

黄土高原不同密度刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟

李 军^{1,2}, 王学春¹, 邵明安², 赵玉娟³, 李小芳¹

(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 黄土高原高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌, 712100)

摘要:应用 WinEPIC 模型模拟研究了 1957 ~ 2001 年期间黄土高原半湿润区长武和半干旱区延安不同密度刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林地水分生产力演变规律和深层土壤干燥化效应。结果: (1) 长武和延安高密度 (6000 株 /hm²)、中高密度 (4500 株 /hm²)、中低密度 (3000 株 /hm²) 和低密度 (1500 株 /hm²) 等 4 种处理刺槐林地逐年生物量模拟值均呈现快速增加、达到最大值后又逐年波动性降低的变化趋势, 林地密度越高早期逐年生物量越高, 后期逐年生物量差异缩小, 两地均以低密度处理逐年生物量平均值和累积生物量模拟值最高; (2) 4 种密度处理 45 年生刺槐林地年均耗水量值基本相等, 长武和延安分别为 603mm 和 566mm, 但生长前期年耗水量明显高于后期, 并高于同期年降水量, 林地密度越高前期耗水量越高, 中期以后各密度处理耗水量基本接近且波动趋势基本一致, 林地密度越高干旱胁迫程度越重; (3) 模拟生长初期, 4 种密度处理刺槐林地 0 ~ 10m 土层逐月土壤有效含水量均呈现强烈的波动性降低趋势, 长武各密度处理刺槐林地分别在 7 ~ 23 年生、延安分别在 7 ~ 17 年生之后逐月土壤有效含水量均在 0 ~ 200mm 较低水平上随降水量变化而波动; (4) 4 种密度处理林地 0 ~ 10m 土层土壤湿度剖面分布年度变化剧烈, 土壤湿度逐年降低且土壤干层逐年加厚, 密度越高土壤干层加厚速度越快, 长武在 26 年生、延安在 17 年生时低密度处理刺槐林地土壤干层厚度均已超过 10m, 此后 2 ~ 10m 土层土壤湿度保持相对稳定的干燥化状态; (5) 长武和延安刺槐林地适宜种植密度分别以 1500 ~ 3000 株 /hm² 和 1500 株 /hm² 为宜, 刺槐林地土壤水分可持续利用最大年限分别为 26a 和 18a。

关键词:黄土高原; 刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林地; 种植密度; 水分生产力; 土壤干燥化; WinEPIC 模型

文章编号: 1000-0933 (2008) 07-3125-18 中图分类号: S152.7, S718.55+6 文献标识码: A

Simulation of water productivity and soil desiccation effects of different planting density black locust forestlands on the Loess Plateau

LI Jun^{1,2}, WANG Xue-Chun¹, SHAO Ming-An², ZHAO Yu-Juan³, LI Xiao-Fang¹

1 College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (7): 3125 ~ 3142

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (40371077, 30471024, 30771280); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10501-180)

收稿日期: 2007-09-24; **修订日期:** 2008-04-02

作者简介: 李军 (1964 ~), 男, 甘肃涇川人, 博士, 教授, 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研究与教学。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371077, No. 30471024 & No. 30771280) and Foundation of State key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau (10501-180)

Received date: 2007-09-24; **Accepted date:** 2008-04-02

Biography: LI Jun, Ph. D., Professor, mainly engaged in agroecology of dryland, high efficient farming system and agricultural production system simulation. E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

Abstract: Water productivity changes and deep soil desiccation effects of different planting density black locust (*Robinia pseudoacacia*) forestlands were simulated with WinEPIC model during 1957-2001 at Changwu on semi-humid areas and Yanan on semi-arid areas of the loess plateau. The simulated results showed that: (1) simulated annual biomass amounts increased rapidly in early growth stage, and then declined obviously with fluctuation when reached its maximum on high planting density (6000 plants/hm²), high medium planting density (4500 plants/hm²), low medium planting density (3000 plants/hm²) and low planting density (1500 plants/hm²) treatment black locust forestlands at Changwu and Yanan. The higher planting density of the forestland had, the higher annual biomass amount could obtain in early growth stage, and differences of annual biomass amounts between four treatments decreased in late growth stage. The highest average annual biomass amount and accumulated biomass amount in four treatments at Changwu and Yanan was low planting density treatment at both locations during 45 years simulation period. (2) Averages of simulated annual water consumption were almost equal on four treatments black locust forestlands at Changwu and Yanan, and its value was 603mm and 566mm separately. Annual water consumptions in early growth stage were obviously much higher than later stage, and it were higher than annual rainfall of the corresponding period. The higher planting density of forestland had, the higher water consumption could have, and water consumption amounts were close to each other and fluctuated simultaneously on four treatment forestlands after middle growth stage on both locations. The higher planting density of forestland had, the severer water stress could have. (3) Simulated monthly available soil water amounts in 0-10m soil profile of four treatment forestlands decreased rapidly with strong fluctuation during early growth stage. Monthly available water amounts on four treatment forestlands fluctuated with annual and seasonal rainfall changes in range of 0-200 mm after 7-23 years growth at Changwu and after 7-17 years growth at Yanan; (4) Annual soil moisture distribution declined acutely, and thickness of desiccated soil layer increased annually in 0-10m soil profile on four treatments forestlands at Changwu and Yanan. The higher planting density of forestland had, the faster increase rate of desiccated soil layer thickness could have. Thickness of desiccated soil layer on low planting density forestland was already over 10m when 26 year old at Changwu and 17 year old at Yanan, and soil moistures in 2-10m soil layers after that year remained steady desiccated status on four treatment forestlands. (5) Reasonable planting density of black locust forestland was 1500-3000 plants/hm² at Changwu and 1500 plants/hm² at Yanan separately, and maximum year for soil water sustainable use was 26 years at Changwu and 17 years at Yanan respectively.

Key Words: the Loess Plateau; black locust forestland; planting density; water productivity; soil desiccation; WinEPIC model

刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 是黄土高原梁峁沟壑地水土保持林建设的主要乔木树种,抗旱耐瘠,速生丰产,在半湿润区和半干旱区均有广泛分布。但通常刺槐造林密度较大,林分生长耗水强烈,深层土壤干燥化严重,衰败低产林面积较大,严重影响人工植被建设成效^[4, 6, 15, 17, 24, 28~32]。有关专家初步调查研究和分析报道了黄土高原各类型区人工刺槐林地土壤干燥化现象^[1~3, 17, 23~25],但对不同种植密度下刺槐林地水分生产力和土壤干燥化状况的定位观测研究报道不多^[14, 22, 34],缺乏对各干旱类型区不同密度刺槐林地水分生产力演变、土壤干燥化强度和区域分布差异的定量评价研究。由于刺槐生长年限较长、根系分布较深,林地生产力和深层土壤水分连续定位观测难度较大,本研究拟采用美国研制的 WinEPIC 模型定量模拟研究黄土高原不同密度下刺槐林地水分生产力演变、深层土壤干燥化动态和区域差异,筛选最佳造林密度,为黄土高原各干旱类型区植树造林和刺槐林地建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 WinEPIC 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由包含多种树木在内的 70 余种作物类型组成, 能够以天为时间步长, 定量模拟水土资源利用和作物生产力长周期动态变化过程, 可用来评价农业生态系统管理策略和水土资源环境效应^[26, 27]。本研究采用的 WinEPIC 3060 版, 是能够在 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, 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, 特别适合于旱地土壤水分生态环境效应的模拟和分析^[15, 21]。有关 EPIC 模型的数学模拟原理、数据库组建、模型验证和应用研究, 参见相关文献^[7~12, 35]。

1.2 模型参数设置

以黄土高原半湿润区长武和半干旱区延安为试点, 利用当地气象和土壤资料连续定量模拟研究了 1957~2001 年期间不同种植密度刺槐林地水分生产力与土壤干燥化效应。逐日气象数据包括逐日太阳辐射量、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、风速等气象要素数据, 来源于长武和延安当地气象台站 1957~2001 年实时观测资料。土壤数据包括长武黑垆土和延安黄绵土等 2 种土壤剖面土壤理化性状数据, 来源于中国土种志和陕西土壤等土壤普查资料^[19, 20]。参照 WinEPIC 模型中其他树木的生长参数并请教模型研发者 J. R. Williams 博士, 构建了刺槐的 40 余种生长参数^[10]。

长武和延安刺槐林地种植密度均设置为高密度 6000 株/hm²、中高密度 4500 株/hm²、中低密度 3000 株/hm²和低密度 1500 株/hm²等 4 个处理。在模拟研究中, 设定刺槐生长寿命 50a, 模拟时段 45a, 刺槐最大根深 10m, 土层深度 10m, 土壤剖面分为 0~0.01m、0.01~0.5m、0.5~1m、1~2m、2~3m、3~4m、4~5m、5~7m、7~9m、9~10m 共 10 个土层。在刺槐林 45a 连续生长条件下, 模拟刺槐林地水分生产力年度变化、林地 0~10m 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, 分别选择每月 15 日 10m 土层土壤有效含水量和每年 7 月 15 日 10m 土层的分层土壤湿度值, 分析林地土壤有效含水量逐月变化动态和土壤湿度剖面分布的年度变化动态。

