

杨秀梅, 张伟欣, 高亮之, 等. 牧草生产潜力模拟模型及其应用[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(2): 322-327.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.016

牧草生产潜力模拟模型及其应用

杨秀梅¹, 张伟欣², 高亮之², 杨春华¹, 张英俊³, Hannaway B. David⁴, 张新全¹

(1. 四川农业大学动物科技学院, 四川 雅安 625014; 2. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 江苏 南京 210014; 3. 中国农业大学草地研究所, 北京 100094; 4. 美国俄勒冈州立大学作物与土壤学院, 俄勒冈州 97331)

摘要: 牧草生产潜力模拟模型(For-PASM)是模拟牧草的生长和产量形成的应用模型。For-PASM 包括常年模拟和牧草品种参数调试两个系统。各系统包含生长周期、叶面积动态、收割期与收割次数及光合生产和产量等模块。牧草的生长发育是由气候因素决定的, 依据积温来确定牧草生育期和收获期, 禾本科以抽穗期为收获期, 豆科牧草以初花期为收获期。模型的功能是模拟牧草的收获期、产量季节性动态以及年产量。用四川雅安市多花黑麦草(*Lolium multiflorum* Lam)和扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)生产数据进行检验。结果显示, For-PASM 在模拟牧草收割期和牧草季节性的产量动态中, 季节性干物质产量动态趋势与总产量均符合实际。

关键词: 生产潜力模拟模型; 牧草产量模拟; 冷季型牧草; 暖季型牧草; 多花黑麦草; 扁穗牛鞭草

中图分类号: S543 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)02-0322-06

Forage potential production simulation model and its application

YANG Xiu-mei¹, ZHANG Wei-xin², GAO Liang-zhi², YANG Chun-hua¹, ZHANG Ying-jun³, Hannaway B. David⁴, ZHANG Xin-quan¹

(1. College of Animal Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China; 2. Department of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Institute of Grassland Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 4. Department of Crop & Soil Science, Oregon State University, Oregon 97331, U. S. A.)

Abstract: Forage potential production adaptation simulation model (For-PASM) simulates forage growth and production of cool- and warm-season species. This model has a normal simulation system and a parameter regulation system. Each of them has several modules, including development stage and date, dynamic changes of leaf area index, harvest date and times, photosynthesis, and daily and total annual biomass accumulation. Plant development is driven by temperature, with duration of growth stages dependent on accumulated heat units (AHU). Harvest date is calculated by AHU required for heading stage development for grasses and the budding stage for legumes. Annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam) and whipgrass (*Hemarthria compressa*) yield data were used to validate the model in Yaan, Sichuan province. The result showed that the model could be used to predict the growing progress and seasonal and annual yield.

Key words: forage potential production adaptation simulation model (For-PASM); forage production simulation; cool-season forage; warm-season forage; *Lolium multiflorum* Lam; *Hemarthria compressa*

收稿日期: 2014-10-25

基金项目: 四川省 13 年学术带头人培养项目

作者简介: 杨秀梅(1990-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 主要从事牧草产量模拟模型及草地遥感研究。(Tel) 13141354799; (E-mail) yxm2008bj@126.com

通讯作者: 杨春华, (E-mail) ychh@sicau.edu.cn

牧草产量的模拟是以系统科学为指导思想, 牧草生理、生态学为基础, 采用计算机和数理方法结合的手段, 来定量和动态地描述牧草生长、发育和产量

形成过程及其与环境因子间的关系。随着牧草生理生态学的深入研究及计算机技术的广泛应用,通过数学模型研究可揭示生态系统内各个环境因子对牧草生长发育的影响以及环境因子间相互作用的规律,模拟和预测牧草生长、发育及产量形成过程,经验证并达到一定精度后,可为提高牧草生产力提供最优化的栽培管理措施,从而为牧草生长与产量定量预测、监测提供理论支持。

