

黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的 生物量与水分利用效率

徐炳成, 山 仑, 李凤民*

(中国科学院 水利部 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:加强优良引种禾草植物的生态适应性研究对促进我国黄土高原半干旱区草地建设和草业科学发展具有十分重要的意义。比较研究了引种禾草柳枝稷(*Panicum virgatum*)在黄土丘陵半干旱区不同立地条件下地上生物量的大小和季节累积差异及其水分利用特征。2001~2002年川地柳枝稷草地地上生物量达13 000~16 000 kg/hm²,山地梯田和坡地为2300~2650 kg/hm²。不同立地条件柳枝稷返青后的生物量累积过程呈二次或三次多项式。柳枝稷的绝对生长速率(AGR)在整个生长季内呈双峰曲线变化,川地柳枝稷草地的现存量和总量AGR最大值分别为158.93和169.83 kg/(hm²·d),梯田分别为27.31和38.25 kg/(hm²·d),坡地为37.0和36.69 kg/(hm²·d)。坡地柳枝稷生物量较大值和AGR最大值出现时间最早。不同立地柳枝稷生物量相对生长速率(RGR)在整个生长季内呈双峰曲线变化,均以返青后的20d内最大,平均AGR以川地最大,坡地和梯田相近,但坡地两峰值高于梯田。不同立地柳枝稷草地土壤水分主要利用层次为0~2m,月平均含水量顺序为梯田>坡地>川地。川地柳枝稷叶片和整体生物量水分利用效率均最高,梯田整体生物量水分利用效率大于坡地,但二者叶片水分利用效率相近。川地和山地地表下5cm生育期平均地温均为17.60℃,但4~5月份川地地温高出山地1.2~2.8℃,川地4~10月份平均气温较山地高1.5℃,这些差异影响不同立地条件柳枝稷草地水分利用和生长进程。

关键词:柳枝稷;生物量;生长速率;水分利用;立地条件;黄土丘陵区

文章编号:1000-0933(2005)09-2206-08 中图分类号:Q948,S812.2,S813.9 文献标识码:A

Aboveground biomass and water use efficiency of an introduced grass, *Panicum virgatum*, in the semiarid loess hilly-gully region

XU Bing-Cheng, SHAN Lun, LI Feng-Min* (State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2206~2213.

Abstract: The eco-adaptability of an introduced grass species is important for its grassland construction in the semiarid conditions on the Loess Plateau. Maximum biomass yield, absolute growth rate (AGR) and relative growth rate (RGR), soil water seasonal dynamics, and water use efficiency (WUE) in switchgrass (*Panicum virgatum*), an introduced grass species were compared among lowland, terrace land and slope land during 2001~2002 at semiarid loess hilly-gully region in Ansai, Shaanxi province. The aboveground dry biomass was 13 000~16 000 kg/hm² for lowland and 2300~2650 kg/hm² for hilly area in 2001 and 2002. By using the functional method of growth analysis, the quadratic formula of $Y = aT^2 + bT + c$ and cubic formula of $Y = aT^3 + bT^2 + cT + d$ were fitted to aboveground biomass accumulation (Y) and growth days after turning green (T). The seasonal AGR changes of switchgrass at each habitat were double-apex curves. Maximum AGR of standing and total

基金项目:中国科学院“百人计划”择优支持资助项目;国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011708);中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿资助项目

收稿日期:2004-10-03;修订日期:2005-03-20

作者简介:徐炳成(1973~),男,安徽肥东人,博士,主要从事牧草植物生产力与生态适应性研究。E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fmli@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The “Hundred-Talents Program” of Chinese Academy of Sciences (CAS), State key basic research and development plan of China (No. G1999011708) and the knowledge innovation project of Institute of Soil and Water Conservation, CAS

Received date: 2004-10-03; Accepted date: 2005-03-20

Biography: XU Bing-Cheng, Ph. D., mainly engaged in grass productivity and eco-adaptability. E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

biomass were 158.93 and 169.83 kg/(hm²·d) for lowland 27.31 and 38.25 kg/(hm²·d) for terrace, and 37.0 and 36.69 kg/(hm²·d) for slope land. The appearance of highest biomass and AGR was earliest in slope land among the three habitats. The highest RGR stage was within 20 days after turning green at each habitat, and seasonal averaged RGR of lowland was the highest. The soil layer deep up to 2m was the main water use layer of switchgrass, and average soil water content was in the order of terrace>slope land>lowland. Daily leaf and biomass WUE of lowland were significantly higher than slope land and terrace, and biomass WUE of slope land was higher than terrace, but their daily leaf WUE was close. Soil temperature 5 cm underground during growth season of hilly area was about 1.2~2.8°C higher than lowland area, although the averaged soil temperature was all 17.60°C. The air temperature during the growth season at the hilly area was about 1.5°C lower than the lowland. These differences affected growth course and water use of switchgrass at various habitats.

Key words: *Panicum virgatum*; biomass; growth rate; water use; habitat; loess hilly-gully region

黄土丘陵半干旱区在多年的人工草地建设中,禾本科牧草栽培品种尤为单一,迫切需要加强对优良禾草栽培种的选育研究^[1]。从国外和其它地区引种优良禾草不仅可以丰富和拓宽该地区的牧草种质资源,也是发挥区域生产潜力的重要措施。但从目前黄土丘陵区多年的牧草引种来看,大面积成功的范例很少,多数是小范围和局限性的,其原因是引种的禾本科牧草植物多数为中生、高产类型,而黄土丘陵区的生境条件宜于旱生和中旱生禾草的生长^[2]。因此,加强对引种禾草生产力和生态适应性研究,对黄土高原半干旱区植被建设和发展草地畜牧业具有重要意义。