1.3 模型精度验证

由于缺少刺槐林逐年生物量生产力和深层土壤湿度的长期连续定位观测数据, 本研究只能采用有关研究中对刺槐生物量和林地土壤水分的短期观测结果对 EPIC 模型进行验证。陕西长武试区 1988~1999 年刺槐逐年生物量模拟值 12a 平均为 10.61 t/hm², 长武试区^[16] 27 龄刺槐林地逐年生物量观测值为 9.88 t/hm², 二者相对误差为 7.4%。淳化试区^[13] 16 龄刺槐林逐年生物量生产力多点观测平均值为 11.29 t/hm², 与长武试区模拟值相对误差为 -6.0%。此外, 对渭北高原 2~15 年生刺槐林地累积生物量模拟值与观测值^[4, 34] 比较, 二者有十分相近的变化趋势 (图 1)。模拟值和观测值的平均值分别为 47.89 t/hm²和 43.92 t/hm², 相对误差 9.0%, RMSE 值 5.81 t/hm², 相关系数 0.9892, 达到极显著水平。

陕西安塞试区 1986~1995 年期间, 刺槐林年耗水量模拟值为 414~680mm, 10a 平均 520.6mm。安塞试区 1981~1990 年定点观测表明^[31], 刺槐林耗水量 375.4~722.9mm, 10a 平均 527.7mm, 刺槐林耗水量模拟值平均值与观测值平均值之间的相对误差分别为 -1.3%。上述模型精度验证结果表明, WinEPIC 模型能够较为精确的模拟黄土高原刺槐林生物量生长和土壤水分利用情况。

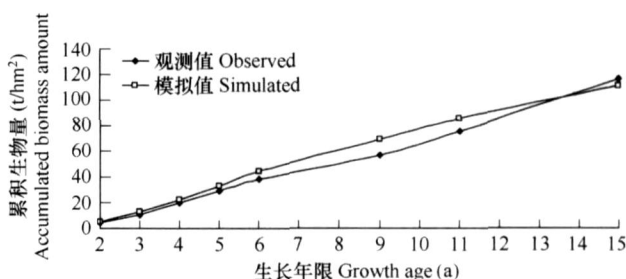


图 1 渭北高原不同生长年限刺槐林地累积生物量模拟值与观测值比较

Fig 1 Comparison of simulated and observed accumulated biomass amounts of different growth age black locust forestlands on Weibei highland

2 结果与分析

2.1 逐年生物量与累积生物量

在 1957~2001 年模拟研究期间,半湿润区长武和半干旱区延安年降水量分别介于 296.0~822.2mm 和 330.0~871.2mm,其平均值分别为 576.4mm 和 534.6mm,均呈现波动性降低趋势(图 2),45a 间长武和延安年降水量减幅分别为 71.5mm 和 156.2mm,1992 年以后年降水量平均值分别仅为 525.5mm 和 449.0mm。在 1957~2001 年模拟研究期间,长武和延安高密度(6000 株/hm²)、中高密度(4500 株/hm²)、中低密度(3000 株/hm²)和低密度(1500 株/hm²)等 4 种处理刺槐林地逐年生物量模拟值变化如图 2 所示,其统计值如表 1 所示。两地逐年生物量平均值均以低密度处理稍高,其它 3 种处理比较接近。长武逐年生物量平均值稍高于延安。

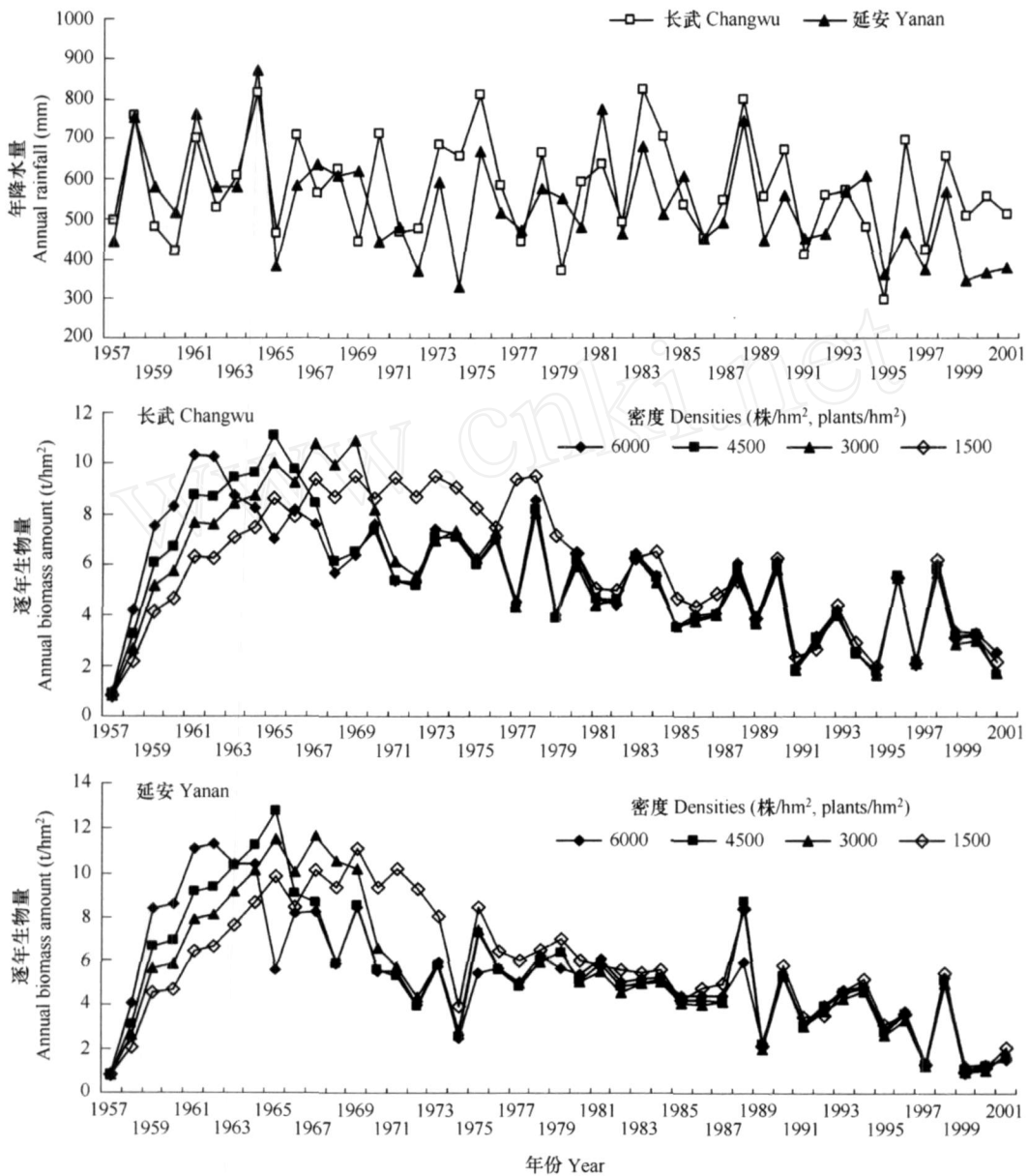


图 2 长武和延安年降水量和不同密度刺槐林地逐年生物量模拟值比较

Fig 2 Comparison of annual rainfall and simulated annual biomass amounts of black locust forestlands under different planting densities at Changwu and Yanan

表 1 不同密度处理下刺槐林地逐年生物量模拟值的统计值比较

Fig 1 Comparison of statistics of simulated annual biomass of black locust forestlands under different planting densities

地点 Location	种植密度 (株/hm ²) Planting density (plants/hm ²)	生物量范围 (t/hm ²) Annual biomass	平均值 (t/hm ²) Average	标准差 (t/hm ²) SD	变异系数 (%) CV
长武 Changwu	6000	0.93 ~ 10.35	5.52	2.27	41.1
	4500	0.88 ~ 11.09	5.46	2.42	44.4
	3000	0.86 ~ 10.93	5.52	2.59	46.9
	1500	0.84 ~ 9.51	5.90	2.53	43.0
延安 Yanan	6000	0.90 ~ 11.27	5.37	2.56	47.8
	4500	0.86 ~ 12.74	5.42	2.75	50.7
	3000	0.84 ~ 11.67	5.45	2.86	52.4
	1500	0.82 ~ 11.11	5.76	2.72	47.2

