

黄土高原不同类型旱区苜蓿草地水分生产潜力与土壤干燥化效应模拟^{*}

李军^{1,2*} 陈兵^{1,3} 李小芳¹ 邵明安² 程积民²

(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, 陕西杨凌 712100 ³海南农垦科技创新中心, 海口 570206)

摘要 在模型验证和数据库组建基础上, 用 WinEPIC模型定量模拟研究了黄土高原半湿润区长武、半干旱区固原和半干旱偏旱区海原 20~30年内苜蓿草地水分生产潜力、10 m 土层土壤有效含水量和土壤湿度剖面分布特征的动态变化. 结果表明: 长武、固原和海原苜蓿草地水分生产潜力模拟值随降水量变化而呈现波动性降低趋势, 其平均值分别为 8181、3183和 2148 # hm⁻²; 长武、固原和海原苜蓿草地 10 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值均呈现明显的波动性降低趋势, 模拟初期, 4~8年生苜蓿草地土壤干燥化趋势十分强烈, 此后, 随降水量变化长期在较低水平上波动; 随着苜蓿生长年限的延长, 苜蓿草地土壤干层逐年加深、加厚, 长武、固原和海原土壤干层分布深度达到 10 m 所需时间依次为 6、6和 4年, 此后苜蓿草地降水渗透以下土层长期维持较为稳定的干燥化状态; 苜蓿草地水分持续利用的合理年限为半湿润区 8~10年, 半干旱区 6~8年, 半干旱偏旱区 4~6年.

关键词 黄土高原 苜蓿草地 水分生产潜力 土壤干燥化 WinEPIC模型 模拟
文章编号 1001-9332(2007)11-2418-08 **中图分类号** S1521.7 **文献标识码** A

Water potential productivity and soil desiccation effect of alfalfa grasslands in different type arid areas of Loess Plateau: A simulation study. LI Jun^{1,2}, CHEN Bing^{1,3}, LI Xiaofang¹, SHAO Ming'an², CHENG Jizhen² (¹College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100 Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Scientific and Technological Innovation Center of Farm Management of Hainan, Haikou 570206, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(11): 2418-2425

Abstract Based on model validation and database establishment, the dynamic changes of water potential productivity, available water amount in 0-10 m soil layer, and moisture distribution in soil profiles on the alfalfa grasslands at Changwu of semihumid area, Guyuan of semiarid area, and Haiyuan of semiarid prone drought area on Loess Plateau were simulated with WinEPIC model in a 20-30 years period. The results showed that the simulated water potential productivity of alfalfa grasslands at Changwu, Guyuan and Haiyuan fluctuated but declined with precipitation, and the mean value was 8 181, 3 183 and 2 148 # hm⁻², respectively. The simulated monthly available water amount in 0-10 m soil layer also declined obviously but with fluctuation. On the 4-8 years old alfalfa grasslands, soil desiccation was quite serious, and soil available water amount fluctuated at low level with precipitation for a long period. With the increasing year of alfalfa growth, the thickness and distribution depth of desiccated soil layer increased gradually, and the duration for the desiccated soil depth over 10 m was 6 years at Changwu, 6 years at Guyuan, and 4 years at Haiyuan. After then, the soil layer beneath rainfall infiltration depth lasted permanently in a desiccated status. The reasonable duration for water sustainable use on alfalfa grasslands was 8-10 years on semihumid area, 6-8 years on semiarid years, and 4-6 years on semiarid prone drought area.

Key words Loess Plateau, alfalfa grassland, water potential productivity, soil desiccation, WinEPIC model, simulation.

* 国家自然科学基金项目 (40371077, 30771280, 30471024)、黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室开放基金资助项目 (105012180).

** 通讯作者. E-mail: junl@nwsuaf.edu.cn

2007-10-12 收稿, 2007-10-22 接受.

1 引言

黄土高原是中国北方典型的旱作农业和农牧交错区。紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是黄土高原广泛栽培的多年生豆科牧草。由于苜蓿生长年限较长、根系分布较深、耗水强度较大, 苜蓿草地深层土壤水分过耗和土壤干燥化现象突出, 导致了旱作苜蓿草地水分生产力衰退和土壤水分生态环境恶化^[1-3 15 25]。土壤干燥化是黄土高原旱作生态系统中独特的土壤水文现象, 是由于自然降水、土壤贮水和林草耗水关系失衡, 导致土壤水库深层贮水量显著降低, 并最终形成明显的土壤干层^[15-16 22-23]。土壤干层具有较低的土壤含水量范围, 位于降水渗深以下土体部位, 具有相对持久性、易引起人工林草生长衰败、干层土壤湿度恢复缓慢等基本特征^[1, 7, 17, 22-23]。目前, 国内外利用作物模拟模型, 定量模拟研究 1 年生粮食作物产量和水分利用规律的报道较多^[12, 18], 针对黄土高原苜蓿草地生产力和土壤干燥化效应的研究主要集中于苜蓿草地产草量变化和土壤水分利用、土壤水分过耗与恢复特征、生产力动态和土壤水分环境演变、土壤水分剖面分布特征、土壤水分过耗量、土壤干燥化强度、土壤干层厚度和土壤干层消除所需时间等方面^[12, 5, 9, 16, 19, 24], 但对多年生苜蓿草地生产力演变和土壤水分利用动态的有关定量模拟研究报道尚不多见。鉴于苜蓿草地水分生产力和深层土壤水分动态变化的长周期定位试验观测难度较大, 本研究采用 W inEPIC 模型, 定量模拟黄土高原不同类型旱区旱作苜蓿草地水分生产潜力和土壤水分变化的动态, 揭示较长时段内苜蓿草地水分生产力和土壤干燥化效应, 为黄土高原苜蓿草地土壤水分持续利用和人工草地建设提供科学依据。