柳枝稷(*Panicum virgatum*)为禾本科黍属多年生暖季型丛生草本,在北美、中美洲等地区广泛分布^[3]。由于生产力高,根系发达,植株较高,既可作为饲草,也可作为水土保持和风障植物,同时也是很好的生物燃料和生产替代能源的原材料^[4]。柳枝稷被引种到半干旱黄土丘陵的陕北安塞,表现出抗旱、耐寒和产草量较高等优势,作为优良的引种禾本科饲草,目前对其生物学特性、生产力年际变化和营养成分进行过一定的研究^[1],但就不同立地条件下草地生产力形成过程、限制和影响生产力提高的因素等大部分问题仍然认识不足。本文通过比较不同立地条件下柳枝稷草地生产力形成过程、土壤水分利用和光合等生态特征,阐明柳枝稷对半干旱黄土丘陵区生境条件的适应特点,以期这一优良禾草的合理栽培和利用提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地自然概况

本研究在中国科学院安塞水土保持综合试验站进行。该站位于陕西省延安市安塞县境内,地理位置为 109°19'23"E,36°51'30"N,海拔高度 1068~1309m。气候属暖温带半干旱气候,年平均气温 8.8°C,最冷的 1 月份平均温度为-6.9°C,最热的 7 月份平均气温 22.6°C,全年≥10°C 积温 3113.9°C,无霜期 159d。植被区划上属森林草原区,灌木呈零星分布,天然植被已遭全部破坏,形成以中旱生草本植物群落占绝对优势的次生植被/退化草地。主要土壤类型为黄绵土,约占总面积的 77.1%。

该地多年平均降水量 537.7 mm(1951~2000 年),其中 4~10 月份降水量约占全年总降水量的 85%~95%,7~9 月份降水量约占 60%~80%^[5]。本试验期间 2001 年和 2002 年降水量分别为 515.2mm 和 541.1mm,其中 2001 年 4~10 月份和 7~9 月份降水量分别占全年的 93.0%和 68.15%,2002 年分别为 94.18%和 40.89%。2001 年降水量季节分配接近常年,2002 年降水量与常年接近,但 7~9 月份降水偏少。

1.2 试验样地设置

本研究柳枝稷草地于 1995 年 7 月播种,旱作,无灌溉和地表来水。分 3 种立地条件:川地、梯田(为 1990 年修建)和坡地。川地播种面积 4×10 m²,坡地和梯田播种面积为 5×20 m²。川地和梯田为条播,行距 70cm,东西走向。坡地坡度 34°,东向坡,等高种植,行距 70 cm。川地、梯田和坡地海拔高度分别为 1 070 m,1 220 m 和 1 200 m。

根据多年观测,柳枝稷在该地区一般于 4 月初返青,5 月分蘖,6 月份拔节、孕穗,7~8 月份抽穗、开花和结实,9 月上旬种子成熟。山地生育期较川地晚 2~5d,第 3 年进入生产力高峰期^[1]。2002 年川地柳枝稷 4 月 8 日返青,坡地和梯田为 4 月 10 日。

1.3 测定项目及方法

2001 和 2002 年每年 4~10 月每月 1 次烘干法测定土壤含水量,0~200 cm 每 10 cm 土层取样 1 次,200 cm 以下每 20 cm 取样 1 次,生长期始末测定深度 300 cm,生长中期测定深度为 200 cm。坡地测定点选择在生长均匀的中部。

样方收获法(1m×1m)测定地上生物量,3~5 次重复,刈割时留茬 3cm,分现存生物量和枯落物,80°C 烘干至恒重。全部生物量指地上生物量与枯落物之和。

生物量绝对和相对累积速率分别按照下式计算,绝对生长速率 $AGR = (W_{i+1} - W_i) / (T_{i+1} - T_i)$,相对生长速率 $RGR = (\ln(W_{i+1}) - \ln(W_i)) / (T_{i+1} - T_i)$ ^[6],其中 W_{i+1} 和 W_i 分别表示 T_{i+1} 和 T_i 时刻的地上生物量, W 为地上生物量干重, T 表示柳枝稷返青后的生长天数。

采用样方法(1m×1m)测定柳枝稷草地盖度和种群平均高度,重复5次。

选择晴朗无云天,测定叶片光合作用(CID-301PS 便携式光合仪,CID,USA,开路模式)。8:00~18:00 每2h 测定1次,重复3次,每月测定1次,每次连续3d。

2002年春季植物返青期(4月15日)采样测定各草地耕层(0~20cm)土壤养分。按W形取样法取9个点,混合风干过0.25mm筛后测定土壤有机质含量(重铬酸钾外加热氧化法)、全N(半微量凯氏蒸馏法)、全P(硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法)、全K(氢氟酸-高氯酸消煮-原子吸收法)、速效N(碱解扩散法)、速效K(醋酸铵浸提-原子吸收法)和速效P(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)^[7,8]。

地温为安塞站川地和山地气象观测场地表下5cm 每月8:00,14:00和20:00平均值,气温在地面以上1.5m处测定,山地观测场为梯田,海拔1240m。

土壤储水量采用水量平衡法计算,土壤储水量 $W = 10 \times H$ (土层深度)(cm) $\times \rho$ (容重)(g/m³) $\times b$ (%) (土壤重量含水量),土壤容重0~20cm取值1.1g/m³,20cm以下取1.3g/m³^[9]。

所有试验数据利用Excel 2000和SPSS11.0软件进行统计计算和分析。

2 结果与分析

2.1 地上生物量累积

2001~2002年川地柳枝稷草地地上总生物量(现存量和枯落物之和)均超过13000kg/hm²,而山地梯田和坡地2a均低于3000kg/hm²,相差约4倍(表1)。生育期结束时川地枯落物占全部生物量比例为9.0%~11.0%,梯田和坡地分别为20.0%~23.0%和15.0%~16.0%。川地柳枝稷种群平均高度和整体盖度均明显高于梯田和坡地,坡地柳枝稷植株高于梯田,但二者盖度基本相同。

表1 2001和2002年不同立地柳枝稷草地地上生物量与生长状况

Table 1 The aboveground biomass and growth characteristics of switchgrass at each habitat at the end of 2001 and 2002