在 1957 ~ 2001 年 (1 ~ 45 年生) 模拟研究期间, 长武和延安 4 种密度处理刺槐林地逐年生物量均呈现逐年快速增加、达到最大值后又逐年波动性降低的相似变化趋势 (图 2)。在模拟研究初期, 高密度刺槐林地逐年生物量高于中高密度, 中高密度又高于中低密度, 低密度处理最低, 高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地逐年生物量分别于长武 1961 年 (5 年生) 和延安 1962 年 (6 年生)、长武 1965 年 (9 年生) 和延安 1965 年 (9 年生)、长武 1969 年 (13 年生) 和延安 1967 (11 年生)、长武 1978 (22 年生) 和延安 1969 年 (13 年生) 时达到最大值, 然后逐年波动性降低。长武从 1972 年 (16 年生)、延安从 1971 年 (15 年生) 开始, 高、中高和中低密度刺槐林地逐年生物量基本接近, 且波动趋势逐渐趋于一致。长武和延安分别在 1988 年 (32 年生) 和 1984 年 (28 年生) 后各密度处理效应差异消失, 逐年生物量十分接近且波动趋势一致。

在模拟生长初期, 密度越高, 逐年生物量也越高, 但达到最高值后, 密度越高的处理, 逐年生物量开始降低的时间越早、降幅也越大。长武高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地逐年生物量高于 8 t/hm² 的快速生长阶段, 分别为 1960 ~ 1966 年 (4 ~ 10 年生)、1961 ~ 1967 年 (5 ~ 11 年生)、1963 ~ 1970 年 (7 ~ 14 年生) 和 1965 ~ 1975 年 (9 ~ 19 年生), 分别持续 7、7、8a 和 11a, 密度越低的处理, 快速生长阶段持续时间越长。延安 4 种密度处理刺槐林地的快速生长阶段分别为 1959 ~ 1969 年 (3 ~ 13 年生)、1961 ~ 1969 年 (5 ~ 13 年生)、1962 ~ 1969 年 (6 ~ 13 年生) 和 1964 ~ 1975 年 (8 ~ 19 年生), 分别持续 11、9、8a 和 12a。高密度和中高密度处理 1 ~ 10 年生刺槐林地逐年生物量平均值高于中低和低密度处理, 但 11 ~ 20 年生又低于中低密度和低密度处理, 除低密度处理外, 其它密度处理 21 ~ 30 年生逐年生物量基本接近, 31 ~ 45 年生时 4 种密度处理均趋于一致 (表 2)。因此, 高密度处理有利于刺槐林地逐年生物量的早期 (1 ~ 20 年生) 快速生长, 而低密度处理有利于中期 (21 ~ 30 年生) 持续生长, 但各密度处理在生长后期 (31 ~ 45 年生) 逐年生物量差异缩小。

表 2 不同密度处理下不同生长年限刺槐林地逐年生物量模拟值比较

Table 2 Comparison of simulated annual biomass of different growth age black locust forestlands under different planting densities

地区 Location	生长年限 Growth age	种植密度 (株/hm ²) Planting density (plants/hm ²)			
		6000	4500	3000	1500
长武 Changwu	1 ~ 10 年生 1-10 a	7.37	7.42	6.61	5.55
	11 ~ 20 年生 11-20 a	6.57	6.59	7.93	8.85
	21 ~ 30 年生 21-30 a	5.23	5.11	5.03	6.43
	31 ~ 45 年生 31-45 a	3.78	3.62	3.53	3.80
延安 Yanan	1 ~ 10 年生 1-10 a	7.89	7.94	7.18	5.98
	11 ~ 20 年生 11-20 a	5.73	5.92	7.10	8.63
	21 ~ 30 年生 21-30 a	5.30	5.19	5.08	5.72
	31 ~ 45 年生 31-45 a	3.48	3.57	3.46	3.73

在 1957 ~ 2001 年 (1 ~ 45 年生) 模拟研究期间, 长武和延安高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地累积生物量均呈现逐年升高趋势, 长武和延安分别在 1957 ~ 1974 年 (1 ~ 18 年生)、1957 ~ 1971 年 (1 ~ 15 年生) 期间, 低密度处理累积生物量低于其它 3 种密度处理, 但长武在 1975 年 (19 年生)、延安在 1972 年 (16 年

生)之后低密度处理刺槐林地累积生物量超过其它3种高密度处理(图3)。在2001年(45年生)时,长武高、中高、中低和低等4种密度处理刺槐林地累积生物量分别达到248.39、245.48、248.58 t/hm²和265.29 t/hm²,延安分别为241.47、244.01、245.44 t/hm²和259.15 t/hm²,均以低密度处理最高。延安刺槐林地累积生物量稍低于长武。

若仅以逐年生物量和累积生物量判断,半湿润区长武旱塬刺槐林地密度以低密度和中低密度处理为宜,其适宜密度范围为1500~3000株/hm²。半干旱区延安刺槐林地密度以低密度处理为宜,其适宜密度为1500株/hm²。

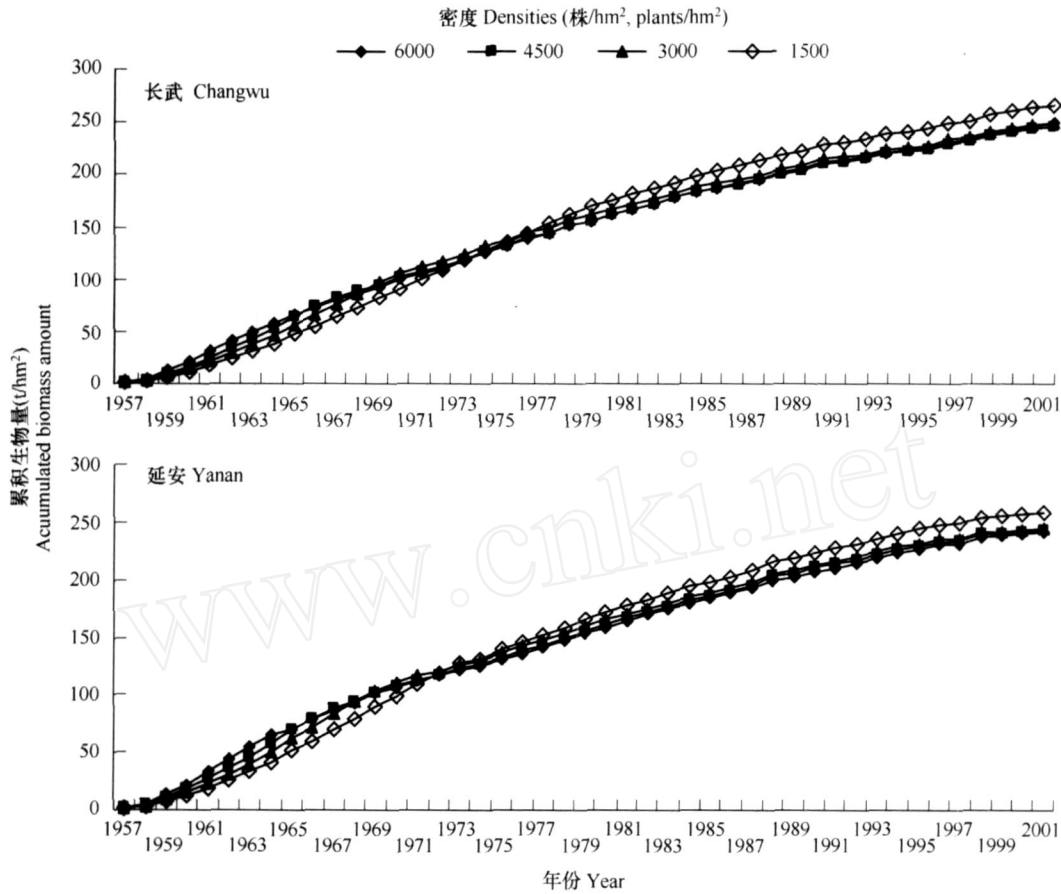


图3 长武和延安不同密度刺槐林地累积生物量模拟值比较

Fig 3 Comparison of simulated accumulated biomass amounts of black locust forestlands under different planting densities at Changwu and Yanan

2.2 年耗水量与干旱胁迫程度

在1957~2001年模拟研究期间,长武和延安高、中高、中低和低等4种密度处理刺槐林地年耗水量模拟值如表3和图4所示。在45a模拟研究期间,各密度处理刺槐林地年耗水量模拟值的平均值基本相等,但生长前期耗水量明显高于后期。长武高、中高、中低和低等4种密度处理1~10年生(1957~1966年)刺槐林地年耗水量平均值分别为723.1、717.1、651.1 mm和591.1 mm,36~45年生(1992~2001年)分别为511.5、512.5、512.5 mm和510.5 mm,前10a较后10a分别高出211.5、204.5、138.5 mm和80.5 mm(图4)。类似于长武,延安高、中高、中低和低等4种密度处理刺槐林地生长前10年的年耗水量平均值分别为745.2、744.2、696.2 mm和631.2 mm,后10a(1992~2001年)分别为450.0、450.0、450.0 mm和450.0 mm,前10a较后10a分别高出295.2、294.2、246.2 mm和181.2 mm,林地密度越高,耗水量降幅越大。延安刺槐林地年耗水量降幅明显高于长武。长武高、中高、中低和低等4种密度处理1~20年生刺槐林地年均耗水量分别比同期年降水量高66.0、66.0、65.6 mm和34 mm,延安则分别为71.0、72.0、72.0 mm和71.0 mm。刺槐林地前期高强度