2 研究方法

2.1 W inEPIC 模型简介

侵蚀和生产力影响计算模型 EPIC (erosion productivity impact calculator), 现在改称为环境政策综合气候模型 (environmental policy integrated climate), 是美国研制的定量评价/气候土壤作物管理综合系统的动力学模型, 由气象模拟、水文学、侵蚀泥沙、营养循环、农药残留、作物生长、土壤温度、土壤耕作、经济效益和作物环境控制等模块组成, 其多作物通用生长模拟模块包含 70 余种作物类型, 能够以天为时间步长, 定量模拟农田水土资源和作物生产力长周期动态变化过程, 可用来评价农田

作物生产管理策略和水土资源环境效应^[20-21]。本研究采用的 W inEPIC 3060 版是能在 Windows 环境下运行的、用户界面友好的新一代 EPIC 模型, 适用于作物生产系统综合性模拟分析和应用研究。1 模型中土壤水分动力学过程描述比较细致, 可以输出逐日分层土壤水分模拟结果, 适合于旱地土壤水分生态环境效应的模拟和分析^[4 18]。有关 EPIC 模型中的数学模拟原理、参数修订、数据库组建及其应用研究参见文献^[8 10-14]。

2.1.2 W inEPIC 模型验证

由于缺乏黄土高原不同类型旱区苜蓿草地产草量和深层土壤水分的长期定位试验同步观测数据, 本文仅以长武试区长期定位试验中苜蓿产草量观测值和固原试区长期定位试验中苜蓿草地深层土壤水分观测值为依据, 分别验证 W inEPIC 模型对苜蓿生产力和土壤水分利用的模拟精度。在黄土高原 EPIC 模型逐日气象数据库和土壤数据库组建以及作物参数数据库修订的基础上^[14], 应用 W inEPIC 模型模拟分析了长武试区 1986) 1998 年苜蓿产草量, 并与长武试区苜蓿产草量数据^[16]比较, 苜蓿产量模拟值和观测值变化趋势基本一致 (图 1a), 其平均值分别为 9122 和 9114 # hm⁻², 相对误差为 0.186%, 相关系数为 0.18502, 达到极显著水平。在苜蓿生长初期, 土壤水分供应充足, 苜蓿产量模拟值高于实测值; 在苜蓿生长的中后期, 出现干旱胁迫后, 苜蓿产量模拟值稍低于实测值。

应用 W inEPIC 模型模拟了固原试区 1990) 1997 年苜蓿草地 0~8 m 土层逐年土壤有效水分含量, 并与 1991、1993、1995 和 1997 年苜蓿草地 8 m 土壤有效含水量观测值^[2]比较 (图 1b), 模拟值和观测值平均分别为 40219 和 44015 mm, 相对误差 -81.54%, 11 年期间土壤水分模拟值和观测值变化趋势变化基本类似, 相关系数为 0.19028, 达到了显著水平。在苜蓿生长初期, 土壤水分供应充足, 苜蓿草地土壤有效含水量模拟值稍高于实测值; 在苜蓿生长的中后期, 出现干旱胁迫后, 苜蓿草地土壤有效含水量模拟值低于实测值。

2.1.3 模拟方法

选择陕西省长武县、宁夏回族自治区固原县和海原县分别代表黄土高原南部半湿润区、中部半干旱区和北部半干旱偏旱区, 组建了长武 (1957) 2001 年)、固原 (1957) 2001 年) 和海原 (1958) 2001 年) 3 个气象台站的逐日气象数据库, 长武的黑垆土、固原的细黄土和海原的黄绵土 3 种土壤剖面土壤理化

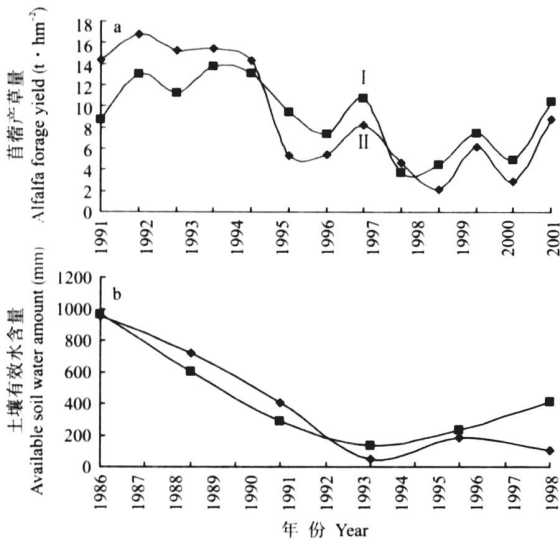


图 1 长武苜蓿草地产草量 (a)和固原苜蓿草地土壤有效含水量 (b)模拟(\hat{N})与观测值(\hat{O})
 Fig 1 Comparison of simulated (\hat{N}) and observed (\hat{O}) alfalfa forage yield (a) at Changwu and available soil water (b) of alfalfa grasslands at Guyuan

性状数据库,以及长武、固原和海原苜蓿草地田间管理数据库.在苜蓿水分生产潜力模拟研究中,苜蓿草地无氮磷胁迫只对土壤水分胁迫有响应,长武苜蓿草地每年刈割3次,固原和海原每年刈割2次,苜蓿草地最大根系分布深度均设置为10m,土壤剖面分为0~0.101m、0.101~1m、1~2m、2~3m、3~4m、4~5m、5~6m、6~7m、7~8m、8~10m等10个土层.在长武1970~1999年连续30年种植和利用苜蓿草地(即生长年限为30年)、固原和海原1970)1989年期间连续20年种植和利用苜蓿草地(即生长年限为20年)条件下,分别模拟各类型区苜蓿草地水分生产力年度变化、草地10m土层逐月土壤有效含水量变化动态,并在模型输出的逐日分层土壤湿度模拟数据中,选择每年7月15日10m土层的分层土壤湿度值,分析草地土壤湿度剖面分布的年度动态变化.