20 世纪 80 年代以来,国际上牧草生长与产量预测模拟模型的研究进展较快,已建成的模型有 ALMANAC^[1]、CATIMO^[2]、DairyMod^[3]、Graze-Gro^[4]和 LINGRA^[5]等,国内牧草产量预测模型的研究起始于苜蓿生产的农业气候模型 ALFAMOD^[6]。近年来,中国科学家对牧草生长及其产量这一领域做过不少的研究或综述,大量的研究集中于紫花苜蓿的光合作用与产量预测^[7-11]。但由于研究者的目的不同,模型的侧重点也各不相同,导致模型的应用受到限制。建立简单实用且涵盖牧草不同品种的产量预测模型,来预测适时收获期和牧草年产量与季节性产量动态的问题终未得到真正解决。

For-PASM 参考了小麦和水稻栽培计算机模拟优化决策系统^[12-13],主要依据牧草的生长发育规律而建立,是适用于牧草生产的应用模式。For-PASM 以每一天为时间步长,模块的程序运用 Visual Basic 语言编写,并将各模块与 Microsoft visual FoxPro9.0 的牧草品种参数数据库和各地气象数据库连接起来,在 Windows 系统环境中运行。

1 模拟模型的构建

1.1 模型的基本原理

For-PASM 的基本原理是将牧草模拟技术与各地气象数据相结合,从而可以模拟不同品种和不同地区牧草的生长发育、收割次数与收割期;预测牧草的年产量和季节性产量动态。

1.2 模型的主要模块

模型的主模块为 For-PASM,主模块由 4 个一级模块组成,分别为生长周期、收割日期和收割次数、叶面积动态及光合生产和产量。各一级模块中包含多个二级模块,其中,生长周期模块中包括播种期、结束生长期和生长周期;收割日期与收割次数模块中包括收割积温、收割次数和收割日期,叶面积动态模块中包括太阳辐射函数和叶面积动态函数;光合

生产和产量模块中包括群体光合作用、呼吸作用和干物质积累。

1.2.1 生长周期 本模型中,冷季型和暖季型牧草的生长期定义为:当地播种期为牧草的开始生长日期,连续 3 d 的日平均气温小于某一值作为牧草生长的终止日期。冷季型牧草以 5 ℃ 为生长终止温度,最适生长温度为 21 ℃。暖季型牧草以 12 ℃ 为终止温度,最适生长温度为 32 ℃^[14]。对于一年生和播种当年的多年生牧草生长开始期为出苗期。

1.2.2 收割日期与收割次数 依据植物生长发育的有效积温原理,即植物需要在温度达到一定指标后,才开始生长发育(公式 1)。

$$Ste = \sum_{T_1}^{T_p} Td(T - T_e) \quad (1)$$

式中: T_e 为生长发育的起始温度; T_1 为起始生长日; T_p 为结束生长日; T 为当天的温度; Ste 为有效积温。有效积温的确定以当地实际收割期为依据。适宜收割时间的确定是以禾本科牧草抽穗期作为第一次刈割期,随后各茬的收获日期依据牧草品种的不同而定。将年有效积温除以收割积温即为年收割次数。

1.2.3 叶面积动态 叶面积的变化是用生长函数模拟的,要求在数量变化上与实际情况的近似,但不考虑生理原因。本模型中用 Logistic 生长方程模拟叶面积动态(公式 2)。

$$W = (W_0 \times W_f e^{\mu t}) / (W_f - W_0 + W_0 e^{\mu t}) \quad (2)$$

式中: W 为叶面积指数; W_f 为叶面积指数可能的最大值; W_0 为 W 的起始值; μ 为特定系数,本研究中取值为 1; t 为时间。

1.2.4 光合作用与干物质积累 为了模拟牧草群体的光合作用,本模型采用高亮之等推导的群体光合积分公式,即群体中光垂直分布模型(Monsi-Saeki)与单叶的光-光合作用模型结合起来,计算牧草群体的逐日光合量^[12-13]。

