

# 黄土高原南部旱塬地苜蓿水分生产潜力模拟研究

陈兵<sup>1</sup>, 李军<sup>1,2</sup>, 李小芳<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部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:**应用 EPIC 模型对黄土高原南部旱塬地苜蓿水分生产潜力进行了长期的模拟研究。结果表明,用 EPIC 模型中的气象模型模拟的 30 a 降水特征与本地区实际规律较为接近。30 a 降水模拟值和 13 a 实际值的多年平均值相对误差为 1.53%、标准差误差为 1.86%, 变异系数误差为 1.99%; 30 a 苜蓿水分生产潜力模拟值在 2.018 ~ 17.521 t/hm<sup>2</sup>, 平均值为 7.7 t/hm<sup>2</sup>。模拟试验前 5 a, 年均干旱胁迫日数较少, 仅为 10.2 d, 苜蓿生产潜力值较高且波动平稳。模拟试验后 25 a, 年干旱胁迫日数增加为 123.1 d, 苜蓿水分生产潜力值较低且随年降雨量的丰缺而变化。苜蓿水分生产潜力长期模拟试验结果说明了该区降水无法满足苜蓿长期稳定维持较高生产力的水分要求。

**关键词:**紫花苜蓿; EPIC 模型; 水分生产潜力

**中图分类号:** S152.7+5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-7601(2006)03-0031-05

苜蓿 (*Medicago sativa*) 属豆科多年生草本植物, 具有广泛的生态适应性和较高的生产力, 该草草质优良, 适口性好, 营养丰富, 有很高的饲用价值, 有“牧草之王”的美称, 是目前全球广泛栽培的牧草。我国苜蓿种植面积约 133 万 hm<sup>2</sup>。黄土高原是我国苜蓿的传统种植区, 栽培面积约占全国栽培总面积的 77%。随着退耕还草及农业结构战略调整的实施, 发展苜蓿草业已成为该区域农民实现增收新的增长点, 形成了政府支持、企业介入、农民踊跃参加的大好局面。黄土高原南部地区光能资源丰富, 且雨热同步, 适宜苜蓿生长。但是, 由于年降水和季节降水相对变率较大, 蒸发量大, 水分条件不稳定, 苜蓿的现实生产力水平较低<sup>[1]</sup>。目前, 相关学者对如何通过农艺栽培措施(施肥、覆膜)提高本区苜蓿的生产力和粮草轮作系统下的产量效益和经济效益作了较多的研究<sup>[2]</sup>, 但对苜蓿的水分生产力稳定性评价和草地植被恢复前景的预测研究较少。对苜蓿短期水分生产力的定点研究较多, 但是长时段的定量评价研究较少。

EPIC 模型在计算黄土塬区一年生作物的水分生产潜力和农田土壤水分动态上已有应用, 效果较好<sup>[3~5]</sup>。黄土高原南部旱塬区苜蓿生长年限多有 20 a 以上, 因此应用 EPIC 模型精确估算本区长时段的降雨量变化和苜蓿的水分生产潜力, 揭示本地区气候下苜蓿的水分生产力的变化规律, 对合理安

排种植制度提高牧草产量, 维护苜蓿草地水分生态平衡和制定黄土高原南部地区植被建设规划与为种植苜蓿技术方案提供科学决策依据有重大的理论意义和生产应用价值。

## 1 研究方法

本研究采用计算机模拟模型定量模拟研究与实地观测试验研究相结合的方法, 借助土壤侵蚀与植物生产力模拟模型—WinEPIC (3060 版), 以陕西省长武为黄土高原南部地区的代表地点, 在模型数据库组建<sup>[6]</sup>、参数修订和模拟精度验证的基础上, 长时段的定量模拟研究黄土高原南部地区人工苜蓿的水分生产潜力, 并结合典型地形的定位观测资料和广泛调查资料, 系统评价黄土高原南部旱塬区苜蓿的水分生产潜力变化规律及其稳定性。

