.
- [16] Garbulsky M F, Peñuelas J, Papale D. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(2): 253-267.
- [17] Edwards E J, Benham D G, Marland L A, Filter A H. Root production is determined by radiation flux in a temperate grassland community. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 209-227.
- [18] Hou X Y, Xu H H. Research on carbon balance of different grazing systems in *Stipa breviflora* desert steppe. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 3007-3015.
- [19] Li L H, Li X, Bai W M, Wang Q B, Yan Z D, Yuan Z Y, Dong Y S. Soil carbon budget of a grazed *Leymus chinensis* steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(3): 312-317.
- [20] Collins S L, Smith M D. Scale-dependent interaction of fire and grazing on community heterogeneity in tallgrass prairie. *Ecology*,

- 2005, 87(8): 2058-2067.
- [21] Hobbs N T, Schimel D S, Owensby C E, Ojima D S. Fire and grazing in the tallgrass prairie: contingent effects on nitrogen budgets. *Ecology*, 2006, 72(4): 1374-1382.
- [22] Ren H Y, Zheng S X, Bai Y F. Effects of grazing on foliage biomass allocation of grassland communities Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1065-1074.
- [23] Weiher E, van der Werf A, Thompson K, Roderick M, Garnier E, Eriksson O. Challenging theophrastus: a common core list of plant traits for functional ecology // 41st Symposium of the International Association for Vegetation Science. Uppsala, Sweden, 1998: 609-620.
- [24] Ojima D S, Driks B O M, Gleevn E P, Owensby C E, Scurlock J O. Assessmenr of C budget for grasslands and dry lands of the world. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70(1/4): 95-109.
- [25] He N P, Han X G, Yu G R. Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4270-4276.
- [26] Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, Huang X Z, Cui X Y, Zhou X Q, Niu H S. CO₂, H₂O and energy exchange of an Inner Mongolia steppe ecosystem during a dry and wet year. *Acta Oecologica*, 2008, 33(2): 133-143.
- [27] MacNeil M D, Haferkamp M R, Vermeire L T, Muscha J M. Prescribed fire and grazing effects on carbon dynamics in a northern mixed-grass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 127: 66-72.
- [28] 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. *Advances in Agronomy*, 2007, 94(6): 238-280.
- [29] Hu Z M, Fan J W, Zhong H P, Yu G R. Spatiotemporal dynamics of aboveground primary productivity along a precipitation gradient in Chinese temperate grassland. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(5): 754-764.
- [30] Ma W H, Yang Y H, He J S, Zeng H, Fang J Y. Above- and belowground biomass in relation to environmental factors in temperate grasslands, Inner Mongolia. *Science in China (Series C): Life Sciences*, 2008, 51(3): 263-270.
- [31] Chen J, Wang Y H. Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 6925-6935.
- [32] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinnig S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [33] Sherry R A, Weng E, Arnone III J A, Johnson D W, Schimel D S, Verburg P S, Wallace L L, Luo Y Q. Lagged effects of experimental warming and doubled precipitation on annual and seasonal aboveground biomass production in a tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2923-2936.
- [34] Peñuelas J, Gordon C, Llorens L, Nielsen T, Tietema A, Beier C, Bruna P, Emmett B, Estiarte M, Gorissen A. Nonintrusive field experiments show different plant responses to warming and drought among site, seasons, and species in a north-south European gradient. *Ecosystems*, 2004, 7(6): 598-612.
- [35] Wu X B. Grassland animal husbandry and disastrous weather. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2001, (3): 24-26.
- [36] Yan L D, Zhang G S, Li F X. The climatic mode of natural herbage yield formation on northern pasture of China. *Pratacultural Science*, 2003, 20(7): 8-11.

参考文献:

- [3] 张存厚, 王明玖, 乌兰巴特尔, 姜新华. 内蒙古典型草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟. *西北植物学报*, 2012, 32(6): 1229-1237.
- [4] 龙慧灵, 李晓兵, 黄玲梅, 王宏, 魏丹丹. 内蒙古草原生态系统净初级生产力及其与气候的关系. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 781-791.
- [7] 左万庆, 王玉辉, 王玉凤, 师广旭. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究. *草业学报*, 2009, 18(3): 12-19.
- [13] 李远平, 杨太保. 柴达木盆地近 50 年来年气温、降水的小波分析. *干旱区地理*, 2007, 30(5): 708-713.
- [14] 普宗朝, 张山清, 李景林. 近 36 年天山山区气候暖湿变化及其特征分析. *干旱区地理*, 2008, 31(3): 409-415.
- [18] 侯向阳, 徐海红. 不同放牧制度下短花针茅荒漠草原碳平衡研究. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 3007-3015.
- [19] 李凌浩, 李鑫, 白文明, 王其兵, 闫志丹, 袁志友, 董云社. 锡林河流域一个放牧羊草群落中碳素平衡的初步估计. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 312-317.
- [22] 任海彦, 郑淑霞, 白永飞. 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1065-1074.
- [25] 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. *生态学报*, 2011, 31(15): 4270-4276.
- [29] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 于贵瑞. 中国温带草地地上生产力沿降水梯度的时空变异性. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2006, 36(12): 1154-1162.
- [30] 马文红, 杨元合, 贺金生, 曾辉, 方精云. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系. *中国科学 (C 辑): 生命科学*, 2008, 38(1): 84-92.
- [31] 陈军, 王玉辉. 1956-2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局. *生态学报*, 2012, 32(22): 6925-6935.
- [35] 吴孝兵. 草原畜牧业与灾害性天气. *当代畜牧*, 2001, (3): 24-26.
- [36] 颜亮东, 张国胜, 李风霞. 我国北方牧区天然牧草产量形成的气候模式. *草业科学*, 2003, 20(7): 8-11.