耗水,导致深层土壤水分过耗,土壤干燥化严重,刺槐后期生长耗水完全依靠当季降水供给,因而导致林分生长量明显降低。

表 3 不同密度处理下刺槐林地年耗水量模拟值统计比较

地点 Location	种植密度 (株 /hm ²) Planting density (plants/hm ²)	年耗水量值范围 (mm) Annual water consumption	平均值 (mm) Average	标准差 (mm) SD	变异系数 (%) CV
长武 Changwu	6000	356.0 ~ 849.8	603.1	127.5	21.1
	4500	356.0 ~ 853.2	603.1	124.6	20.7
	3000	356.0 ~ 832.2	603.1	115.8	19.2
	1500	356.0 ~ 806.9	602.7	100.4	16.7
延安 Yanan	6000	307.3 ~ 930.4	566.4	160.8	28.4
	4500	317.3 ~ 940.3	566.6	151.0	26.6
	3000	317.3 ~ 827.7	566.6	141.7	25.0
	1500	317.3 ~ 793.5	566.6	118.0	20.8

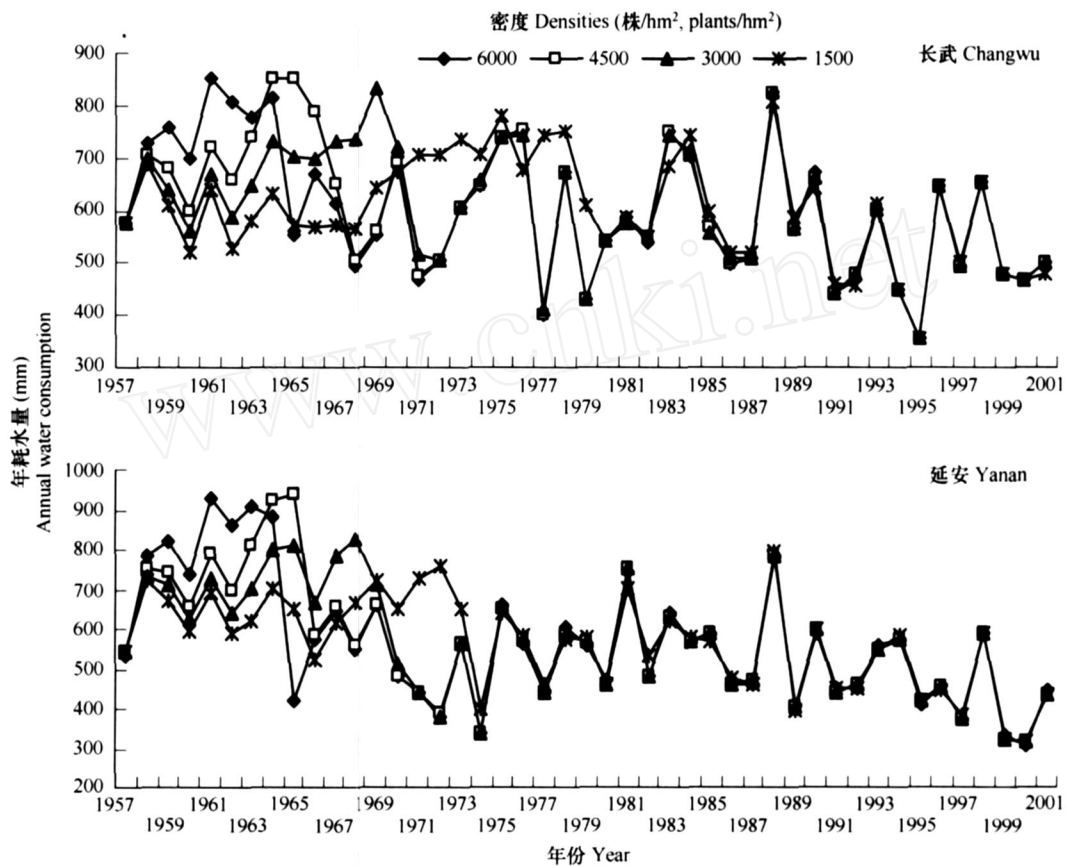


图 4 长武和延安不同密度刺槐林地年耗水量模拟值比较

Fig 4 Comparison of simulated annual water consumptions of black locust forestlands under different planting densities at Changwu and Yanan

图 4显示,刺槐林种植密度越大,林地耗水量高峰出现越早,耗水量急剧降低的时间也越早,土壤干燥化发生时间也越早。长武高、中高、中低和低等 4种密度处理刺槐林地耗水量高峰期分别为 1961年(5年生)、1964年(8年生)、1969年(13年生)和 1975年(19年生),延安分别为 1963年(7年生)、1965年(9年生)、1968年(12年生)和 1972年(16年生),此后各密度处理刺槐林地年耗水量值逐年波动性降低,长武和延安分别于 1980年(24年生)和 1975年(19年生)各密度处理耗水量基本接近且波动趋势趋于一致。在特大丰水年型,如 1988年长武和延安年降水量分别高达 796.9mm和 743.5mm,当年刺槐林地耗水量值普遍较高,分别达到 826.9mm和 752.2mm,高、中高和中低密度处理含水量十分接近,分别较低密度处理高 20mm和 70mm

左右。在特大干旱年型,如长武 1995年和延安 1974年的年降水量分别仅为 296.0mm和 330.0mm,当年耗水量仅分别为 356.0mm和 340mm,各密度处理也十分接近或相似(图 4)。

在 1957~2001年模拟研究期间,长武和延安高、中高、中低和低等 4种密度处理刺槐林地干旱胁迫日数模拟值如表 4和图 5所示。随着种植密度降低,刺槐林地干旱胁迫日数明显降低。长武高、中高、中低和低等 4种密度处理刺槐林地分别在 1957~1962年(1~6年生)、1957~1965年(1~9年生)、1957~1969年(1~13年生)和 1957~1978年(1~22年生)时段内无干旱胁迫,分别于 1963年(7年生)、1966年(10年生)、1970年(14年生)和 1979年(23年生)时相继出现干旱胁迫,并且干旱胁迫日数随降水量年度变化呈现波动性增高趋势。同样,延安高、中高、中低和低等 4种密度处理刺槐林地则分别在 1957~1961年(1~5年生)、1957~1965年(1~9年生)、1957~1967年(1~11年生)和 1957~1972年(1~16年生)时段内无干旱胁迫,分别

表 4 不同密度处理下刺槐林地逐年干旱胁迫日数模拟值统计比较

Table 4 Comparison of statistics of simulated annual water stress days of black locust forestlands under different planting densities

地点 Location	种植密度 (株/hm ²) Planting density (plants/hm ²)	干旱胁迫日数范围 (d) Water stress days	平均值 (d) Average	标准差 (d) SD	变异系数 (%) CV
长武 Changwu	6000	0~109	53.9	30.1	55.8
	4500	0~104	45.4	31.2	68.7
	3000	0~99	36.6	30.9	84.3
	1500	0~82	17.7	25.1	141.6
延安 Yanan	6000	0~139	74.5	37.5	50.3
	4500	0~136	65.8	39.2	59.5
	3000	0~130	57.0	39.7	69.7
	1500	0~120	37.6	35.2	93.8