立地条件 Habitat	川地 Lowland		梯田 Terrace		坡地 Slope land	
年份 Year	2001	2002	2001	2002	2001	2002
平均高度 Mean height (cm)	130	168	78	95	83	106
现存量干重 Standing crop biomass(kg/hm ²)	12490.71	14750.49	1880.29	1955.60	2246.5	2155.60
枯落物干重 Litter biomass(kg/hm ²)	1491.43	1513.00	476.86	582.70	399.5	395.75
总地上生物量 Total aboveground biomass(kg/hm ²)	13982.14	16263.49	2357.15	2538.30	2646	2564.30
种群盖度 Community coverage(%)	90	95	30	35	35	35

柳枝稷地上生物量累积过程具有明显的季节变化。坡地柳枝稷生物量在返青后第93天(7月13日)前后达到峰值,然后缓慢变化;梯田约在返青后第121天(8月11日),而川地在返青后第166天(9月22日前后)(图1)。对2002年地上生物量累积过程曲线拟合表明,不同立地条件下柳枝稷草地地上现存生物量和总生物量随萌动返青后的生长天数呈二次或三次多项式变化(表2)。

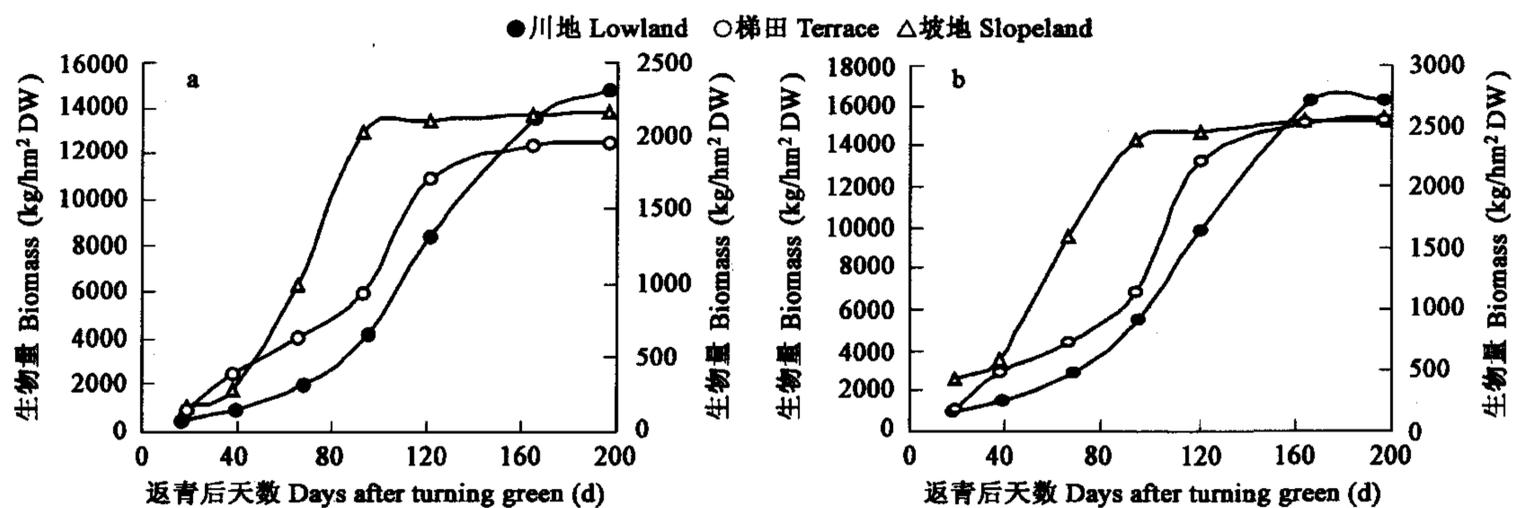


图1 2002年不同立地柳枝稷草地地上生物量动态

Fig. 1 The seasonal dynamic curve of switchgrass biomass at each habitat in 2002

a 现存量 Standing crop biomass; b 总量 Total aboveground biomass

3种立地条件下柳枝稷草地上现存生物量和总生物量 AGR 变化剧烈(图 2)。川地在返青后的第 121 天 AGR 达到全年的最大值(158.93 kg/(hm²·d)),总生物量 AGR 为 169.83 kg/(hm²·d)。坡地现存量最大 AGR 出现在返青后的第 93 天(7 月 13 日),只有 37.00 kg/(hm²·d),而总生物量最大 AGR 出现在第 65 天(6 月 16 日),为 36.69 kg/(hm²·d)。梯田现存量最大 AGR 出现在返青后的第 121 天(8 月 11 日),为 27.31 kg/(hm²·d),总生物量最大 AGR 出现时间与现存量相同,为 38.25 kg/(hm²·d)。显然,川地 AGR 最高值比梯田和坡地有大幅度的提高,并且峰值出现的时间也较迟,生长时间较长。

表 2 不同立地柳枝稷草地上生物量(Y)与返青后生长天数(T)的拟合关系式(2002 年)

Table 2 The relation equation of aboveground biomass and growing days of switchgrass at each habitat (2002)

立地 Habitat	生物量类别 Biomass	关系方程 Relationship equation	F	R	Sig.
川地 Lowland	全部干重(TDW)*	$Y = -0.0085T^3 + 2.8476T^2 - 166.00T + 3424.53$	162.72	0.994	0.001
	现存干重(SDW)	$Y = -0.0062T^3 + 2.1832T^2 - 123.40T + 2223.77$	243.50	0.968	0.000
梯田 Terrace	全部干重(TDW)	$Y = -0.0008T^3 + 0.2213T^2 - 4.0979T + 193.273$	54.36	0.983	0.004
	现存干重(SDW)	$Y = -0.0012T^3 + 0.3464T^2 - 10.822T + 320.316$	24.31	0.978	0.005
坡地 Slope land	全部干重(TDW)	$Y = -0.1224T^2 + 38.9783T - 428.08$	52.83	0.964	0.001
	现存干重(SDW)	$Y = -0.0003T^3 - 0.0122T^2 + 27.7476T - 516.99$	19.44	0.951	0.018

* TDW 和 SDW 分别表示全部和现存生物量干重 TDW and SDW represent total and standing biomass dry weight respectively