2.14 数据处理

采用 SAS软件和 Excel软件进行数据处理和统计分析.

3 结果与分析

3.1 苜蓿草地水分生产潜力

由图2可以看出,1970)1999年长武降水量为296~8221.2mm,平均值为5751.8mm,标准差13310mm,变异系数为231%,30年内呈明显波动性下降趋势.在1970)1999年实时气象条件下,长武苜蓿

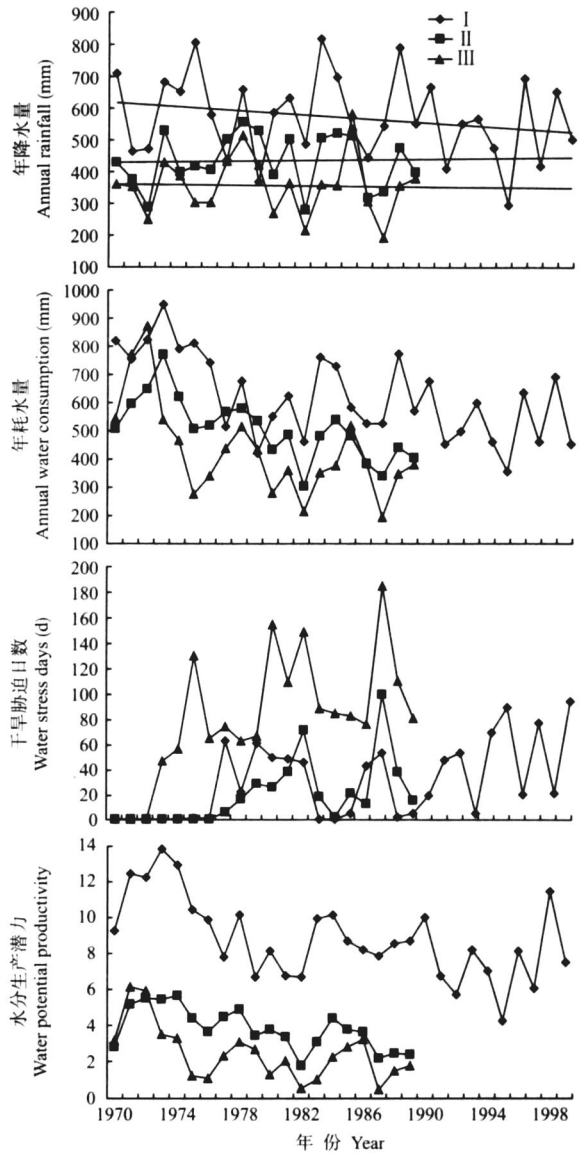


图 2 不同地区年降水量、苜蓿草地年耗水量、干旱胁迫日数和水分生产潜力的模拟值动态变化
 Fig 2 Changes of annual rainfall simulated annual water consumption water stress days and water potential productivity of alfalfa grasslands at different area
 N̂: 长武 Changwu; Ô: 固原 Guyuan; Ô: 海原 Haiyuan. 下同 The same below.

草地水分生产潜力模拟值为4125~13181 $\# \text{hm}^{-2}$,平均值8181 $\# \text{hm}^{-2}$,标准差2125 $\# \text{hm}^{-2}$,变异系数251%,随降水量变化呈波动性下降趋势.其中,1970)1976年间的1~7年生苜蓿草地水分生产潜力平均值为11154 $\# \text{hm}^{-2}$,苜蓿生长过程中无干旱胁迫;1977)1999年间的8~30年生苜蓿草地水分生产潜力平均值为7197 $\# \text{hm}^{-2}$,平均干旱胁迫日数为39d.在30年连续生长期中,苜蓿草地年耗水量35318~94514mm,平均值62118mm,高出当地年降水量值46mm,标准差14912mm.1~7年生苜蓿草地年均耗水量高达81110mm,而8~30年生仅

为 56413 mm, 年耗水量与降水量同步波动性降低。

固原 1970) 1989 年降水量为 28211~56014 mm, 平均值 43619 mm, 标准差 8614 mm, 变异系数为 1918%, 20 年间降水量略呈波动上升趋势。在 1970) 1989 年 20 年实时气象条件下, 固原苜蓿草地水分生产潜力模拟值为 1181~5165 t # hm⁻², 平均值为 3183 t # hm⁻², 标准差 1115 t # hm⁻², 变异系数 3012%。1971) 1975 年期间的 2~6 年生苜蓿草地产量最高, 平均值为 5124 t # hm⁻², 标准差 0149 t # hm⁻², 变异系数为 913%, 此期间苜蓿生长没有遭遇干旱胁迫。7 年生以后苜蓿草地水分生产潜力波动性下降, 1976) 1989 年苜蓿草地水分生产潜力平均值只有 3139 t # hm⁻², 标准差 0191 t # hm⁻², 变异系数为 2618%, 苜蓿草地产量波动性增大。此期间草地土壤干旱胁迫日数急剧增大, 1980) 1989 年干旱胁迫日数平均为 34 d 1987 年最高达 101 d 在 20 年连续生长期, 苜蓿草地年耗水量 30314~76716 mm 平均值 50617 mm, 高出当地年降水量值 6918 mm, 标准差 10817 mm。1~5 年生苜蓿草地年均耗水量高达 62715 mm, 6~20 年生仅为 46615 mm, 苜蓿草地年耗水量与降水量同步波动并剧烈降低。