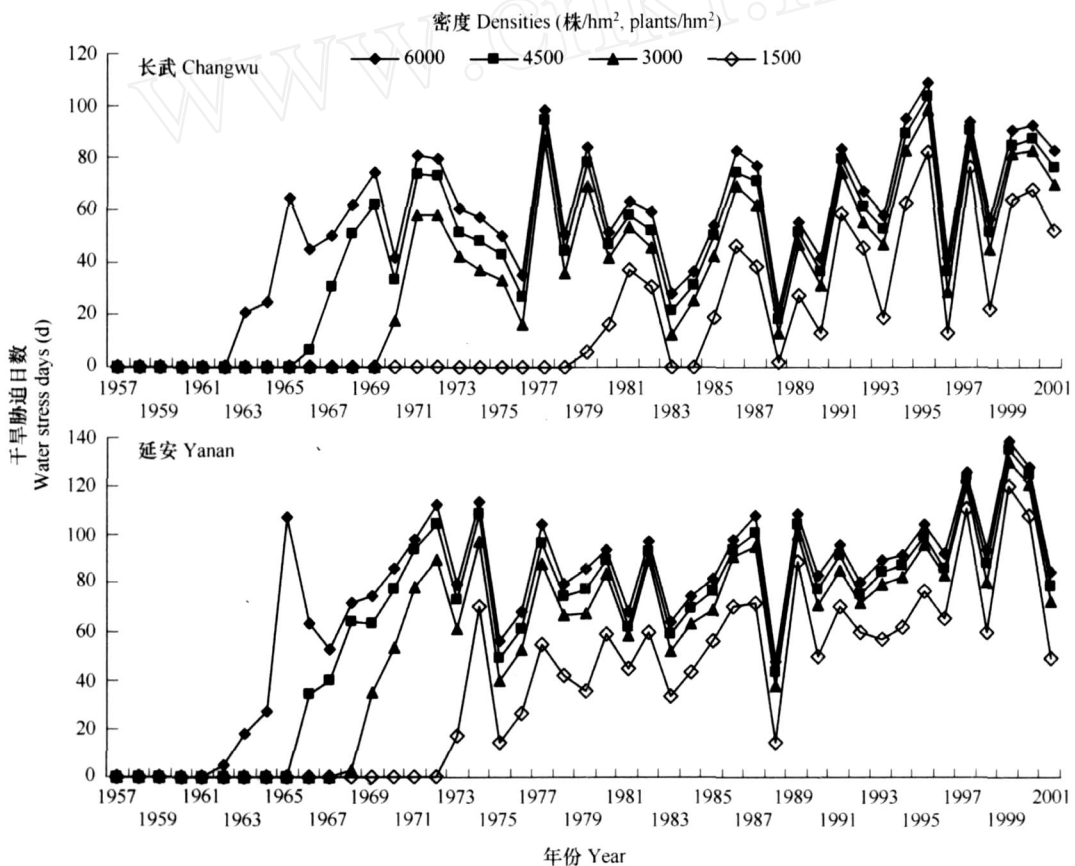


图 5 长武和延安不同密度刺槐林地干旱胁迫日数模拟值比较

Fig 5 Comparison of simulated water stress days of black locust forestlands under different planting densities at Changwu and Yanan

于 1962年 (6年生)、1966年 (10年生)、1968年 (12年生)和 1973年 (17年生)时相继出现干旱胁迫,干旱胁迫日数也随降水量年度变化波动性增大。两地低密度处理刺槐林地干旱胁迫出现时间均明显晚于其它 3种密度处理,其干旱胁迫日数也明显低于其它 3种密度处理。所以,低密度处理刺槐林地遭受干旱胁迫的程度明显低于其它高密度处理。长武各密度处理刺槐林地干旱胁迫程度均低于延安。

2.3 0~10m土层逐月土壤有效含水量

在 1957~2001年模拟研究期间,长武和延安高、中高、中低和低等 4种密度处理刺槐林地 0~10m土层逐月土壤有效含水量模拟值如表 5和图 6~7所示,长武和延安刺槐林地土壤有效含水量变化趋势十分相似。

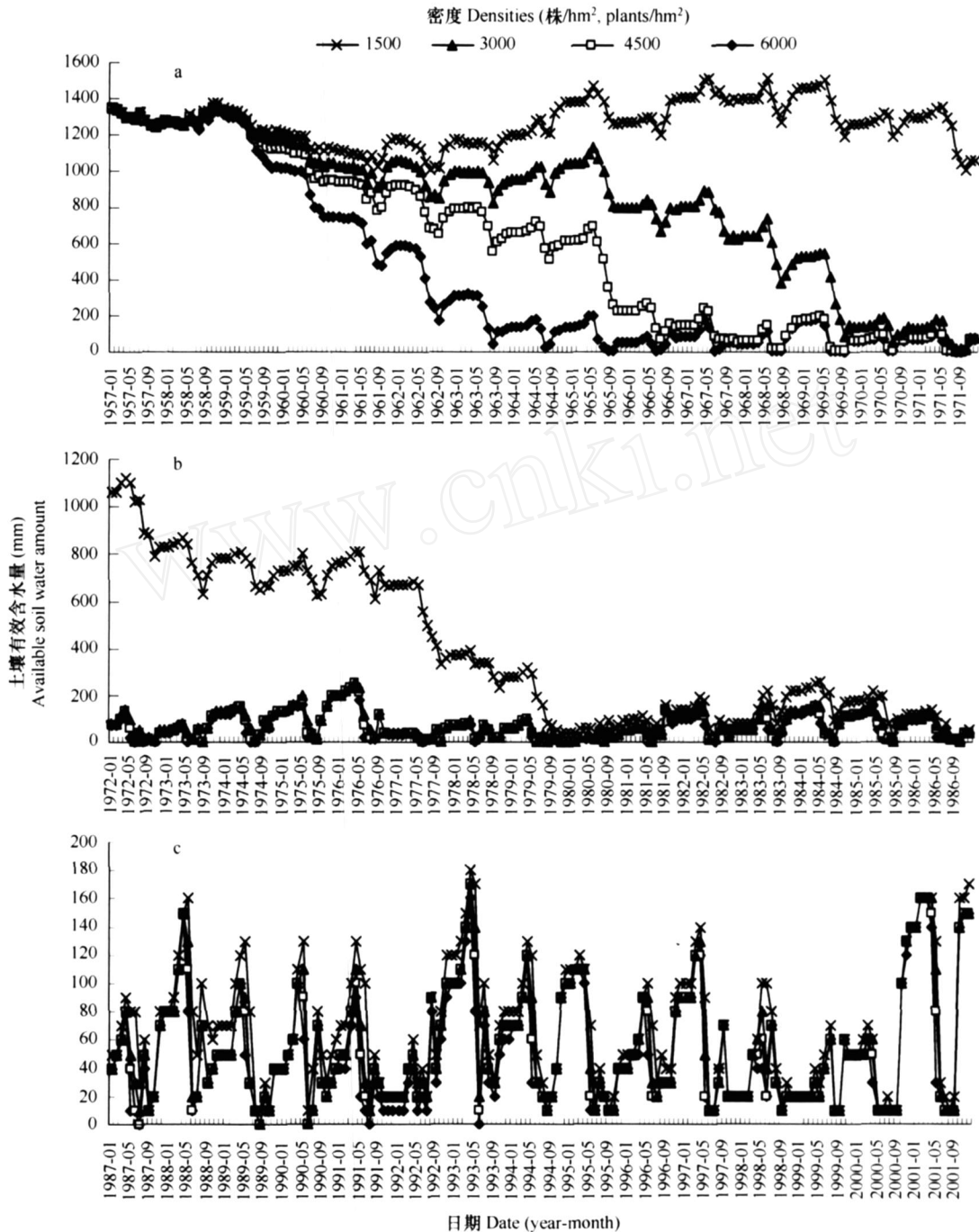


图 6 长武不同密度刺槐林地 0~10m土层逐月土壤有效含水量模拟值比较

Fig 6 Comparison of simulated monthly available soil water amounts in 0-10m profile on black locust forestlands under different planting densities at Changwu