### 1.1 模型数据库建设

1.1.1 气象数据库数据输入 气象数据库中数据输入包括逐日气象数据输入和逐月气象统计要素参数输入。将收集到的长武试区 1986 年 1 月 1 日~1998 年 12 月 30 日 13 a 的气象数据(历年各月逐日太阳辐射、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速)在 Excel 中按照 EPIC 模型要求处理后, 转变为特殊的文本格式, 导入模型气象数据库中, 建成逐日实时气象数据库。逐日实时气象数据库将用在实际时段的模拟研究。

收稿日期: 2005-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371077, 30471024)

作者简介: 陈兵 (1981—), 男, 新疆伊犁人, 硕士研究生, 主要从事作物生产系统模型与决策研究。E-mail: chenxi7204@163.com。

通讯作者: 李军 (1964—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn。

再以长武 1986~1998 年实时气象数据为基础,应用模型自带的 WXPARM 软件来计算出试区的逐月气象要素的统计参数,包括逐月最高气温(TMX)、逐月最低气温(TMN)、逐月最高气温标准差(SDMX)、逐月最低气温标准差(SDMN)、逐月平均降水量(PRCP)、逐月日降水量标准差(SDRF)、逐月日降水量偏态分布系数(SKRF)、逐月雨天之后为晴天的概率(PW|D)、逐月雨天之后为雨天的概率(PW|W)、逐月平均降雨日数(DAYP)、逐月平均每日太阳辐射量(RAD)、逐月平均相对湿度(RHUM)等。逐月气象要素统计参数编入试区气象数据库后,模型可以应用逐月气象要素统计参数模拟生成时段逐日气象要素序列,以用于本区苜蓿水分生产潜力的长时段模拟研究。

需要特别说明的是,这里气象要素的“模拟生成”并非通常的“气象预测预报”,不是对长武未来长时段逐日气象要素变化趋势的预测。模拟生成的长时段气象要素序列与长武 1986~1998 年实测气象要素序列具有相似的变化规律,但时段相对较长,应该能够全面反映长武站气象要素的周期性变化规律,特别是降水的干湿交替演变规律。

1.1.2 土壤数据库数据输入 EPIC 模型的土壤数据库需要输入试区代表地形资料(包括坡度、坡向、坡长等)和典型土壤剖面各层次的理化性状数据(包括土层厚度、容重、凋萎湿度、田间持水量、沙砾含量、粉粒含量、有机氮浓度、pH 值、离子总量、有机碳含量、CaCO<sub>3</sub> 含量、阳离子代换量、粗砾含量、硝态氮浓度、速效磷浓度、作物残茬量、比重、磷素吸收率、饱和导水率、地下水流运转时间、有机磷浓度)。本研究参考《陕西土壤》与《中国土志》第五卷中的黑垆土剖面参数和长武农业生态实验站多年的定位观测资料,将长武试区的黑垆土,分为了 10 个剖层,土

层总厚度为 11 m,依次输入每个土壤剖层的土壤理化性质参数<sup>[7,8]</sup>。

1.1.3 作物参数数据库参数输入 EPIC 模型作物参数数据库中的每种作物都有唯一的生理生态参数集,通过设定作物参数控制作物的生长发育进程,描述阶段发育与形态发育状况,计算作物对土壤水分、养分的吸收数量,估算温度、水分、氮素和磷素对生物量积累和经济产量形成的胁迫。本研究中通过查阅相关文章和实测数据,对试区紫花苜蓿的潜在能量转换比率、最适生长温度、生长发育最低温度、最大叶面积系数等 39 个生理生态参数进行了设定。

1.1.4 EPIC 模型耕作数据库组建 EPIC 模型耕作数据库内带的机械耕作参数文件 CLASTILL.DAT 中包含了 58 种机械耕作与管理措施,包括播种、移栽、施肥、喷药、除草、耙地、中耕、培土、起垄、开沟、翻耕、旋耕、深松、收获、打捆、打包等不同的农作机械作业项目。