$$PDi = \int_0^{LAI} TF \times \frac{B \times PAR}{1 + A \times PAR} d(LAR) \times Di = Di \times TF \times \int_0^{LAI} \frac{B \times 0.47(1-\alpha) \times Qi \times \exp(-K \times LAI)}{1 + A \times 0.47(1-\alpha) \times Qi \times \exp(-K \times LAI)} d(LAI) = Di \times TF \times \frac{B}{K \times A} \times \ln \left[\frac{1 + A \times 0.47(1-\alpha) \times Qi}{1 + A \times 0.47(1-\alpha) \times Qi \times \exp(-K \times LAI)} \right] \quad (3)$$

群体逐日光合量减去逐日呼吸消耗是植物从太阳光中获取并固定能量。在进行干物质的积累时,总光合产物减去呼吸消耗的部分即为净光合量。本模型采用 McCree 法将呼吸作用分为二部分,即维持呼吸与生长呼吸^[12-13]。

$$R = RG + RM \quad (4)$$

式中, RG 是生长呼吸; RM 是维持呼吸。

$$RG = k \times P \quad (5)$$

式中, k 是生长呼吸系数(0.25), P 是当日光合量。

$$RM = m \times Q^{(T-25)/10} \times W \quad (6)$$

式中, m 是维持呼吸系数, $m = 0.0125/d$, 在牧草生产中取值 0.02; Q 是呼吸作用的温度系数, 取值 2.0; W 是到当日为至, 所累计的干物质质量。

群体干质量是群体光合作用与呼吸作用之差。其公式为:

$$PN(I) = \beta \times PD(I) - R(I) \quad (7)$$

式中, $PN(I)$ 是日净光合量; $PD(I)$ 是日总光合量; $R(I)$ 是日呼吸量; β 是 CO_2 与碳水化合物的转换因子:

$$\beta = [CH_2O] / [CO_2] = 0.68 \quad (8)$$

在本模型中, 没有考虑水分和肥料对牧草产量

的影响。

2 数据来源与模型检验

2.1 数据来源和模型参数的获取

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。四川省共收集到 1980 ~ 2010 年, 26 个站点的气候数据, 建立了常年气象数据库。包括日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数和降雨量。模型的输出主要包括生长开始期, 生长结束期; 年收获次数, 各茬次收获日期和牧草产量。

模型的验证数据源于四川农业大学, 雅安牧草比试验基地。试验地位于地理坐标北纬 $29^{\circ}8'$, 东经 $103^{\circ}14'$, 海拔 620 m, 属北亚热带湿润季风气候区。冷季型牧草选用多花黑麦草 (*Lolium multiflorum* Lam), 2010 ~ 2012 年和 2014 年的田间试验数据^[14-15]; 暖季型牧草选用扁穗牛鞭草 (*Hemarthria compressa*), 2004 ~ 2006 年田间试验数据^[16]。主要测定指标有各茬次的收获日期和牧草干物质产量等。根据多花黑麦草多年和扁穗牛鞭草的实际生产数据和前人研究确定品种的参数(表 1)。