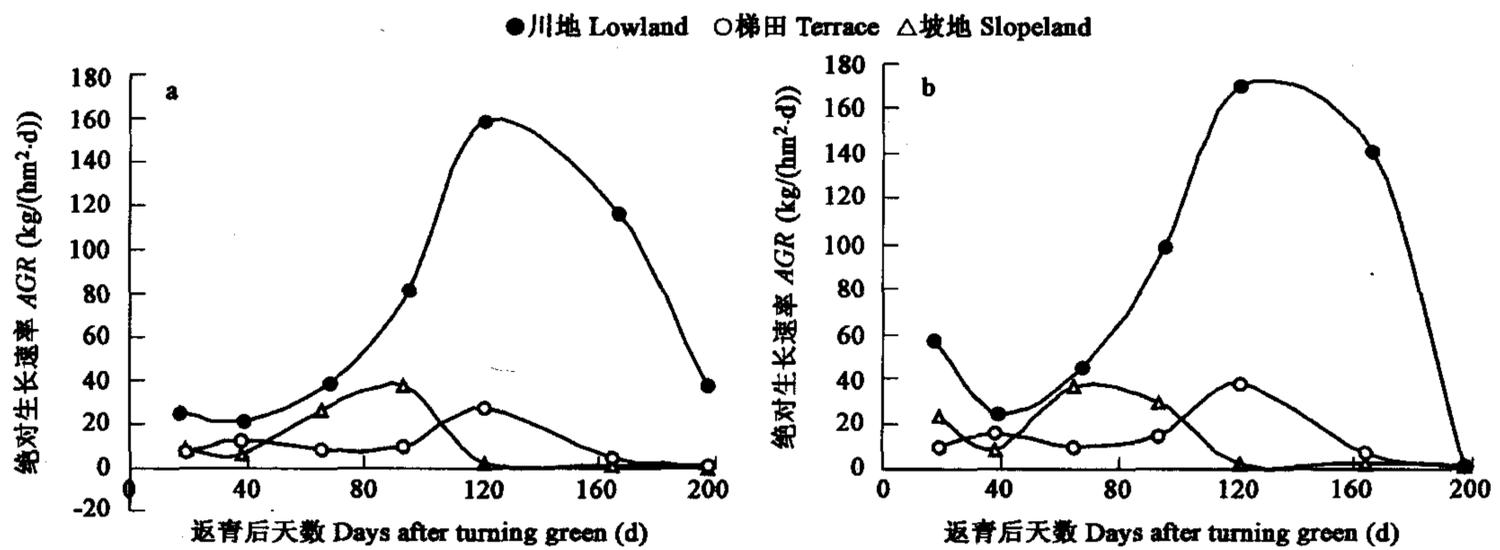


图 2 2002 年不同立地柳枝稷绝对生长速率的比较

Fig. 2 The absolute growth rate (AGR) of switchgrass at each habitat in 2002

a 现存量 Standing crop biomass; b 总量 Total aboveground biomass

不同立地下柳枝稷草地上生物量 RGR 均以返青后的 20d 内最大,川地、梯田和坡地现存量的 RGR 分别为 0.35677, 0.26315 和 0.26728 kg/(hm²·d),总量的 RGR 分别为 0.40625, 0.27180 和 0.31912 kg/(hm²·d) (为更加突出显示其它时刻的 RGR 差异,该时刻数据图 3 中未显示)。随后各立地下柳枝稷草地现存生物量和总生物量的生长速率变化过程基本相同,其

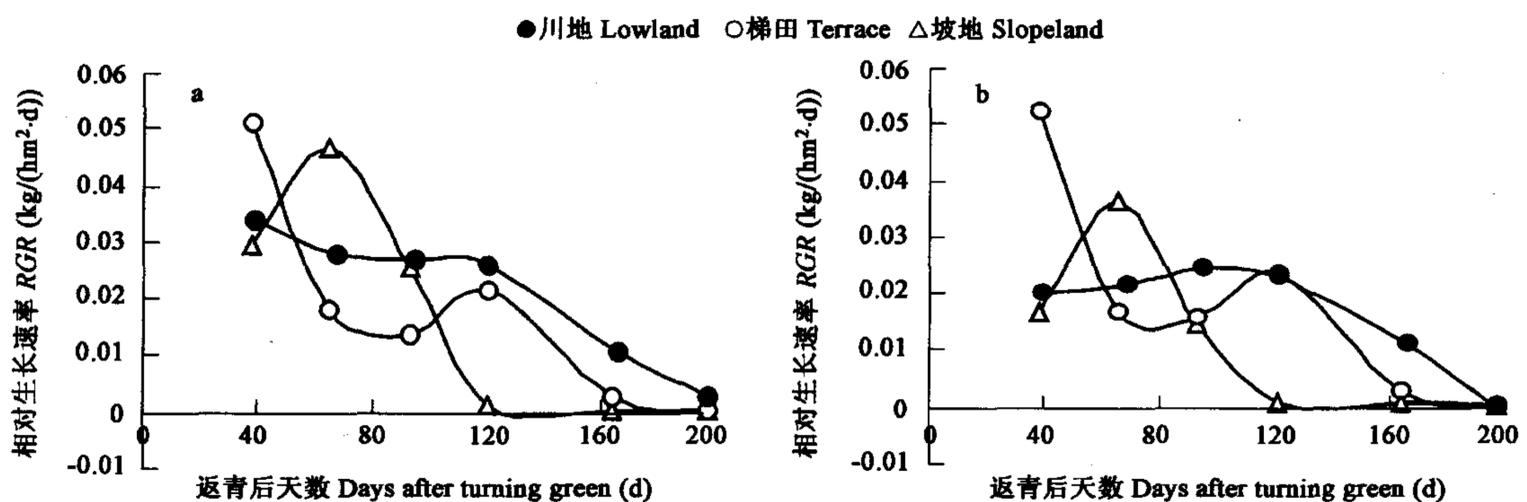


图 3 2002 年不同立地柳枝稷相对生长速率的比较

Fig. 3 The relative growth rate (RGR) of switchgrass at each habitat in 2002

a 现存量 Standing crop biomass, b 总量 Total aboveground biomass

中川地现存量 RGR 为缓慢降低,总量 RGR 在第 95 天(7 月 13 日)稍微增到 $0.02463 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 外,也呈逐渐降低。坡地现存量和总量在第 65 天(6 月 16 日)出现第 2 个峰值后逐渐降低。梯田和坡地现存量第 2 个峰值为 0.02131 和 $0.04679 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,总量分别为 0.02375 和 $0.03651 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (图 3)。川地、梯田和坡地柳枝稷草地生育期内各时刻地上现存生物量平均 AGR 分别为 0.06932 、 0.05296 和 $0.05299 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,平均 RGR 分别为 0.07206 、 0.05471 和 $0.05559 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。可以看出,川地 RGR 第 1 峰值和全生育期平均值最大,坡地 RGR 两峰值均高于梯田,但二者全生育期平均值基本相同。