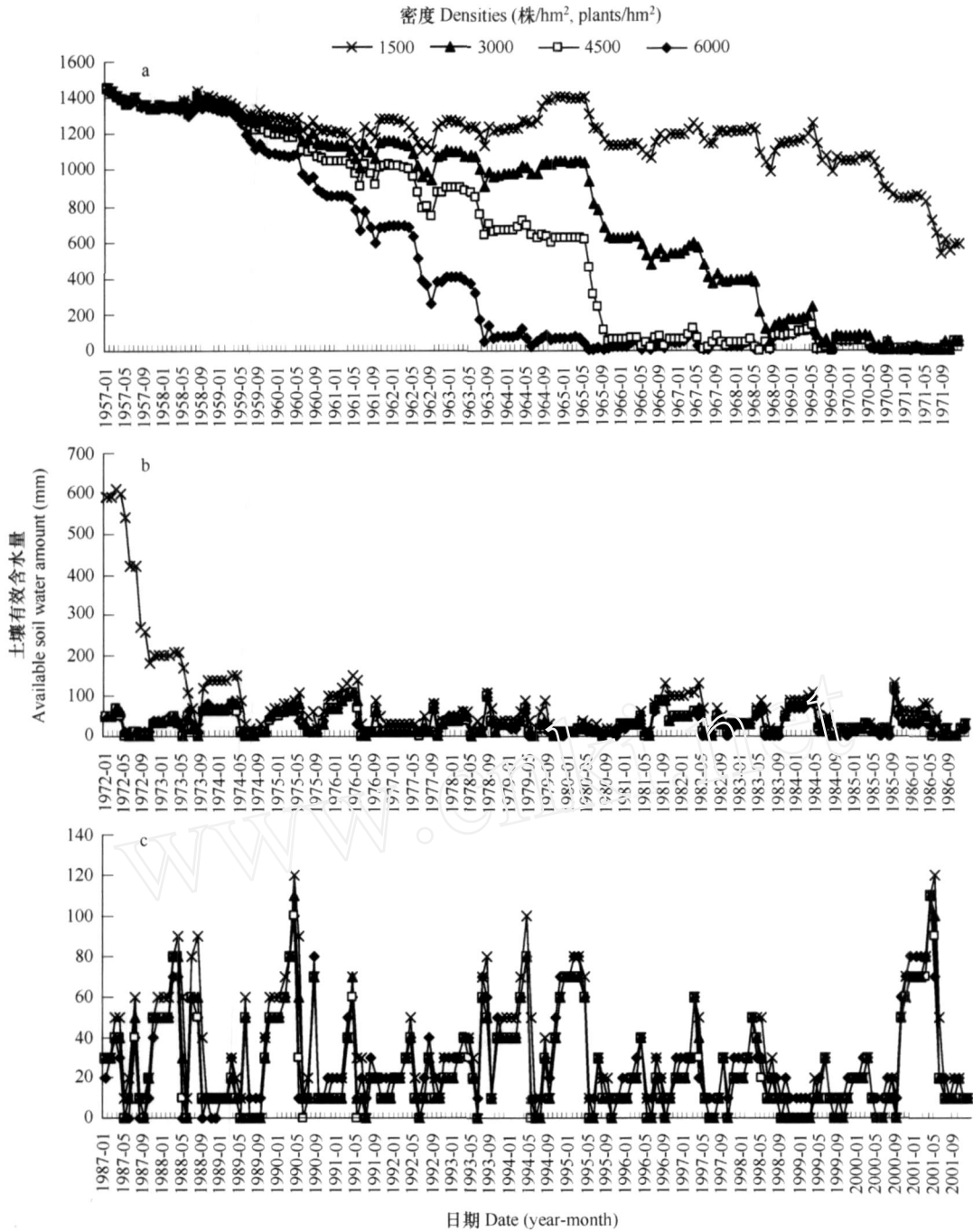


图 7 延安不同密度刺槐林地 0~10m 土层逐月土壤有效含水量模拟值比较

Fig 7 Comparison of simulated monthly available soil water amounts in 0-10m profile on black locust forestlands under different planting densities at Yanan

随着种植密度降低,长武和延安刺槐林地 0~10m 土层逐月土壤有效含水量明显增加,土壤干燥化程度逐渐减轻。在模拟研究初期,长武和延安高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地 0~10m 土层逐月土壤有效含水量均呈现强烈的波动性降低趋势(图 6~7(a)和(b)),长武分别从 1957 年的 1350mm 降低到 1963 年(7 年生)、1966 年(10 年生)、1969 年(13 年生)和 1979 年(23 年生)的 200mm 以下水平,年均分别降低 164mm、115mm、88mm 和 50mm,延安分别从 1957 年的 1450mm 降低到 1963 年(7 年生)、1965 年(9 年生)、1968 年(12 年生)和 1973 年(17 年生)的 200mm 以下水平,年均分别降低 179mm、139mm、104mm 和 74mm,表明刺槐林地密度越高,土壤干燥化进程越快,土壤干燥化程度越重,土壤有效含水量越低。其中,长武低密度处理刺

槐林地土壤有效含水量在趋势性降低过程中曾出现明显的恢复性增长过程。此后长武和延安 4 种密度处理刺槐林地 0~10m 土层逐月土壤有效含水量均在 200mm 以下的较低水平上波动,且各密度处理之间的差异很小。长武和延安分别在 23 年生和 17 年生之前,刺槐林地密度处理的土壤水分效应差异比较明显,在 23~45 年生和 18~45 年生期间土壤干燥化发生后密度对林地土壤水分效应的影响趋于缩小并消失,不同密度处理之间刺槐林地土壤含水量趋于一致(图 6~7(c))。

表 5 不同密度处理下刺槐林地 0~10m 土层逐月土壤有效含水量模拟值的统计值比较

Table 5 Comparison of statistics of simulated monthly available soil water amount in 0-10m profile of black locust forestlands under different planting densities

地点 Location	种植密度 (株 /hm ²) Planting density (plants/hm ²)	土壤有效含水量范围 (mm) Available soil water amount	平均值 (mm) Average	标准差 (mm) SD	变异系数 (%) CV
长武 Changwu	6000	0~1350	182.2	328.7	171.4
	4500	0~1350	238.6	371.3	155.6
	3000	0~1360	320.0	426.5	133.3
	1500	10~1510	572.7	544.7	95.1
延安 Yanan	6000	0~1440	170.0	359.7	211.5
	4500	0~1450	221.4	410.7	185.5
	3000	0~1450	282.1	453.9	160.9
	1500	0~1450	433.5	548.4	126.5

2.4 0~10m 土层土壤湿度剖面分布比较

根据长武和延安 1~45 年生刺槐林地逐年土壤湿度剖面分布模拟值,可统计得到不同密度处理下林地逐年土壤干层最大分布深度及其年度变化特征。在 1957~2001 年模拟研究期间,长武和延安不同密度处理刺槐林地 0~10m 土层土壤湿度剖面分布特征均呈现出随着林龄增长,林地土壤干层厚度逐年加深和加厚;林地密度越大,土壤干层加深速度越快(表 6 和图 8~9)。长武高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地土

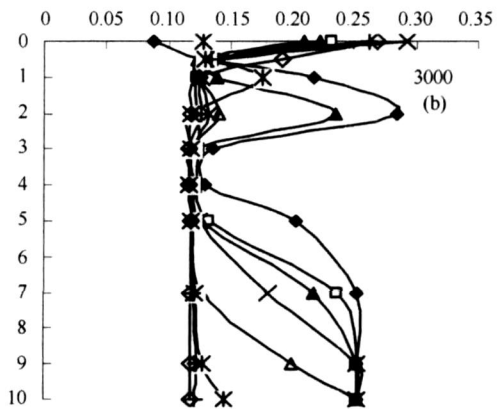
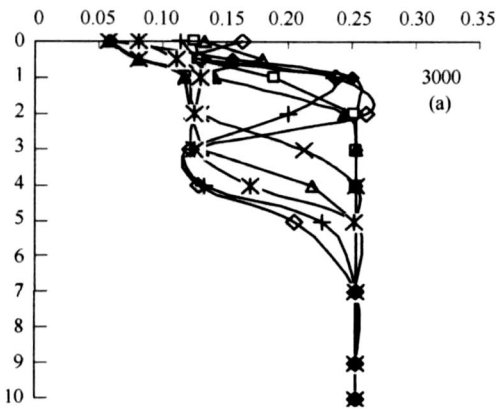
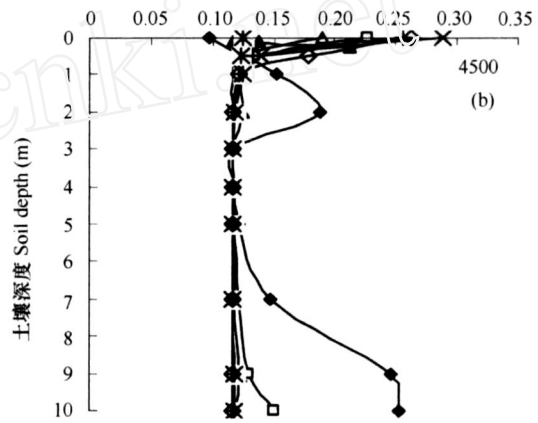
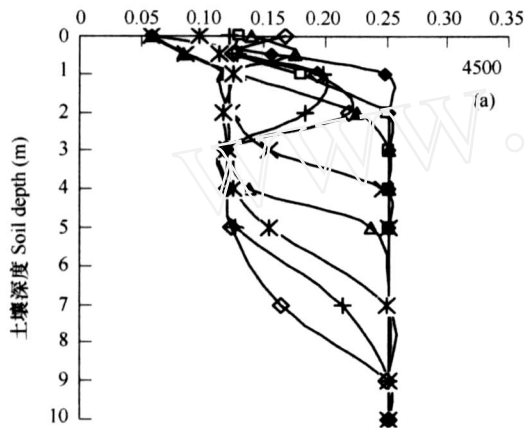
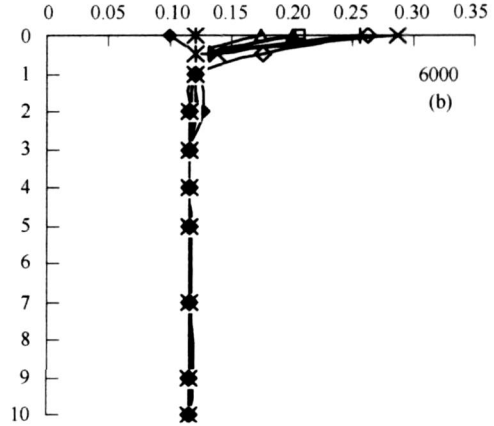
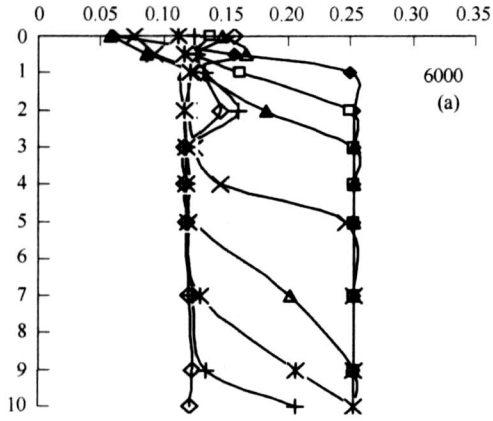
表 6 不同密度处理下不同林龄刺槐林地 0~10m 土层土壤干层分布深度模拟值比较