海原 1970) 1989 年降水量为 19415~58716 mm, 平均值 35910 mm, 标准差 9414 mm, 变异系数 2613%, 也呈波动性减少趋势。1970) 1989 年实时气象条件下, 海原苜蓿草地水分生产潜力模拟值为 0150~6111 t # hm⁻², 平均值为 2148 t # hm⁻², 标准差 1153 t # hm⁻², 变异系数 6118%。1970) 1974 年期间的 1~5 年生苜蓿草地水分生产潜力较高, 平均值为 4141 t # hm⁻², 2 年生和 3 年生苜蓿草地产草量最高, 分别达到 6111 和 5191 t # hm⁻², 6 年生 (1975 年) 以后苜蓿草地水分生产潜力在较低水平上随降水量变化而波动, 15 年平均值仅为 1184 t # hm⁻²。模拟期间, 苜蓿草地干旱胁迫日数为 0~187 d 平均每年 82 d 其中 1~3 年生苜蓿草地无干旱胁迫, 4 年生之后平均每年干旱胁迫日数高达 96 d 在 20 年连续生长期, 苜蓿草地年耗水量 19510~86915 mm, 平均值 42819 mm, 高出当地年降水量值 6919 mm, 标准差 16714 mm。1~4 年生苜蓿草地年均耗水量高达 68010 mm, 而 5~20 年生仅为 36611 mm 与当地年均降水量相当, 苜蓿草地年耗水量也与降水量同步波动并剧烈降低。

312 苜蓿草地 10 m 土层土壤有效水含量

段内, 长武苜蓿草地 10 m 土层逐月土壤有效水含量模拟值在 015~147015 mm 范围内剧烈波动, 360 个月平均值为 21819 mm, 标准差为 34218 mm, 变异系数为 15616%。1~8 年生 (1970) 1977 年) 苜蓿草地 10 m 土层土壤有效水含量呈显著的逐年降低趋势, 由 1970 年的 139714 mm 迅速减少到 1977 年的 9615 mm, 平均每年减少 18518 mm, 表明南部旱塬 8 年生苜蓿草地 10 m 土层土壤干燥化速度为每年 18518 mm, 此期 10 m 土层逐月有效水含量平均值为 62316 mm, 标准差为 46119 mm, 变异系数为 7411%。受降水量年度和季节变化的影响, 9~30 年生苜蓿草地 10 m 土层土壤有效水含量在 015~18512 mm 水平上波动, 丰水年高于干旱年, 雨季高于旱季, 平均值为 7117 mm, 标准差为 4217 mm, 变异系数为 5913%。

在 1970) 1989 年模拟研究时段内, 固原苜蓿草地逐月 10 m 土层土壤有效水含量模拟值为 315~145111 mm, 240 个月平均值 29610 mm, 标准差 42916 mm, 变异系数 14511%。1970) 1977 年为苜蓿生长旺盛和强烈耗水阶段, 草地 10 m 土层土壤有效水含量呈现明显逐年降低趋势, 由 1970 年 141313 mm 降低到 1977 年 11515 mm, 平均每年减少 18514 mm, 即半干旱区固原 8 年生苜蓿草地平均土壤干燥化速度为 18514 mm # a⁻¹。1978) 1989 年期间 9~20 年生苜蓿草地 10 m 土层土壤有效水含量变化在 315~12413 mm 范围内随降水量年度和季节变化而波动, 平均值为 4615 mm。

海原 1970) 1989 年苜蓿草地 10 m 土层逐月土壤有效水含量模拟值为 -417~140916 mm, 平均值 16913 mm, 标准差 36715 mm, 变异系数 21711%。1~4 年生 (1970) 1973 年) 苜蓿草地 10 m 土层有效水含量由 1970 年 134012 mm 迅速降低到 1973 年 12818 mm, 年均减少 40318 mm, 苜蓿草地干燥化进程十分强烈。5~20 年生苜蓿草地 10 m 土层年平均有效水含量在 -417~10212 mm 范围内较低水平上波动, 平均值仅为 2119 mm, 在干旱型多次出现了逐月土壤湿度低于凋萎湿度的情况, 其中 1987 年降水量只有 19415 mm, 为特大干旱型, 苜蓿草地 10 m 土层土壤有效水含量全年平均值为 016 mm, 全年有 6 个月土壤湿度低于凋萎湿度。表明半干旱偏旱区 5 年生以后苜蓿草地干旱胁迫程度十分严重, 是导致苜蓿草地水分生产力和生长衰败的主要原因。