根据长武苜蓿的实际生产方式特征,本研究在数据库中增加了人工撒播、牛耕和人工收获 3 种新的耕作管理措施。且将数据库中苜蓿的耕种、收获等具体耕作管理措施均设定与当地的苜蓿大田实际生产一致。

1.2 模型验证

为了验证 EPIC 模型的模拟效果,判断参数修正后的模型是否适用于长武试区,本研究应用所组建的长武试区 1986~1998 年的逐日气象数据库、土壤数据库、紫花苜蓿作物生长参数数据库和紫花苜蓿耕作数据库,运行模型,得到 1986~1998 年实时气象数据下的紫花苜蓿干草量的模拟结果,并与长武试区长期苜蓿的定位试验的产量数据<sup>[9]</sup>对比。实测值和模拟值的动态比较如图 1 所示。

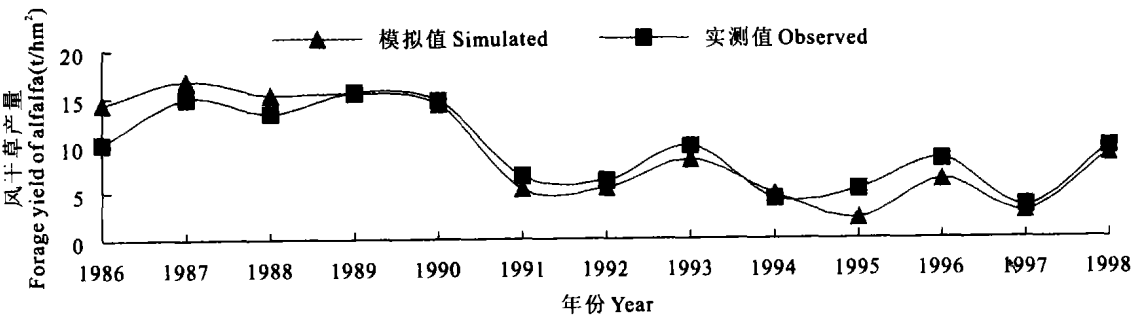


图 1 长武塬区苜蓿风干草产量模拟值与观测值对比

Fig. 1 Comparison of simulated and observed alfalfa forage yield on rain fed highland at Changwu

从图 1 可以看出,EPIC 模型经过参数校正后,对紫花苜蓿风干草产量的模拟结果比较理想。所模

拟出的长武试区紫花苜蓿 13 a 的风干草产量水平和年际变化趋势和定位试验的产量曲线基本吻合。

表 1 长武试区紫花苜蓿风干草产量模拟值  
与观测值(1986~1998 年)的统计比较

Table 1 Comparison of statistic values of simulated and observed  
alfalfa forage yield at Changwu during 1986~1998

| 项目<br>Items                               | 紫花苜蓿风干草产量<br>Forage yield of alfalfa |                       |                           |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
|                                           | 模拟值<br>Simulated value               | 观测值<br>Observed value | 相对误差(%)<br>Relative error |
| 平均值 (t/hm <sup>2</sup> )<br>Average value | 9.30                                 | 9.38                  | 0.9                       |
| RMSE (t/hm <sup>2</sup> )                 | 1.896                                |                       |                           |
| 回归方程<br>Regression model                  | $y = -2.1394 + 1.2186x$              |                       |                           |
| 相关系数<br>Correlation coefficient           | 0.8957 * *                           |                       |                           |

对实测数据和模拟数据进行统计分析,统计结果如表 1 所示,其中 RMSE 是国际上作物模型验证中常用的观测值与模拟值比较的统计参数,此值越小,表明模拟结果的精确性和可靠性越高<sup>[10]</sup>。RMSE 的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}}$$

式中:  $O_i$  为观测值;  $S_i$  为模拟值;  $n$  为样本数。  
由表 1 可以看出,EPIC 模型对苜蓿风干草产量的模拟效果较好,模拟值与观测值相对误差为 0.9%,RMSE 为 1.896 t/hm<sup>2</sup>,相关系数为 0.8957,确定系数为 0.8023,达到显著水平。说明,EPIC 模型经过参数修订后能够较为精确的模拟黄土高原南部旱塬地区苜蓿的风干草产量。