表 1 植物发育和光合作用的有关参数

Table 1 Parameters related to plant development and photosynthesis

| 参数 | 参数含义 | 多花黑麦草 | | 扁穗牛鞭草 | |
|-----|------------------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|
| | | 参数取值 | 参数来源 | 参数取值 | 参数来源 |
| W1 | 生长终止温度(℃) | 5 | Jeffrey 等 ^[17] | 12 | Jeffrey 等 ^[17] |
| W2 | 生长最适温度(℃) | 21 | Jeffrey 等 ^[17] | 32 | Jeffrey 等 ^[17] |
| TW1 | 第 1 次收割积温(℃) | 300 | 实测值 | 1 030 | 实测值 |
| TW2 | 第 2 次收割积温(℃) | 280 | 实测值 | 1 150 | 实测值 |
| TW3 | 第 3 次收割积温(℃) | 450 | 实测值 | 1 150 | 实测值 |
| TW4 | 第 4 次收割积温(℃) | | | 1 000 | 实测值 |
| A | P 达到最大光合速率时, 光照度(PAR, 光合有效辐射)的倒数 | 6.00 | 李向林等 ^[18] | 6.50 | 陈灵攀等 ^[19] |
| B | 光-光合作用曲线初始斜率(g/MJ, CO_2) | 25.30 | 李向林等 ^[18] | 25.00 | 陈灵攀等 ^[19] |
| K | 群体消光系数 | 0.30 | 李向林等 ^[18] | 0.35 | 杨春华等 ^[20] |
| LAI | 最大叶面积指数 | 5.00 | 李向林等 ^[18] | 6.00 | 杨春华等 ^[20] |

2.2 模型的检验

采用标准差($RMSE$)、相对标准差($NRMSE$)对年总产量模拟值与统计值的符合度进行统计分析。

$RMSE$ 、 $NRMSE$ 的计算方法如下公式 9 和公式 10。 $NRMSE$ 可以很好的反映模拟值的预测性, $NRMSE$ 值小于 10% 表示模拟值与实际观测值一致性非常

好,10%~20%表示较好,20%~30%表明模拟效果一般, $NRMSE$ 值大于30%表明模拟值与实际值偏差大,模拟效果差^[21]。

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$NRSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} / \bar{O} \quad (10)$$

式中: O_i 、 P_i 分别为统计值和模拟值; n 为样本容量; \bar{O} 为统计平均值。

表2 收割期模拟

Table 2 Simulation for harvest date

| 收割时间 | 多花黑麦草 | | 扁穗牛鞭草 | |
|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 模拟值 | 实际值 | 模拟值 | 实际值 |
| 第1收割期 | 1月22日 | 1月23日 | 5月10日 | 5月10日 |
| 第2收割期 | 3月10日 | 3月10日 | 6月30日 | 6月30日 |
| 第3收割期 | 5月13日 | 5月15日 | 8月13日 | 8月13日 |
| 第4收割期 | | | 10月10日 | 10月15日 |

3.2 干物质积累动态模拟

以牛鞭草和多花黑麦草生产试验资料作为模型输入,模拟群体地上部生物量的动态变化,并与实测值进行比较(图1和图2)。结果显示,模拟的地上部干质量动态与实测值基本一致。说明所建模型模拟多花黑麦草和扁穗牛鞭草生物量的变化是可行的。

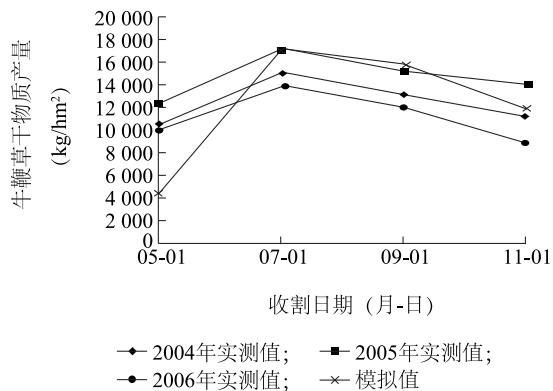


图1 扁穗牛鞭草干物质产量季节动态

Fig. 1 Seasonal production profile of whipgrass dry matter

3.3 产量模拟验证

综合了雅安牧草年干物质产量数据的统计分

3 结果与分析

3.1 牧草收获期模拟

从模拟结果看,各茬的收割期的模拟结果与实际情况吻合较好(表2)。在几次收割日期的预测中,预测出现日期与实际的出现日期中牛鞭草的模拟结果较好,仅在最后一次收获期相差较大;多花黑麦草的收割期模拟基本一致。说明将牧草的收获日期按照积温来计算是合理的,反映了牧草生长发育的一般规律。