Table 6 Comparison of simulated maximum desiccated soil layer depth in 0-10m profile of different age black locust forestlands under different planting densities

地点 Location	种植密度 (株 /hm ²) Planting density (plants/hm ²)	土壤干层分布深度 (m) Depth of desiccated soil layers							
		1	2	3	4	5	7	9	10
长武 Changwu	6000	2 年生	3 年生	3 年生	3 年生	4 年生	5 年生	6 年生	8 年生
		2 a	3 a	3 a	3 a	4 a	5 a	6 a	8 a
	4500	2 年生	3 年生	3 年生	4 年生	5 年生	7 年生	9 年生	10 年生
		2 a	3 a	3 a	4 a	5 a	7 a	9 a	10 a
3000	2 年生	3 年生	4 年生	5 年生	9 年生	10 年生	13 年生	14 年生	
	2 a	3 a	4 a	5 a	9 a	10 a	13 a	14 a	
1500	2 年生	4 年生	5 年生	18 年生	19 年生	20 年生	24 年生	26 年生	
	2 a	4 a	5 a	18 a	19 a	20 a	24 a	26 a	
延安 Yanan	6000	1 年生	2 年生	3 年生	4 年生	4 年生	5 年生	6 年生	8 年生
		1 a	2 a	3 a	4 a	4 a	5 a	6 a	8 a
	4500	1 年生	2 年生	4 年生	5 年生	6 年生	7 年生	9 年生	10 年生
		1 a	2 a	4 a	5 a	6 a	7 a	9 a	10 a
3000	1 年生	3 年生	4 年生	5 年生	8 年生	10 年生	11 年生	13 年生	
	1 a	3 a	4 a	5 a	8 a	10 a	11 a	13 a	
1500	1 年生	3 年生	5 年生	10 年生	15 年生	16 年生	17 年生	18 年生	
	1 a	3 a	5 a	10 a	15 a	16 a	17 a	18 a	

- ◆ 1年生 1a
- 2年生 2a
- ◆ 9年生 9a
- 10年生 10a
- ▲ 3年生 3a
- ✕ 4年生 4a
- ▲ 11年生 11a
- ✕ 12年生 12a
- ▲ 5年生 5a
- ✕ 6年生 6a
- ▲ 13年生 13a
- ✕ 14年生 14a
- + 7年生 7a
- ◇ 8年生 8a
- + 15年生 15a
- ◇ 16年生 16a

土壤湿度 Soil moisture (m/m)