2 模拟结果与分析

2.1 30 a 模拟降水特征

以长武试区 1986~1998 年的气象数据为基础,应用 EPIC 模型的气象模拟程序(马尔可夫模型)随机模拟得到试区 30 a 时间段的降水量,为便于结果说明,将该时段标记为 2011~2040 年。模型模拟所得的 30 a 长武旱塬年降水量最低值为 2020 年的 226.9 mm,最高值为 2028 年的 737.9 mm,30 a 平均降水量为 511.9 mm,年际间降水波动强烈,年降水变异系数为 24.9%。30 a 模型模拟降雨与 1986~1998 年的实际降雨比较见表 2,说明 EPIC 模型对试区的降水规律模拟较好。模拟试验模拟年份可以划分为干旱年、平水年和丰水年三种水文年,30 a 间 2011、2016、2019、2020、2022、2024、2025、2034、2035、2037、2040 为干旱年,降雨量介于 200~500

mm,2020、2022、2025、2034、2035、2040 年的降水不足 400 mm,为特干旱年型;2012、2014、2017、2018、2021、2026、2027、2029、2030、2031、2033、2039 为平水年,降雨量介于 500~600 mm;2013、2015、2023、2028、2032、2036、2038 为丰水年,降雨量介于 600~800 mm,其中 2013、2015、2028 年降水超过了 700 mm,为特多雨年(图 2a)。

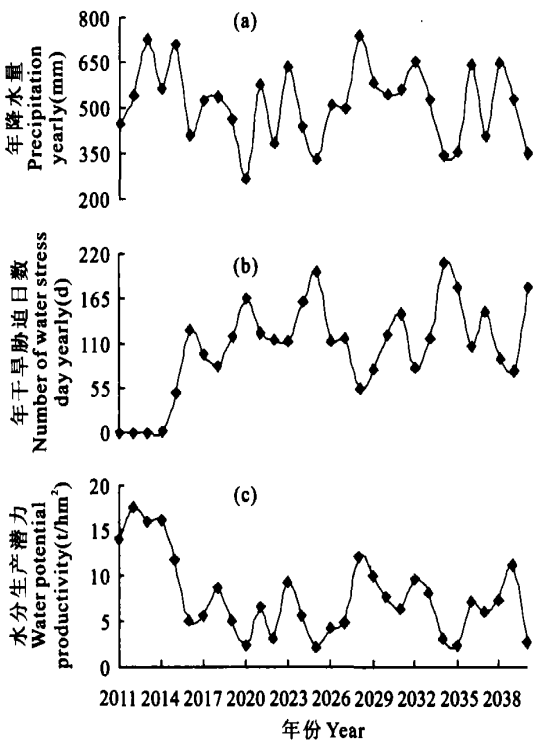


图 2 长武 30 a 的降水量、干旱胁迫天数与水分生产潜力模拟值  
Fig.2 The 30-years simulated precipitation、number of water stress day and water potential productivity at Changwu

2.2 苜蓿水分生产力

在 30 a 模拟气象条件下,长武苜蓿生长潜力模拟值变化在 2.018~17.521 t/hm<sup>2</sup>,平均值为 7.7 t/hm<sup>2</sup>,其中 2011~2015 年 5 a 的苜蓿生产潜力平均值为 15.07 t/hm<sup>2</sup>,比 30 a 的平均水平高出了 8.37 t/hm<sup>2</sup>;从 2015 年开始,苜蓿的水分生产潜力值开始下降,2016~2040 年 25 a 的平均苜蓿水分生产潜力模拟值为 6.23 t/hm<sup>2</sup>,比 30 年的平均水平低了 1.47 t/hm<sup>2</sup>,比 2011~2015 年 5 a 的平均水平降低了 8.84 t/hm<sup>2</sup>。