2.2 土壤含水量与季节变化

不同立地条件下柳枝稷草地土壤含水量最低点基本出现在 7 月中下旬至 8 月上中旬,然后逐渐恢复(图 4)。2001~2002 年期间所测定的 2m 土层土壤含水量平均值,梯田、坡地和川地分别为 12.59% 、 8.10% 和 7.01% 。在连续长时间干旱后的 2001 年 7 月上旬,川地和坡地多数土层含水量已经达到凋萎湿度(4.0%)以下,2m 土层内平均含水量分别为 3.44% 和 3.80% ,而梯田仍高达 11.34% 。

不同立地条件下土壤含水量垂直分布的季节变化不大(图 5)。不同层次土壤中,梯田的含水量一直大大高于川地,而坡地土壤含水量在 4 月、6 月和 10 月均与川地相近而低于梯田,只有 8 月份坡地和梯田比较接近,而大大高于川地。

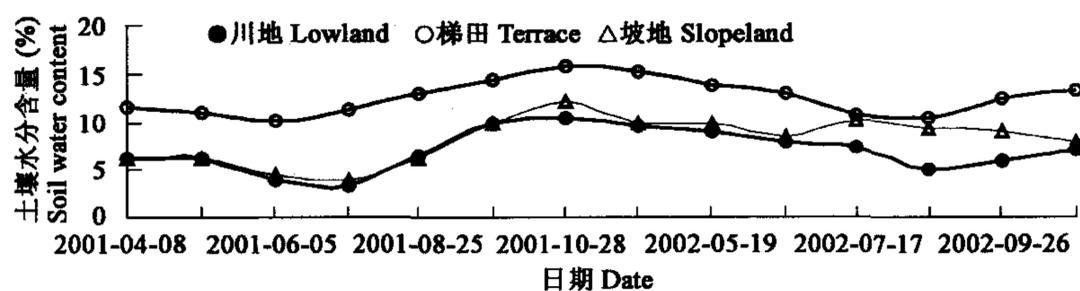


图 4 2001~2002 年不同立地柳枝稷草地 2m 土层土壤水分含量季节变化

Fig. 4 Seasonal soil water content change of switchgrass at the each habitat during 2001~2002

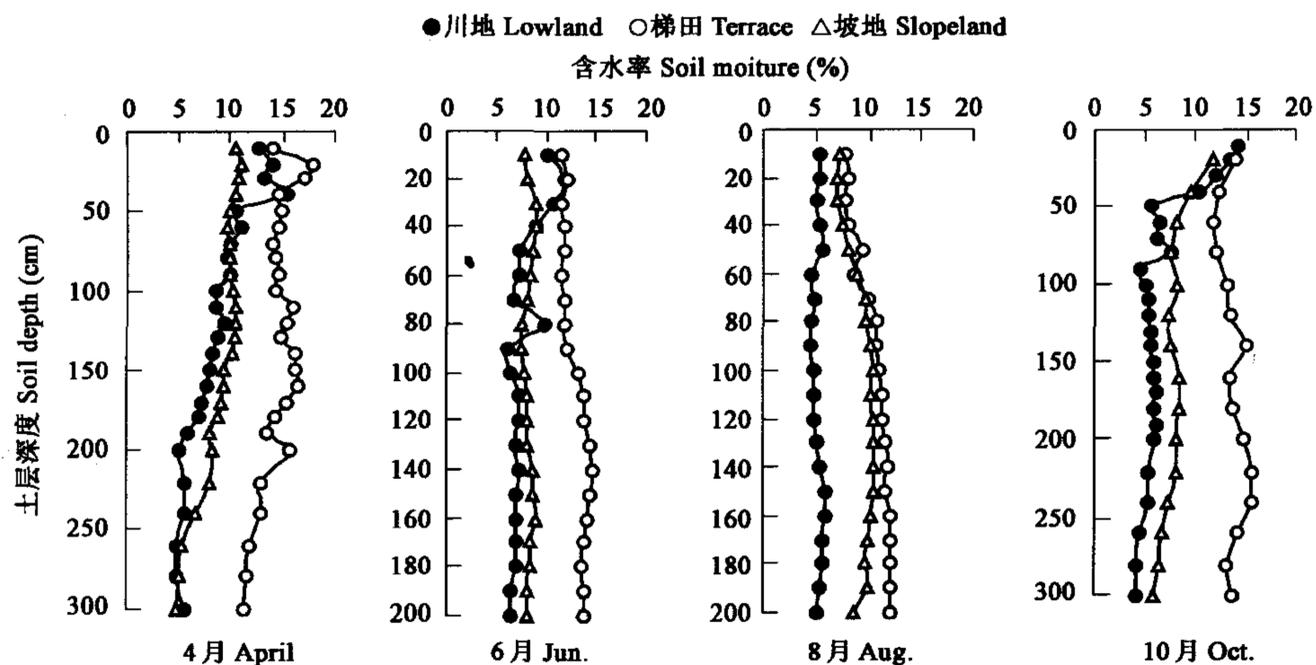


图 5 2002 年不同立地柳枝稷草地土壤水分垂直分布季节变化

Fig. 5 Seasonal soil water content change of switchgrass at the each habitat in 2002