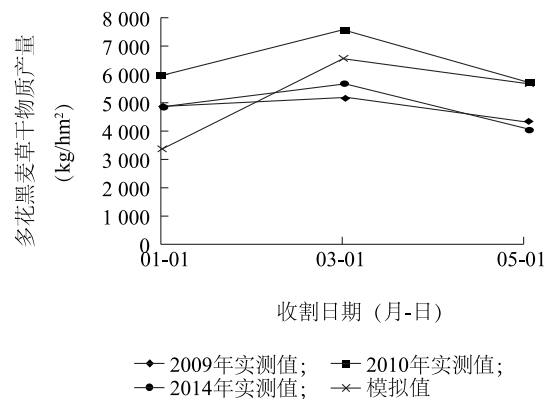


图2 多花黑麦草干物质产量季节动态

Fig. 2 Seasonal dry matter production profile of ryegrass

析,多花黑麦草年总产量实测值与模拟值的标准差($RMSE$)为1 289 kg/hm²,相对标准差($NRMSE$)为13.9%;扁穗牛鞭草年总产量实测值与模拟值的标准差($RMSE$)为147 kg/hm²,相对标准差($NRMSE$)为11.5%。说明模型可较准确地模拟多年生黑麦草和扁穗牛鞭草的年总产量。

统计四川省攀枝花、洪雅、广元、达川、绵阳、凉山等地不同年份多花黑麦草生产实际数据的相关文

献^[22-26];雅安、洪雅、南充等地的扁穗牛鞭草生产数据^[17, 27-28]。将实际产量多年平均值和模型的模拟结果做回归分析,结果显示模拟产量与实测产量相接近,具有较好的一致性。回归分析结果显示,多花黑麦草实际产量与模拟产量相关系数为0.967 9。扁穗牛鞭草的实际产量与模拟产量相关系数为0.825 4。

3.4 牧草产量区划

根据收集到的气象站点数据,本试验运用 ForPASM 对四川 26 个站点的多花黑麦草和扁穗牛鞭草,江苏省 11 个站点多花黑麦草的产量进行模拟。并将模型模拟的年产量绘制成产量分布图,即基于站点的产量数据用 ArcGIS10.2 软件的空间 Kriging 插值的方法绘图,分别得到四川省多花黑麦草和扁穗牛鞭草的产量分布图,以及江苏省多花黑麦草产量分布图。如图 3、图 4 和图 5 所示,多花黑麦草在川西南地区生长较好,成都平原次之,最高产量可达 21 500 kg/hm²,而在四川西部和北部等地长势较差。江苏省地势较为平坦,多花黑麦草各地产量差异较小,产量在 15 650 ~ 16 500 kg/hm²。扁穗牛鞭草在成都平原地区生长较好,最高产量可达 65 500 kg/hm²,在川西北地区的长势较差。