由图 3 可以看出, 在 1970) 1999 年模拟研究时

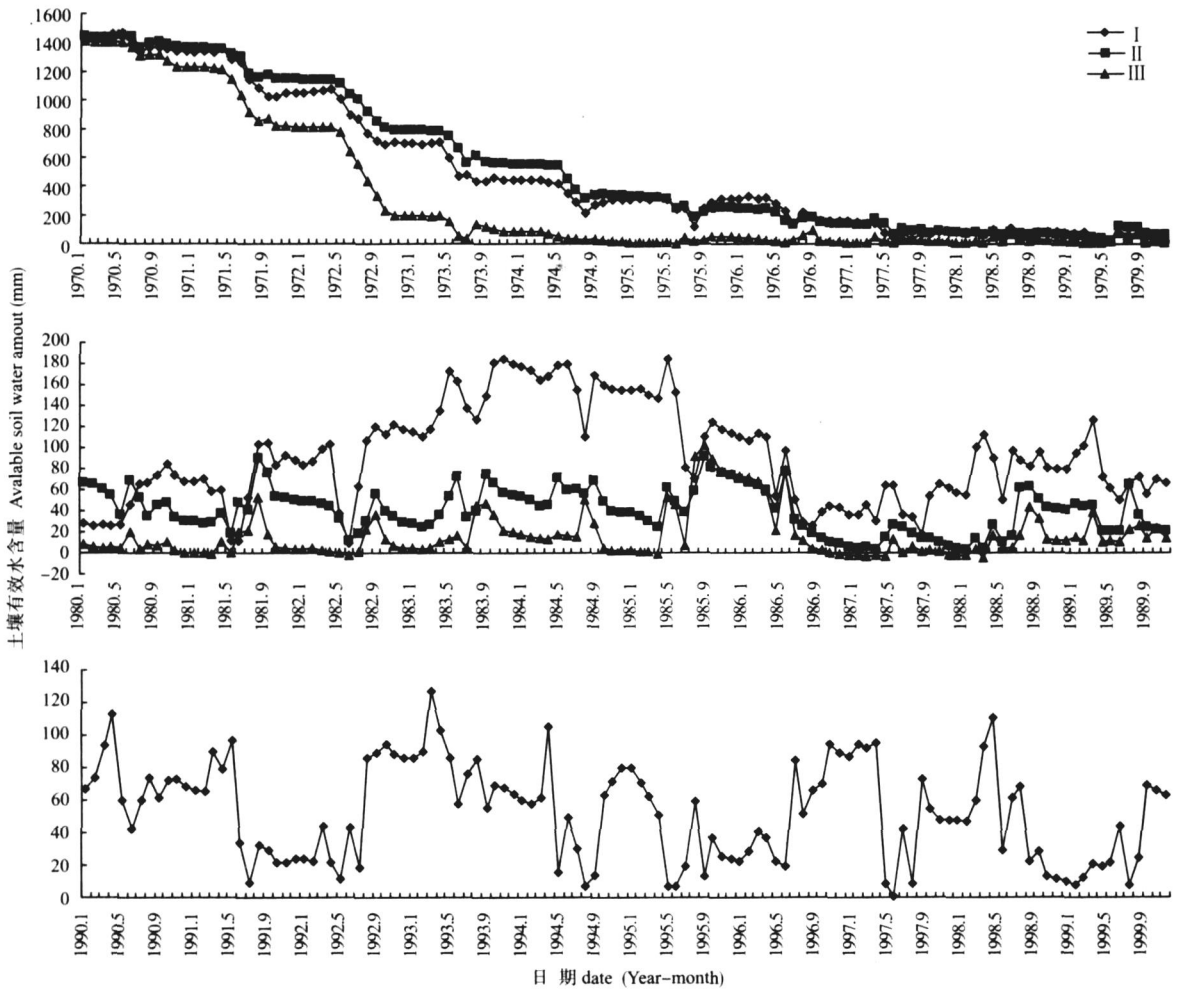


图 3 不同地区苜蓿草地 10 m 土层逐月土壤有效水含量模拟值

Fig 3 Simulated monthly available soil water amount change in 10 m soil layers of alfalfa grassland at Changwu Guyuan and Haiyuan

3.1.3 不同生长年限苜蓿草地土壤湿度剖面分布

由图 4 可以看出, 随着苜蓿生长年限延长和苜蓿根系下扎, 长武苜蓿草地土壤干层逐年加深和加厚, 1 年生苜蓿草地土壤干层最大分布深度超过 1 m, 2 年生超过 2 m, 3 年生超过 5 m, 4 年生超过 8 m, 5 年生超过 9 m, 6 年生超过 10 m, 6~8 年生 8~10 m 土层土壤湿度继续降低。8 年生以后, 除 0~2 m 土层土壤湿度年际变化较为明显外, 2~10 m 深层土壤湿度基本稳定, 含水量维持在每米土层 12 mm 左右, 接近土壤凋萎湿度, 表明苜蓿草地 2~10 m 土层已经全部干燥化。

在长武 1970) 1999 年的 30 年模拟试验中, 不同降水年型下苜蓿草地土壤湿度和降水入渗深度差异明显。1983 年为特大丰水年型, 降水量高达 8221.2 mm, 1995 年为特大干旱年型, 降水量只有 296 mm。1983 年雨季前 4 月 0~1 m 土层土壤湿度平均值为 $0.1249 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$, 雨季中 8 月降低到 $0.1152 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$ 。

雨季后 11 月又恢复到 $0.1273 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$ 。1983 年苜蓿草地降水补给深度达到了 1 m, 0~1 m 土层土壤湿度平均值明显高于下层 1~10 m 土层土壤湿度平均值 $0.1111 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$, 雨季降水对草地土壤水分的补给作用十分明显(图 5)。1995 年苜蓿草地土壤干燥化程度加剧, 0~0.15 m 土层土壤湿度平均值从 4 月的 $0.1150 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$, 增加到 8 月的 $0.1200 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$, 11 月又降低到 $0.1126 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$ (图 5)。1995 年苜蓿草地降水补给深度仅为 0~0.13 m 土层, 雨季后 11 月 0~0.13 m 土层土壤湿度平均值只有 $0.1130 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$, 只稍高于下层 0.13~1.0 m 土层土壤湿度平均值 $0.1111 \text{ m}\# \text{ m}^{-1}$ 。