从生长季初的 4 月到生长期末的 10 月,川地、坡地和梯田 0~2 m 土壤含水量分别下降了 26% 、 15.31% 和 12.94% ,川地 2~3 m 土壤含水量下降了 12% ,而坡地和梯田 2~3m 土壤含水量则分别增加了 18.13% 和 13.93% ;0~3 m 土层川地土壤水分下降了 26.0% ,而坡地和梯田则分别增加了 19.34% 和 34.52% 。

2.3 旗叶单位面积的日光合速率与日蒸腾速率

表 3 是 2002 年返青后第 60 天(6 月 12~14 日)选择旗叶测定的单位叶面积日光合同化量和日蒸腾量。川地柳枝稷的日光合速率和日蒸腾速率分别为 $520.69 \text{ mmol}/\text{m}^2$ 和 $171.86 \text{ mol}/\text{m}^2$,均显著低于梯田和坡地,梯田和坡地的日光合速率无显著差异,而日蒸腾速率梯田显著高于坡地。日 Pn/Tr 比值川地为 $3.03 \text{ mmol}/\text{mol}$,显著高于坡地和梯田,坡地较梯田稍高,但二者无显著差异。

3 讨论

柳枝稷在黄土丘陵区旱川地的年度地上生物量在 13 000 kg/hm² 以上,远高于山地梯田和坡地的 2 600 kg/hm²。即使在严重干旱的 1997 年(年降水量只有 264 mm),旱川地生物量也可达 8 000 kg/hm² 以上^[1],调查结果显示,种植 3a 以上的柳枝稷年度生物量在川地与沙打旺相当,山地与典型耐旱作物谷子相近,表明柳枝稷对该地区具有较强的生态适应性^[10]。柳枝稷根系发达,分布较深,单丛分蘖能力强,这种根系生长特性在其苗期就已经显示^[11]。1 年生柳枝稷单株平均有 8~12 个分蘖,川地多年生柳枝稷平均有 26~37 个分蘖,山坡地和梯田多年生柳枝稷平均也有 24~28 个分蘖。对单丛根系的拉力(即单丛草根全部从土壤中拉出地面所需要的拉力)测定结果表明,生长 2a 柳枝稷的根系拉力分别是无芒雀麦、达乌里胡枝子和对照荒山植被平均单丛根系拉力的 1.7、2.9 和 3.3 倍^[1],这种较强的根系生长、分蘖能力是其保证较高生产力的基础,是其具有较强保持水土能力的重要原因之一^[12]。

不同立地条件下柳枝稷草地生产力累积量随生长天数呈二次或三次多项式,但存在阶段累积量差异。累积生物量随时间变化的差异与不同立地条件下草地返青时间、环境条件和 RGR 等有关^[13]。作为反映植物生长的特征参数,RGR 反映植物在剔除呼吸、挥发等损失后通过光合同化产生新生生物量的效率,受立地的环境条件如降雨量、资源有效性、海拔高度和气温等影响^[14]。从不同立地柳枝稷草地地上生物量的 AGR 和 RGR 比较可以得出,坡地与梯田平均 AGR 和 RGR 接近,均低于川地。在季节变化方面,坡地柳枝稷草地 AGR 第 1 峰值与梯田和川地基本同步,但第 2 个峰值提早 1 个月,这是其适应坡地生长环境的结果。Meziane and Shipley^[15]的研究表明,环境条件尤其是光照和养分含量的充足供应是植物发挥生理 RGR 潜力的基础,而相对较差的环境条件使得植物的 RGR 趋于相近,这种生长塑性差异受环境影响种内差异要远小于种间,比较土壤耕层养分可以看出(表 4),3 种立地柳枝稷草地土壤耕层 0~20cm 养分均偏低^[16],其中梯田在土壤有机质、全氮、速效氮等含量方面均最低,总有效养分含量梯田与坡地接近,均低于川地,因此,坡地和梯田相近的平均 RGR 与其相近的土壤肥力状况有关^[15]。川地柳枝稷返青后和整个生长期的平均 RGR 较坡地和梯田大且后期变化平稳,但自返青后第 121 天生长速率下降加快,主要是生物量达到较大值后,高生物量下植株间产生相互遮光和生物量逐渐向衰老组织分配等影响^[14]。

表 4 不同立地柳枝稷草地土壤耕层(0~20cm)养分含量对比

Table 4 Soil cultivation layer (0~20cm) nutrition content of switchgrass at each habitat

立地类型 Habitat type	有机质 Soil Organic (%)	全氮 Total Nitrogen (%)	全磷 Total Phosphorus (%)	全钾 Total Potassium (%)	速效氮 Available Nitrogen (mg/kg)	速效钾 Available Potassium (mg/kg)	速效磷 Available Phosphorus (mg/kg)
川地 Lowland	0.56	0.048	0.146	2.24	64.2	126.4	1.72
梯田 Terrace	0.43	0.035	0.139	2.28	40.8	123.1	1.68
坡地 Slope land	0.47	0.038	0.135	2.03	47.7	118.3	1.61

2001~2002 年川地柳枝稷的水分利用效率显著高于山坡地和梯田(表 5),虽然土壤相对干旱,但川地生物量却比相对湿润的山地生物量高 4 倍多,说明水分不是限制生物量提高的单一因子,生长在不同立地柳枝稷草地生产力的差别可能源于以肥力条件为主土地类型因素的影响^[17]。修建梯田是黄土丘陵区改造坡耕地,保蓄水分、防止土壤侵蚀和水土流失的有效措施,但由于土壤遭受大机械的强烈扰动和压实,使得土壤结构破坏、层次扰乱,成为限制植物生产力提高的主要限制因素之一^[18]。本研究中梯田柳枝稷草地土壤水分状况最优(图 4),年度生产力虽与坡地接近(表 1),但水分利用效率较低,这与梯田修建导致的土壤结构破坏和长期不施肥导致的土壤质量下降有关(表 4)。2002 年川地、梯田和坡地柳枝稷草地整体生物量水分利用效率分别较 2001 年下降 16.64%、18.85% 和 33.59%(表 5),其原因可能在于雨季与光热不同步,从而影响了柳枝稷生产效率的发挥。