由图 2c 可以看出,长武试区 30 a 苜蓿的长期生长的水分生产潜力变化具有一定的规律性,呈现为生长前期(2011~2015 年)水分潜力值高且变化平稳,生产潜力的变异系数为 14.8%;生长后期(2016~2040 年)的水分潜力值较低且变化较为剧烈,变异系数为 47.1%,由图 2a、2c 可以看出苜蓿生长后期水分生产潜力值的波动随着年际降水量波动。

表 2 13 a 实时降水量与 30 a 模拟降雨量统计分析对比

| Table 2 Comparison of measured values of 13Y real precipitation and 30Y simulated precipitation |                                       |                                       |                                           |                                      |                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 项目<br>Items                                                                                     | 最大降水量<br>Max<br>precipitation<br>(mm) | 最小降水量<br>Min<br>precipitation<br>(mm) | 平均降水量<br>Average<br>precipitation<br>(mm) | 标准差<br>Standard<br>deviation<br>(mm) | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation<br>(%) |
| 13 a 实时降水<br>13 year real time precipitation                                                    | 724.1                                 | 262.9                                 | 519.8                                     | 129.9                                | 25.4                                       |
| 30 a 模拟降水<br>30 year simulated precipitation                                                    | 737.9                                 | 226.9                                 | 511.9                                     | 127.5                                | 24.9                                       |
| 相对误差 Relative error(%)                                                                          | 1.89                                  | 14.7                                  | 1.53                                      | 1.86                                 | 1.99                                       |

2.3 30 a 水分胁迫程度变化

模型模拟的 30 a 模拟时段内,苜蓿生长遭受了严重的干旱胁迫,平均每年干旱胁迫日数为 104.3 d,2011~2013 年的干旱胁迫日数最少为 0 d,2034 年干旱胁迫最严重,全年有 207.9 d 出现了水分亏缺。由图 3b 可以看出,苜蓿生长的前后期,干旱胁迫呈现显著的差异性,表现为 2011~2015 年苜蓿生长的水分状况比较好,平均年干旱胁迫日数为 10.2 d;2015 年后苜蓿生长的水分亏缺开始变重,2015~2040 年苜蓿平均水分胁迫的日数为 123.1 d,苜蓿生长的前、后阶段苜蓿年干旱胁迫日数相差 112.9 d。

2.4 土壤水分亏缺、苜蓿水分生产潜力和降水关系

水分是半干旱湿润地区苜蓿生长的主要障碍因子,土壤水分主要靠降水补给。由图 2 可以看出,在长武旱塬,苜蓿生长的前 5 a,虽然每年的降水量多寡不同,波动较大,但是苜蓿的产量曲线与时段内年降水量的波动曲线没有一致性,也没有产生水分干旱胁迫,产量表现相对稳定,说明苜蓿生长初期,受当年降水量的影响较小,即使降水量稀少,苜蓿也可以靠吸取深层土壤中蓄积的水分维持较稳定的高产;苜蓿生长后期的水分生产潜力与降水量、干旱胁迫日数的变化表现出一定的规律性,如图 2 所示,苜蓿水分生产潜力值随着当年的降雨量多寡剧烈的波动,降雨多的年份,苜蓿生长的水分状态较好,干旱胁迫日数降低,苜蓿水分生产力较高,降雨少的年份,干旱胁迫日数相应增加,苜蓿生长的水分状态较差,生产力降低。苜蓿生产力潜力的变化规律和降水量的变化趋势基本一致,干旱胁迫日数的波动趋势与年降水量的波动趋势相反。

以上模拟结果表明在黄土高原南部地区的气候条件下,随着苜蓿生长年限的延长,长武试区的土层逐渐向干燥化发展,土层蓄水量减少,供水能力减弱,苜蓿生长的水分需求转向主要靠当年降水供应,所以产量水平随降水量丰缺而上下波动,产量稳定