固原 1~10 年生 (1970) 1979 年) 苜蓿草地土壤干层最大分布深度逐年向下延伸, 1 年生苜蓿草地超过 1 m, 2 年生超过 2 m, 3 年生超过 4 m, 4 年生超过 7 m, 5 年生超过 8 m, 6 年生超过 10 m, 7 年生 8~10 m 土层干燥化程度进一步加强, 8 年生以后 2

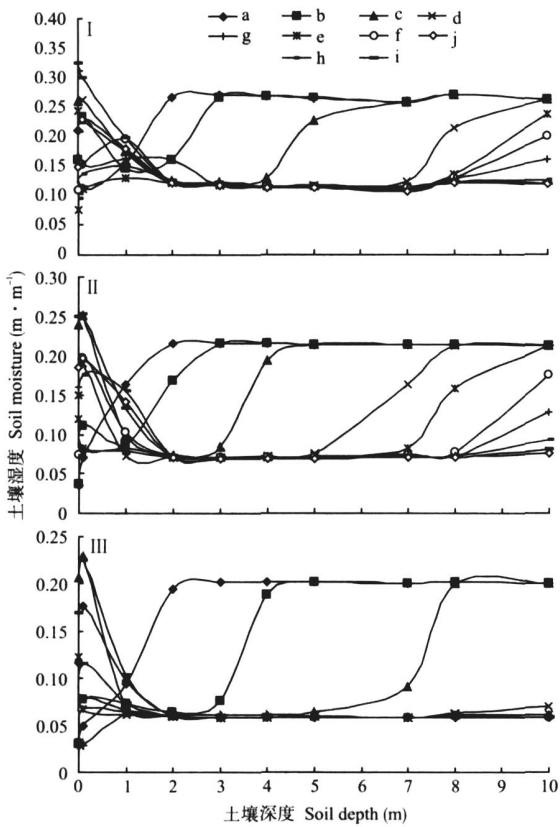


图 4 不同地区和不同生长年限苜蓿草地 10 m 土层土壤湿度剖面分布

Fig 4 Soilmoisture distributions in 0- 10m soil layers of different growth age alfalfa grasslands at Changwu, Guyuan and Haiyuan

a~ j) 1年生~ 10年生 f 10 years old

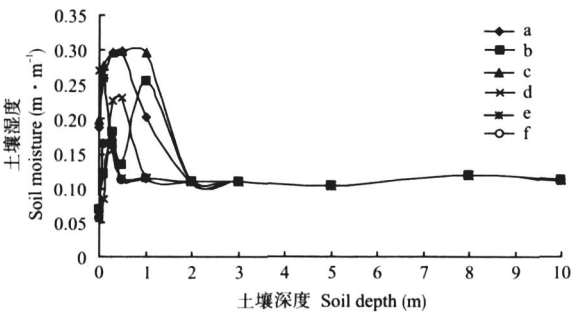


图 5 长武不同降水年型苜蓿草地土壤湿度季节变化与降水入渗深度比较

Fig 5 Seasonal changes of soil moisture and rainfall infiltration depth of alfalfa grassland in different rainfall years at Changwu a) 1983年 4月 Apr 1983; b) 1983年 8月 Aug 1983; c) 1983年 11月 Nov 1983 d) 1995年 4月 Apr 1995; e) 1995年 8月 Aug 1995; f) 1995年 11月 Nov 1995.

~ 10m 土层维持稳定的干燥化状态, 每米土层土壤含水量只有 0.107m 左右, 接近凋萎湿度水平, 只有 0~ 2 m 土层土壤湿度随年度降水而变化, 表明降水对草地湿度的影响深度不超过 2 m. 对固原苜蓿草地 0~ 0.101 m, 0.101~ 0.11 m, 0.11~ 0.13 m, 0.13~ 0.15

m 和 0.15~ 1 m 土层土壤湿度模拟值的剖面分布特征分析表明, 丰水年型降水入渗深度达到了 0.15 m, 而干旱年型只达到 0.13 m.

类似于长武和固原, 海原 1~ 10年生 (1970-1979年) 苜蓿草地土壤干层最大分布深度逐年加深和加厚, 1年生苜蓿草地超过 1 m, 2年生超过 4 m, 3年生超过 7 m, 4年生超过 10 m, 5年生以后 1~ 10 m 土层长期维持稳定的干燥化状态, 每米土层土壤含水量在 5 mm 以下, 只有 0~ 1 m 土壤湿度随年度降水而变化, 在丰水年型降水影响深度才会超过 1 m. 模拟结果表明, 半干旱偏旱区海原苜蓿草地土壤干燥化进程快于半干旱区固原和半湿润区长武.

4 讨 论

本研究首次尝试利用 WinEPIC 模型定量模拟研究黄土高原不同类型旱区苜蓿草地水分生产力和土壤水分变化动态, 模型模拟精度较高, 模拟结果能够较为真实地反映当地苜蓿生产实际情况, 能够得到常规研究方法通常难以获取的大量研究数据, 有助于理解旱作苜蓿草地土壤水分利用对苜蓿生产力的长远影响和土壤水分生态环境效应. WinEPIC 模型的不足之处是: 对土壤剖面最大土层数限制为 10 层, 因而对苜蓿草地 0~ 10 m 土层土壤湿度剖面分布特征描述不够细致; 初始土壤含水量由模型根据土壤物理性质和多年降水量自动估算和设置, 不能自由更改和设置初始土壤含水量.