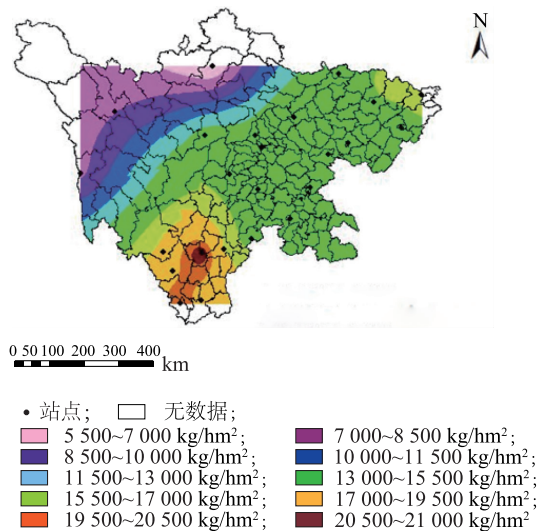


图 3 四川省多花黑麦草年干草产量分布图

Fig. 3 Annual dry matter distribution of ryegrass in Sichuan

4 讨论

从模型模拟结果看,多花黑麦草和扁穗牛鞭草刈割期模拟效果均较好;牧草总产量的模拟效果较

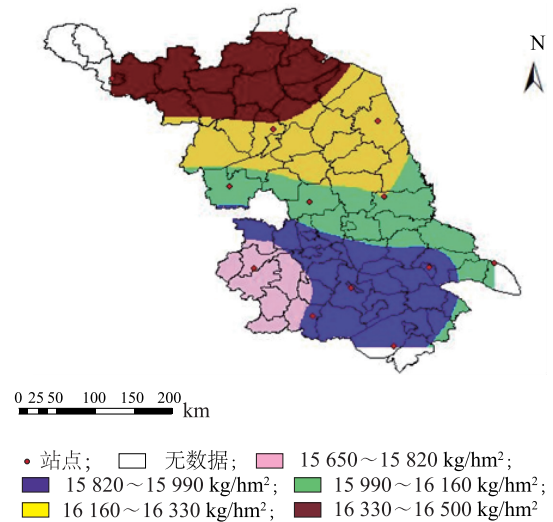


图 4 江苏省多花黑麦草年干草产量分布图

Fig. 4 Annual dry matter distribution of ryegrass in Jiangsu

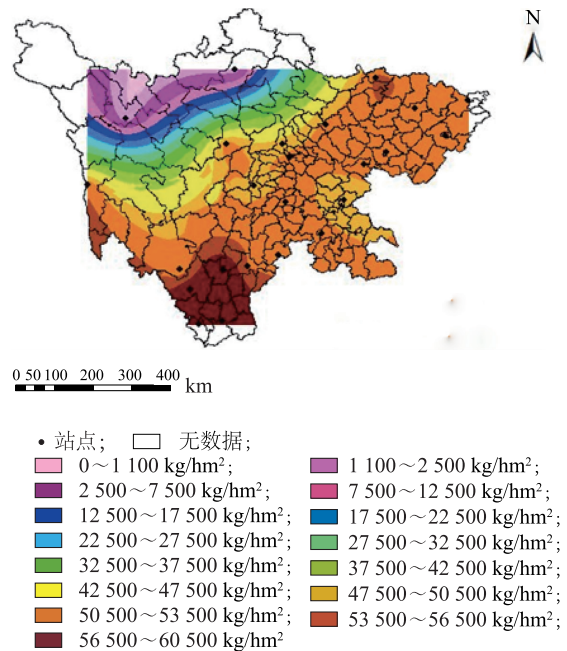


图 5 四川省扁穗牛鞭草年干物质产量分布图

Fig. 5 Annual dry matter distribution of whipgrass in Sichuan

好,而第一茬产量低于实际产量,可能是由于牧草的起始生长温度低于模型的预设值。本研究所建立的牧草生长发育模拟模型只是一个初步的尝试,由于牧草生产只考虑了气候潜在生产力,还有很多不足之处需进一步完善。首先模型没有考虑土壤营养状况、病虫害、田间管理措施等对牧草生长发育及产量

动态的影响。其次由于牧草实际生产数据的缺乏,对于其他多年生和一年生的冷季型牧草和暖季型牧草的模拟,还有待于进一步的研究。另外,本研究只考虑了牧草刈割利用,没有考虑放牧利用和其他利用方式,这样就影响到模型的实用性和普适性。

参考文献:

- [1] BEHRMAN K D, KINIRY J R, WINCHELL M. et al. Spatial forecasting of switchgrass productivity under current and future climate change scenarios [J]. *Ecological Applications*, 2013, 23 (1):73-85.
- [2] BONESMO H, BELANGER G, CHARMLEY E. et al. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model. III Validation for eastern Canada [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(1):32-40.
- [3] JOHNSON I R. DairyMod and the SGS pasture model: a mathematical description of the biophysical model structure[M]. Dorrego:IMJ Consultants, 2013.
- [4] BARRETT P D, LAIDLAW A S, MAYNE C S. GrazeGro: a European herbage growth model to predict pasture production in perennial ryegrass swards for decision support [J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 23(1):37-56.
- [5] PERSSON T, HÖGLIND M, GUSTAVSSON A M. et al. Evaluation of the LINGRA timothy model under Nordic conditions [J]. *Field Crops Research*, 2014, 161:87-97.
- [6] 高亮之, HANNAWAY B D. 苜蓿生产的农业气候模拟模式——ALFAMOD [J]. *江苏农业学报*, 1985, 1(2):2-10.
- [7] 白文明, 左 强, 李保国, 等. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系吸水模型[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(4):431-437.
- [8] 白文明, 包雪梅. 乌兰布和沙区紫花苜蓿生长发育模拟模型研究[J]. *生态学报*, 2002, 13(12):1605-1609.
- [9] 朱玉洁. 紫花苜蓿生长模拟模型(ALFASM)研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [10] 朱玉洁, 冯利平, 易 鹏, 等. 紫花苜蓿光合生产与干物质积累模拟模型研究[J]. *作物学报*, 2007, 33(10): 1682-1687.
- [11] 张明艳. 紫花苜蓿生长模拟模型及可视化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [12] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS) [J]. *江苏农业学报*, 2000, 16(2):65-72.
- [13] 高亮之, 金之庆, 黄 耀, 等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [14] 杨文轩. 多花黑麦草品种间杂交 F₂ 代分子标记形态性状分析及品种(系)生产性能评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [15] 罗永聪. 多花黑麦草品种(系)农艺性状综合评价及 SSR 指纹图谱构建[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [16] 陈永霞, 张新全, 杨春华, 等. 扁穗牛鞭草新品种选育及栽培技术[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(3):109-112.
- [17] JEFFREY G V, NELSON C J. Environmental Aspects of Forage Management[M]// ROBERT F B, NELSON C, JERRY M C, et al. *Forage (Volume I)*. Ames: Iowa State Press, 2003:100.
- [18] 李向林, 万里强, 杨春华, 等. 南方草地研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] 陈灵鸷, 杨春华, 傅鲜桃, 等. 扁穗牛鞭草光合特性研究[J]. *四川农业大学学报*, 2007, 25(4):484-488.
- [20] 杨春华. 扁穗牛鞭草混生种互作生理生态机理[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004.
- [21] MICHELE R, NICOLA L, ZINA F. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 78: 17-30.
- [22] 何光武. 多花黑麦草两个引进品种的比较及区域性试验[J]. *四川畜牧兽医*, 1994(3):25-27.
- [23] 文建国, 杨应东. 攀枝花干热河谷地带多花黑麦草引种试验[J]. *草业与畜牧*, 2013(3):4-7.
- [24] 何 峰, 李向林, 白静仁, 等. 四川低山丘陵区冷季型牧草引种试验[J]. *草地学报*, 2006, 14(1):89-91.
- [25] 何光武, 张瑞珍, 何丕阳, 等. 冬牧 70 黑麦和特高多花黑麦草产草量比较[J]. *四川草原*, 2006(3):21-23.
- [26] 杨成勇, 张瑞珍, 胡 萍, 等. 广元市多花黑麦草品比试验[J]. *草业与畜牧*, 2006(11):24-27.
- [27] 朱永群, 张新全, 杜周和, 等. 扁穗牛鞭草在川东北地区的适应性研究[J]. *西南农业学报*, 2009, 5(22):1432-1434.
- [28] 胡宗达, 叶 充, 胡庭兴, 等. 扁穗牛鞭草生长状况及其对土壤养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(2):120-123.

(责任编辑:袁 伟)