性下降。

3 结论与讨论

本研究初步尝试了 EPIC 模型在黄土高原地区人工牧草水分生产潜力研究中的应用,表明利 EPIC 模型模拟研究作物水分生产潜力有较好的适用性。对黄土高原南部旱塬区紫花苜蓿水分生产潜力的研究表明,模型经过对气象、土壤、耕作管理措施数据库中参数的输入和修正后,模拟的苜蓿风干草产量较为准确,模拟值与实际观测值之间的多年平均误差为 0.9%,说明 EPIC 模型参数修正较为合理,适用于长时段的估算研究黄土高原南部地区的苜蓿水分生产潜力。

EPIC 模型根据编入气象数据库中的 1986~1998 年的实时气象数据,模拟了试区 30 a 的连续降水模拟值,模拟降水规律与实际相近。在此基础上,模型模拟了试区 30 a 的苜蓿水分生产潜力。由长期模拟试验得出了黄土高原南部地区气候条件下的苜蓿水分生产潜力呈现为生长前期苜蓿水分生产潜力值较高且稳定,后期随降水的多寡而变化的变化规律。由此认为该区降水水平无法长期满足苜蓿当年的水分需求,苜蓿生长需要从土壤中吸取水分,才能获得较高且稳定的生产力水平。目前,退耕还草工程下长期种植苜蓿,必然导致深层土壤趋于干燥化,人工草地衰退。

EPIC 模型对气候和苜蓿生产力的模拟较为合理,能够较为精确的模拟描述长时段的降雨变化和水分条件变化下苜蓿生产力的响应变化,说明气象模型和作物生长模型适合在试区应用。同时,模型还需要进一步对 EPIC 模型中的水文学模型、营养模型等子模型进行参数修订和区域性试验评价,使模型今后能够应用在土壤水分动态变化模拟、施肥的产量效益模拟和不同农作措施和作物种植制度的水土侵蚀模拟研究中,为今后黄土高原旱作农业生产效益和生态效果长期定量评价提供依据。

参 考 文 献:

[1] 信乃谕,王立祥. 中国北方旱区农业[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1998,181—182.

[2] 沈禹颖,南志标,高崇岳,等. 黄土高原苜蓿—冬小麦轮作体系土壤水分时空动态及产量响应[J]. 生态学报,2004,24(3): 640—647.

[3] 李 军,王立祥,邵明安. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报,2001,16(2):161—165.

[4] 李 军,邵明安,张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究[J]. 自然资源学报,2004,19(6):738—746.

[5] 王宗明,梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力

的初步尝试[J]. 自然资源学报,2002,17(4):481—487.

[6] Williams J R. WinEPIC3060 Researcher's guide[R]. Texas A&M University·USA;Black land Research Center,2001.

[7] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第五卷)[M]. 北京:中国农业出版社,1995,244—254.

[8] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992.

[9] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效益[J]. 土壤学报,2002,39(3):404—411.

[10] 王宗明,张 柏,宋开山,等. Cropsyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J]. 农业工程学报,2005,21(5): 47—50.

Long term simulation of water potential productivity of alfalfa on rain-fed highland in south of Loess Plateau

CHEN Bin<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, LI Xiao-fang<sup>1</sup>

(1. Agronomy College of Northwest sic-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Lab of Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The water potential productivity of alfalfa on rain fed highland in south of loess plateau was simulated for long term (30 years) using EPIC model. Simulated results show that: the character of precipitation variation law simulated by using weather model in EPIC for 30-year and measured for 13-years is alike. The average precipitation deviation between 30-year simulated and 13-year really measured is 1.53%, the S-deviation is 1.86%, CV-deviation is 1.99%; The simulated water potential productivity fluctuates between 2.018~17.521 t/hm<sup>2</sup>, the average value is 7.7 t/hm<sup>2</sup>. The average water stress day is only 10.2 days yearly, the water potential productivity is high and steady—going during first 5-years. During the last 25 years the water stress day increases to 123.1days, and water potential productivity reduced and changed with precipitation annually. The study of long—term simulation of water potential productivity for alfalfa shows that the precipitation of study area can't satisfy water request for high productivity.

**Keywords:** alfalfa; EPIC model; water potential productivity