模拟结果表明, 长武 30年生、固原和海原 20年生苜蓿草地水分生产潜力模拟值均随生长年限延长和逐年降水量变化而呈现波动性降低趋势, 其平均值分别为 8181、3183 和 2148 $\mu\text{g hm}^{-2}$. 区域间苜蓿草地水分生产潜力差异十分显著, 随着年降水量由长武 570 mm 降低到固原 440 mm 和海原 360 mm, 长武、固原和海原苜蓿草地水分生产潜力依次显著降低, 且长武产量稳定性高于固原和海原. 长武苜蓿草地水分生产潜力模拟值和长武旱塬地轮作与培肥长期定位试验中苜蓿连作小区实测产草量变化动态类似, 均以 2~ 5年生苜蓿草地产草量最高, 并且产草量随着苜蓿生长年限延长和降水量年际变化而呈现逐年波动性降低趋势^[6, 16], 固原和海原苜蓿草地水分生产潜力模拟值变化趋势也与当地不同生长年限苜蓿草地产草量调查值相当^[2, 5].

长武 1~ 7年生、固原 1~ 5年生和海原 1~ 4年生苜蓿草地年均耗水量值分别高达 81110、62715 和 68010 mm, 远高于当地同期年降水量平均值 62716、

40616和34913 mm, 此期苜蓿草地年均土壤水分过耗量分别高达18314、22018和33017 mm, 表明苜蓿生长耗水来源于深层土壤储水和当年降水量的双重供给. 长武7年生、固原5年生和海原4年生苜蓿草地0~10 m土层土壤水分过耗累积量分别为128318、110412和132218 mm, 从而导致苜蓿草地深层土壤水库有效水含量急剧减少, 此后苜蓿生长基本依赖于当年降水供给, 生育期间干旱胁迫程度明显加剧, 导致苜蓿产草量波动性降低. 据李玉山测算^[16], 长武旱塬1986)1997年期间12年生苜蓿草地0~10 m土层年均耗水量58419 mm, 年均土壤水分过耗量7115 mm, 本研究中长武30年生苜蓿草地年均耗水量模拟值高于该观测值, 但年均土壤水分过耗量模拟值低于该观测值.

随着苜蓿草地生长年限的延长, 长武、固原和海原苜蓿草地0~10 m土层逐月土壤有效水含量模拟值均呈现明显的波动性降低趋势, 与苜蓿产草量变化趋势相对应, 模拟初期4~8年生苜蓿草地土壤干燥化趋势十分强烈, 长武8年生、固原8年生和海原4年生苜蓿草地土壤干燥化强度分别为18518、18514和40318 mm#a⁻¹, 此后长期在0~200 mm范围的较低水平上随降水量变化而波动. 与南部旱塬镇原12年生、17年生和25年生苜蓿草地0~10 m土壤有效水含量观测值320、215和223 mm相比, 本研究对苜蓿草地土壤有效水含量模拟值稍低于对应生长年限苜蓿草地的观测值^[9]. 随着生长年限的延长苜蓿草地土壤干层逐年加深和加厚, 土壤干层加厚速度平均值依次为1167、1167和2150 mm#a⁻¹, 土壤干层分布深度达到10 m所需时间依次为6年、6年和4年, 此后苜蓿草地降水渗透以下土层长期维持较为稳定的干燥化状态. 模拟所得苜蓿草地0~10 m土壤湿度剖面分布特征与试验观测结果十分类似, 观测结果表明大约在3年生和5年生时土壤干层深度已经分别超过5和10 m^[5, 9, 16].

根据苜蓿产草量、土壤有效含水量和土壤湿度剖面分布变化模拟结果推断, 黄土高原苜蓿草地水分持续利用的合理年限为半湿润区8~10年, 半干旱区6~8年, 半干旱偏旱区4~6年. 韩仕峰^[5]认为, 半干旱区和半湿润区苜蓿草地利用年限分别以6~7年和9~10年为宜. 超过合理利用年限后, 拟采取粮草轮作和翻耕后雨季休闲等措施来缓解土壤干燥化危害, 维护草地深层土壤水分生态环境的健康.

综上所述, W inEPIC模型能够较为真实地模拟

描述黄土高原苜蓿草地水分生产潜力变化和土壤干燥化效应发生规律. 长武、固原和海原苜蓿草地水分生产力和10 m土层逐月土壤有效含水量模拟值均随生长年限的延长和降水量变化而呈波动性降低趋势, 模拟初期4~8年生苜蓿草地土壤干燥化趋势十分强烈, 此后长期在较低水平上随降水量变化而波动, 随生长年限的延长苜蓿草地土壤干层逐年加深和加厚. 旱作苜蓿草地土壤干燥化危害不可避免, 应合理选择苜蓿草地利用年限, 防止土壤水分生态环境过度恶化.