水分和氮素营养不足是限制暖季型草地生态系统生产力提高最主要的两个因子^[19]。有研究表明^[12,19],施用氮肥对柳枝稷的增产效果明显,但对磷肥的反应不明显,在施入一定量的氮肥情况下,其还能够充分利用土壤中固定的磷。Byrd 等^[20]对不同品种柳枝稷蒸腾效率的比较研究表明,土壤水分条件的变化对柳枝稷蒸腾效率的影响较小,但随着土壤中氮素供

表 3 2002 年不同立地柳枝稷旗叶单位面积日光合同化与蒸腾总量(6月12~14日)

Table 3 Comparative leaf daily assimilation, transpiration of switchgrass at each habitat during 12~14, Jun. in 2002

立地类型 Habitat type	<i>P_n</i> 光合同化量 (mmol/m ²) Daily assimilation	<i>T_r</i> 日蒸腾量 (mol/m ²) Daily transpiration	<i>P_n/T_r</i> (mmol/mol) Daily leaf WUE
川地 Low land	520.69 b	171.86 c	3.03 a
梯田 Terrace	544.82 a	224.94 a	2.42 b
坡地 Slope land	540.44 a	208.22 b	2.60 b

* 同列数字后带有不同字母表示差异显著($p < 0.05$) Data in each column with different small letter means significantly different ($p < 0.05$)

同列数字后带有不同字母表示差异显著($p < 0.05$) Data in each column with different small letter means significantly different ($p < 0.05$)

同列数字后带有不同字母表示差异显著($p < 0.05$) Data in each column with different small letter means significantly different ($p < 0.05$)

表 5 2001~2002 年不同立地柳枝稷草地水分利用效率

Table 5 Water use efficiency of switchgrass at each habitat in 2001 and 2002 (kg/(hm²·mm))

年份 Year	川地 Lowland	梯田 Terrace	坡地 Slope land
2001	38.01	5.04	8.21
2002	31.69	3.62	5.39

应量的降低而降低。由于柳枝稷的氮利用率较高,在没有氮肥供应连续生长条件下,其产量较低并且不稳定^[19]。本研究中山地梯田和坡地柳枝稷的日水分利用效率相近,均显著低于川地,同样与二者立地土壤肥力低下、有效养分缺乏有关(表 5)。

温度是影响植物生命活动的重要环境因子,气温的变化主要影响地上部生长,地温则关系到根系生长、养分和水分吸收能力等,进而影响植物的生长速率,植物多数生命活动过程主要受地下状况的影响^[21],月平均地温的高低影响植物生长节律(如返青时间)。本研究中川地和山地 4~10 月份地下 5cm 平均地温均为 17.60℃,但 4~5 月份期间川地地温高出山地 1.2~2.8℃,6~10 月除 8 月份高出山地 0.17℃,其它各月低于山地 0.01~2.86℃。川地 4~7 月份气温高出山地 1.78~2.42℃,4~10 月份每月均高出山地 0.05~2.42℃,总平均约高 1.2℃(图 6)。研究表明,地温的降低有利于提高植物根系吸收养分的能力^[22]和较高气温下的根系水导^[23]。黄土丘陵区川地大气流动性较山地小,月平均气温较山地高 1.5℃(图 6)。因此,川地柳枝稷在维持较高生产力的同时,更低的地温和更高的气温利于水分利用效率提高(表 3,5),同时易造成土壤水分大量消耗和雨季后期恢复较慢(图 4,5)。

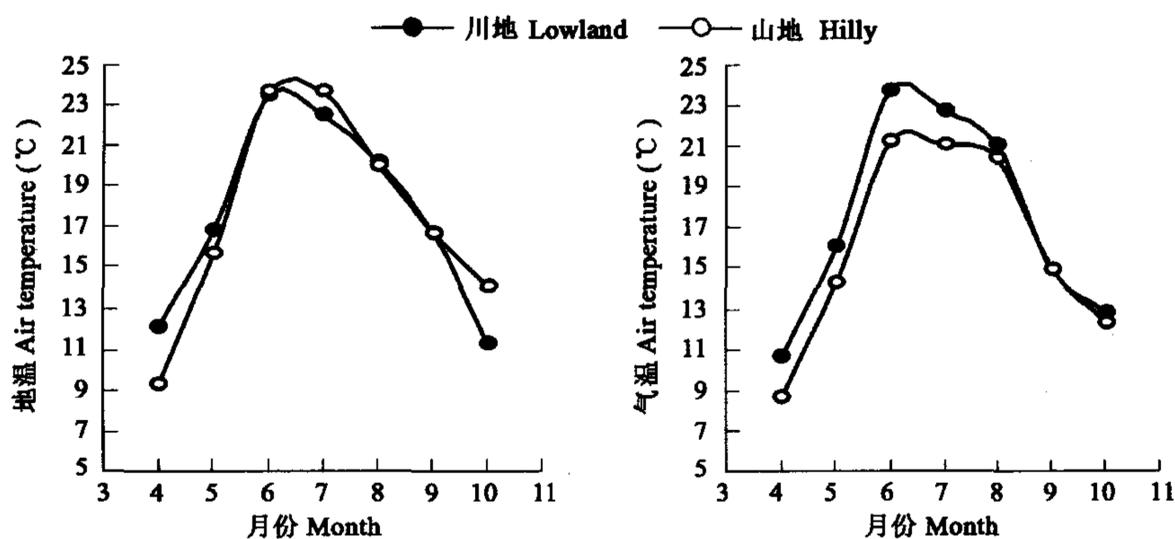


图 6 2002 年安塞川地与山地地温和气温月变化比较

Fig. 6 Seasonal change of soil and air temperature at hilly and lowland area in 2002

关于播种行距对柳枝稷生物量的影响,有研究表明,在水肥供应(特别是氮肥)良好情况下,行距不是影响柳枝稷生物量的主要限制因素,但干旱半干旱区实行窄行播种(20~30cm)可以迅速形成冠层、控制杂草生长和降低土壤水分蒸发,对于保证植物群丛良好生长和生物量方面要优于宽行距种植^[3,18]。因此,本研究中山地梯田和坡地柳枝稷生物量较低与种植行距较宽也有一定关系。