参考文献

- [1] Chen H2S (陈洪松), Wang K2L (王克林), Shao M2A (邵明安). 2005. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the loess plateau. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 41(4): 155-161 (in Chinese)
- [2] Cheng JM (程积民), Wan H2E (万惠娥), Wang J (王静). 2005. Alfalfa growth and its relation with soil water status in hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 16(3): 435-438 (in Chinese)
- [3] Fan J (樊军), Hao M2D (郝明德), Shao M2A (邵明安). 2004. Deep soil water consumption and water environment on dryland agroecosystem of the loess plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 19(2): 201-206 (in Chinese)
- [4] Gerik TJ, Haman WL, Williams JR, et al. 2003. *User's Guide CroPMAN (Crop Production and Management) Model Version 3.2*. Temple: Texas Blackland Research and Extension Center
- [5] Han SF (韩仕峰). 1990. Soilwater dynamics in alfalfa field at Ningnan mountainous county on Ningxia Autonomous Region. *Pratacultural Science* (草业科学), 7(5): 47-53 (in Chinese)
- [6] Hao M2D (郝明德), Zhang C2X (张春霞), Wei X2R (魏孝荣), et al. 2004. Effect of rotation and fertilization to alfalfa productivity on the loess plateau. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 12(3): 195-198 (in Chinese)
- [7] Huang M2B (黄明斌), Yang X2M (杨新民), Li Y2S (李玉山). 2003. Hydroecological effect of the soil dry layer as affected by biota use in the loess plateau. *Chinese Journal of Ecology* (中国生态农业学报), 11(3): 113-116 (in Chinese)
- [8] Li J (李军). 2005. Simulation equations for soil erosion amount in the EPIC model. *Chinese Scientific and Technological Paper Online* (中国科技论文在线) [2006212230]. <http://www.paper.edu.cn> (in Chinese)
- [9] Li J (李军), Chen B (陈兵), Li X2F (李小芳), et al. 2007. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the loess

- plateau of China Acta Ecologica Sinica (生态学报), 27(1): 75- 89 (in Chinese)
- [10] Li J(李 军), Shao M2A(邵明安), Zhang X2C(张兴昌). 2004 Databases construct for the EPIC model on the loess plateau region Journal of Northwest Sci2Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science) (西北农林科技大学学报# 自然科学版), 32(8): 21- 26 (in Chinese)
- [11] Li J(李 军), Shao M2A(邵明安), Zhang X2C(张兴昌). 2004 Simulation equations for soil water transfer and use in the EPIC model Agricultural Research in the Arid Areas (干旱地区农业研究), 22(2): 72- 75 (in Chinese)
- [12] Li J(李 军), Shao M2A(邵明安), Zhang X2C(张兴昌), et al 2004 Simulation equations for crop growth and yield formation in the EPIC model Journal of Northwest Sci2Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science) (西北农林科技大学学报# 自然科学版), 32(suppl): 25- 30 (in Chinese)
- [13] Li J(李 军), Shao M2A(邵明安), Zhang X2C(张兴昌). 2004 Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamics on rainfed highland of the loess plateau Journal of Natural Resources (自然资源学报), 19(6): 738- 746 (in Chinese)
- [14] Li J(李 军), Shao M2A(邵明安), Zhang X2C(张兴昌), et al 2005 Simulation equations for soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报), 11(2): 166- 173 (in Chinese)
- [15] Li Y2S(李玉山). 1983 Characters of soil water cycling and its influences on land water cycling of the loess region of China Acta Ecologica Sinica (生态学报), 3(2): 92- 101 (in Chinese)
- [16] Li Y2S(李玉山). 2002 Productivity dynamic of alfalfa and its effect on water environment Acta Pedologica Sinica (土壤学报), 39(3): 404- 411 (in Chinese)
- [17] Li Y2Y(李裕元), Shao M2A(邵明安). 2005 Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in north loess plateau of China Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 16(12): 2321- 2327 (in Chinese)
- [18] Texas A & M Black and Research Center 2004 Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1. 0 BRC Report No. 0406
- [19] Wang Z2Q(王志强), Liu B2Y(刘宝元), Lu B2J(路炳军). 2003 A study on water restoration of dry soil layers in the semiarid area of Loess Plateau Acta Ecologica Sinica (生态学报), 23(9): 1944- 1950 (in Chinese)
- [20] Williams JR, Dyke PT, Fuchs WW, et al 1990 EP2IC2Erosion/Productivity Impact Calculator 2 User Manual USDA Agriculture Technical Bulletin, No. 1768
- [21] Williams JR, Jones CA, Kiniry JR, et al 1989 The EPIC crop growth model Transactions of the ASAE, 32(2): 475- 511
- [22] Yang W2Z(杨文治), Shao M2A(邵明安). 2000 Research on Soil Water of the Loess Plateau Beijing Science Press (in Chinese)
- [23] Yang W2Z(杨文治), Tian J2L(田均良). 2004 Essential exploration of soil aridization in loess plateau Acta Pedologica Sinica (土壤学报), 41(1): 1- 6 (in Chinese)
- [24] Zhang C2X(张春霞), Hao M2D(郝明德), Wei X2R(魏孝荣), et al 2004 Soil water distribution characteristics of alfalfa with different planting years in the gully region of loess plateau Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报), 10(6): 604- 607 (in Chinese)
- [25] Zhao Y2Y(赵姚阳), Liu W2Z(刘文兆), Pu L2J(濮励杰). 2005 Effects of alfalfa growth on soil water environment in hilly area of the loess plateau Journal of Natural Resources (自然资源学报), 20(1): 85- 91 (in Chinese)

作者简介 李 军,男,1964年生,博士,教授,博士生导师。主要从事旱区农业生态、高效农作制度和农业生产系统模拟等领域的研究与教学工作,发表论文 60 余篇。E2mail junli@nwsuaf.edu.cn

责任编辑 李凤琴