从以上分析可以得出,柳枝稷可以在当地不同立地条件下种植生长,但为保持草地生产的持续性,应增加肥料特别是氮肥的投入,在山地条件下应适当密植。

References:

- [1] Li D Q, Liu G B, Huang J, et al. Study on introduction and bio-ecological characters of *Panicum virgatum* in Ansai loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(Spe.): 125~128.
- [2] Zou H Y. A study on correlation between vegetation division and construction of forest and grassland in loess Plateau on Northern Shaanxi. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(2): 96~101.
- [3] Sanderson M A, Read J C, Read R L. Harvest management of switchgrass for biomass feedback and forage productions. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 5~10.
- [4] Mclaughlin S B. Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. Oak Ridge National Lab., Department of Energy, Washington, D. C. Report: CONF-95b8251-1, 1995.
- [5] Chen Y M, Liu G B, Hou X L. Ecological benefits of artificial seabuckthorn stands in semi-arid hilly region of Loess Plateau on soil and water conservation and soil moisture. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(11): 1389~1393.
- [6] Elberse I A M, Van Damme J M M, Van Tienderen P H. Plasticity of growth characteristics in wild barley (*Hordeum spontaneum*) in response to nutrient limitation. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 371~382.
- [7] Wang X G, Hao M D, Zhang C X, et al. Study on soil nutrient variation of Wangdonggou small valley. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 81~84.
- [8] Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Analysis of soil physical and chemical characteristics*. Shanghai, Shanghai

Scientific & Technological Press, 1978. 62~136.

- [9] Yang W Z, Shao M A. *Study of soil water on the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2000. 23~25, 86~144.
- [10] Xu B C. Study on the productivity and eco-adaptability of forage grasses in the semi-arid Loess hilly-gully region. Yangling: Northwest A&F University. Ph. D. Dissertation, 2003. 78~84.
- [11] Xu B C, Shan L, Huang J, *et al.* Comparison of water use efficiency and root/shoot ratio in seedling stage of switchgrass and Old World bluestems under different soil water conditions. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 4: 73~77.
- [12] Vogle K P, Brejda J J, Walters D T, *et al.* Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and nitrogen management. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 413~420.
- [13] Van Rijin C P E, Heersche I, Van Berkel Y E M, *et al.* Growth characteristics in *Hordeum spontaneum* populations from different habitats. *New Phytol.*, 2000, 146: 471~481.
- [14] Lambers H, Poorter H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. *Advances in Ecological Research*, 1992, 23: 187~261.
- [15] Meziane D, Shipley B. Interaction components of interspecific relative growth rate: constancy and change under differing conditions of light and nutrient supply. *Functional Ecology*, 1990, 13: 611~622.
- [16] Shan L, Xu B C, Du F, *et al.* A survey study on the productivity and eco-adaptability of different plants in the north region of Shaanxi Province, *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(1): 1~7.
- [17] Shan L, Sun J B, Liu Z M, *et al.* Study on the productivity and water use of main crops in the hilly south of Ningxia Autonomous Region. *Scientia Agricultura Sinica*, 1988, 2: 9~16.
- [18] Zhang C E, Wang S Q, Deng X P. Primary fertility and approaches of improving fertility in Yaner Gully watershed of North Yan'an Area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(5): 16~20.
- [19] Muir J P, Sanderson M A, Ocumpaugh W R, *et al.* Biomass production of 'Alamo' switchgrass in response to nitrogen, phosphorous and row spacing. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 5~10.
- [20] Byrd G T, May II P A. Physiological comparisons of switchgrass cultivars differing in transpiration efficiency. *Crop Sci.*, 2000, 40: 1271~1277.
- [21] Weih M, Karlsson P S. Growth response of Mountain birch to air and soil temperature: is increasing leaf-nitrogen content an acclimation to lower air temperature? *New Phytologist*, 2001, 150: 147~155.
- [22] Hood T M, Mills H A. Root-zone temperature affects and nutrient uptake and growth of snapdragon. *J. Plant Nutr.*, 1994, 17: 279~291.
- [23] Graves W R, Joly R J, Dana M N. Water use and growth of honey locust and tree-of-heaven at high root-zone temperature. *HortScience*, 1991, 26: 1309~1312.

参考文献:

- [1] 李代琼, 刘国彬, 黄瑾, 等. 安塞黄土丘陵区柳枝稷的引种及生物生态学特性试验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(专): 125~128.
- [2] 邹厚远. 陕北黄土高原植被区划及与林草建设的关系. *水土保持研究*, 2000, 7(2): 96~101.
- [5] 陈云明, 刘国彬, 侯喜录. 黄土丘陵半干旱区人工沙棘林水土保持和土壤水分生态效益分析. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1389~1393.
- [7] 王旭刚, 郝明德, 张春霞, 等. 王东沟小流域土壤养分变化研究. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 81~84.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 62~136.
- [9] 杨文治, 邵明安. *黄土高原土壤水分研究*. 北京: 科学出版社, 2000. 23~25, 86~144.
- [10] 徐炳成. 半干旱黄土丘陵区牧草生产力与生态适应性研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士论文, 2003. 78~84.
- [11] 徐炳成, 山仑, 黄瑾, 等. 柳枝稷和白羊草苗期水分利用与根冠比的比较. *草业学报*, 2003, 12(4): 73~77.
- [16] 山仑, 徐炳成, 杜峰, 等. 陕北地区不同类型植物生产力及生态适应性研究. *水土保持通报*, 2004, 24(1): 1~7.
- [17] 山仑, 孙纪斌, 刘忠民, 等. 宁南山区主要粮食作物生产力和水分利用研究. *中国农业科学* 1988, 21(2): 9~16.
- [18] 张成娥, 王栓全, 邓西平. 燕沟流域农田基础肥力分析与培肥途径. *水土保持通报*, 1999, 19(5): 16~20.