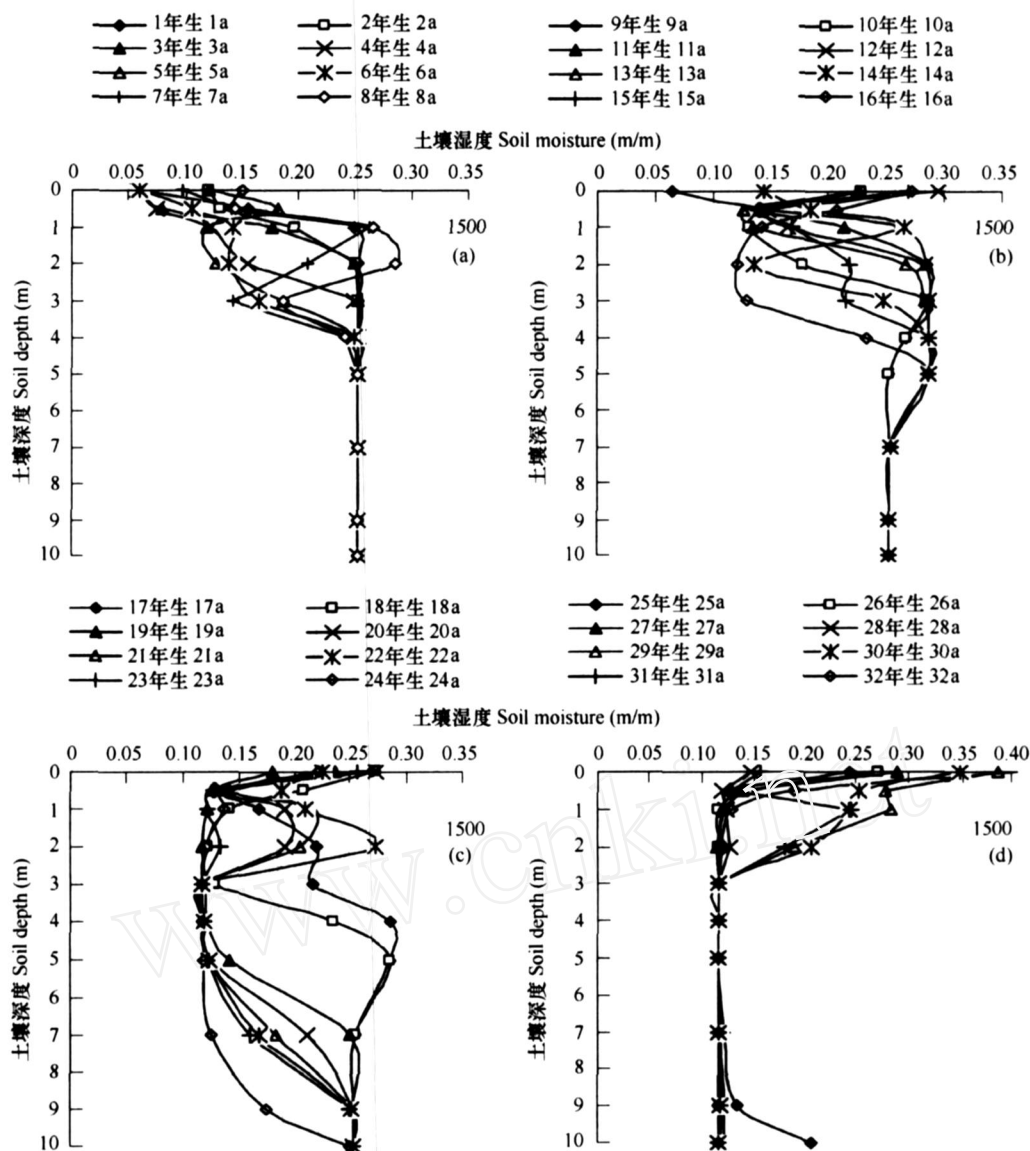


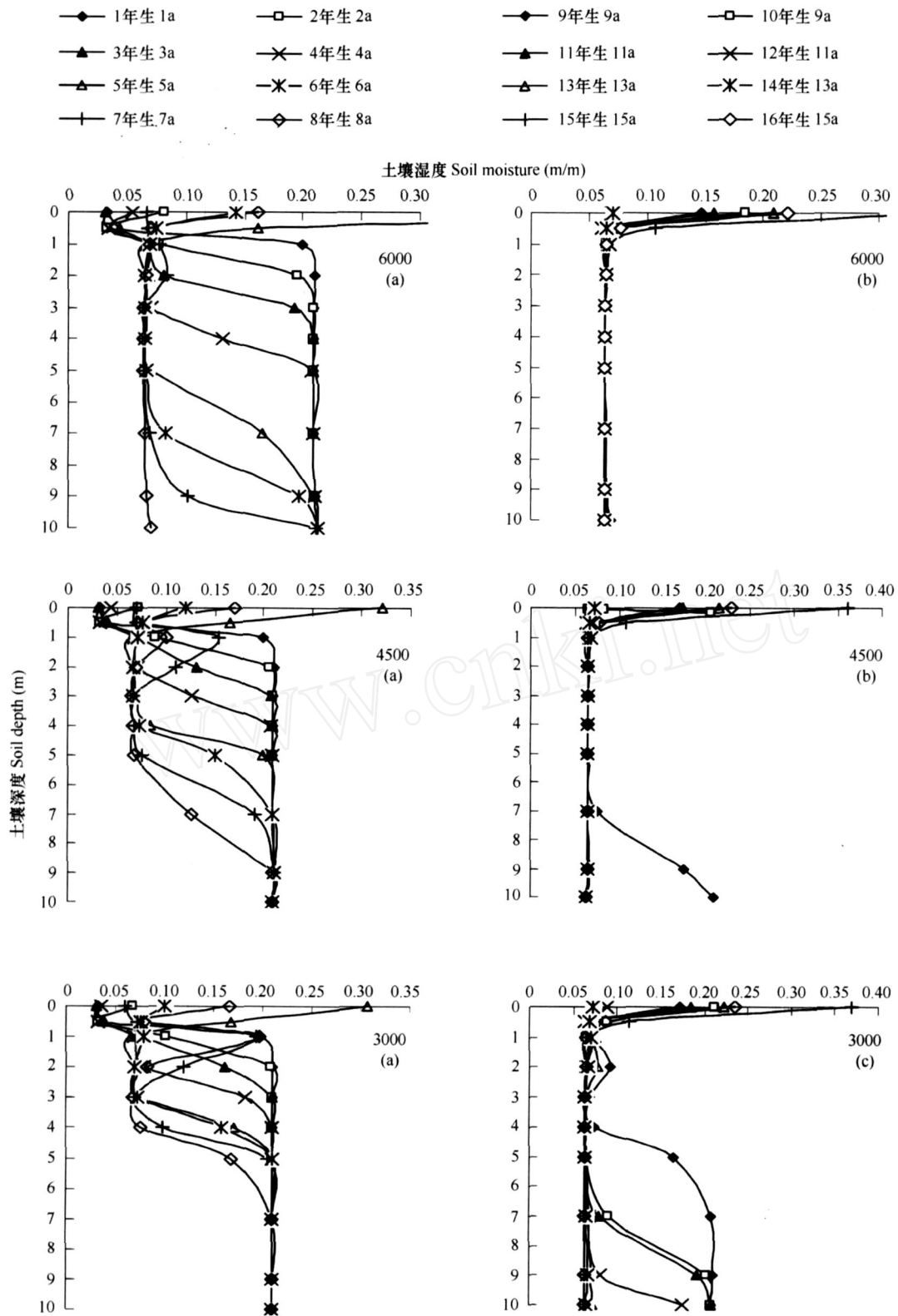
图 8 长武不同密度刺槐林地 0~10m 土层土壤湿度剖面分布年度变化比较

Fig 8 Comparison of annual soil moisture distribution changes in 0-10m profile of black locust forestlands under different planting densities at Changwu

壤干层完全达到 10m 深度所需时间分别为 8 年生、10 年生、14 年生和 26 年生,土壤干层加深速度依次为 1.25 m/a、1.00 m/a、0.71 m/a 和 0.38 m/a;延安则分别为 8 年生、10 年生、13 年生和 18 年生,土壤干层加深速度依次为 1.25 m/a、1.00 m/a、0.77 m/a 和 0.56 m/a。此后,长武和延安所有密度处理刺槐林地 2~10m 土层土壤湿度长期稳定维持在凋萎湿度附近,只有 0~2m 土层土壤湿度随降水季节和年度变化而变化(图 8~9)。长武和延安刺槐林地密度处理的土壤干层厚度效应差异分别在 26 年生和 18 年生之前较为显著,26 年生和 18 年生之后林地土壤干层厚度均超过 10m,密度效应消失。从土壤干层形成和发展的速度来看,长武和延安低密度处理优于中低密度处理,中低密度又优于中高密度和高密度处理。延安同龄刺槐林地土壤干层加深速度快于长武。

3 结论

通过对半湿润区长武和半干旱区延安高密度(6000株/hm²)、中高密度(4500株/hm²)、中低密度(3000株/hm²)和低密度(1500株/hm²)等 4 种密度处理 45 年生刺槐林地水分生产力、0~10m 土层土壤有效含水量



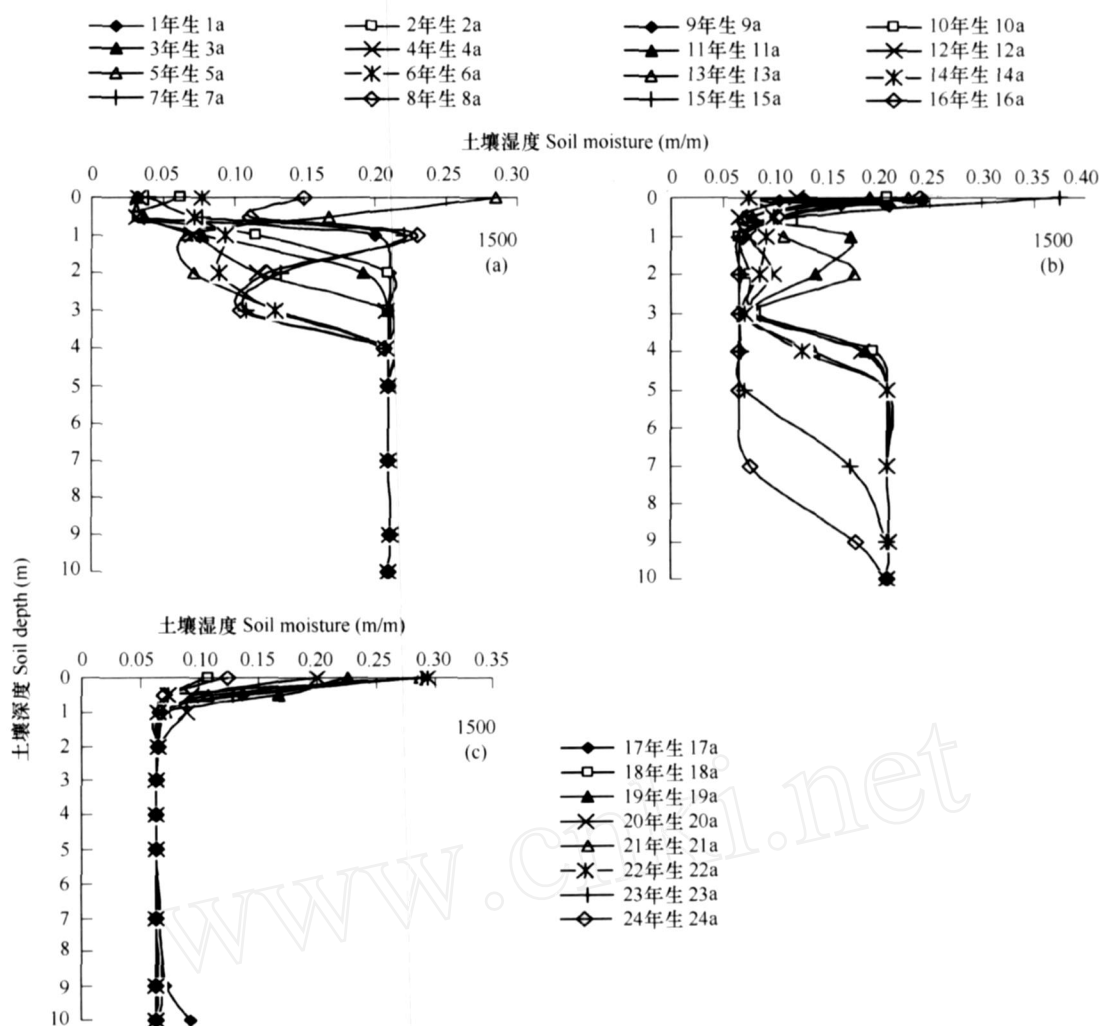


图 9 延安不同密度刺槐林地 0~10m 土层土壤湿度剖面分布年度变化比较

Fig 9 Comparison of annual soil moisture distribution changes in 0~10m profile of black locust forestlands under different planting densities at Yanan

变化动态、土壤湿度剖面分布特征的定量模拟与比较分析,得到如下初步结论:

(1)在 1957~2001 年模拟研究期间,长武高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地年均逐年生物量模拟值分别为 5.52、5.46、5.52 t/hm²和 5.90 t/hm²,延安分别为 5.37、5.42、5.45 t/hm²和 5.76 t/hm²,均呈现逐年快速增加、达到最大值后又逐年波动性降低的变化趋势。高密度林地早期(1~20 年生)逐年生物量增长较快,而低密度林地中期(21~30 年生)生长量高,但后期(31~45 年生)各密度处理逐年生物量差异缩小。长武和延安 45 年生刺槐林地累积生物量均以低密度处理最高。

(2)在 1957~2001 年模拟研究期间,各密度处理刺槐林地年均耗水量模拟值基本相等,长武和延安分别约为 603mm 和 566mm,但生长前期年耗水量值明显高于后期,并高于同期年降水量值。高密度林地前期耗水量高,耗水量降低开始时间早,中期以后各密度处理耗水量基本接近且波动趋势趋于一致。随着种植密度降低,刺槐林地出现干旱胁迫的时间越晚,干旱胁迫日数明显降低。

(3)在 1957~2001 年模拟研究的初期,高、中高、中低和低等 4 种密度处理刺槐林地 0~10m 土层逐月土壤有效含水量均呈现强烈的波动性降低趋势,长武和延安分别在 7~23 年生和 7~17 年生时快速降低到 200mm 以下水平,种植密度越高,土壤有效含水量降低速度越快。此后,各处理土壤有效含水量均长期在较低水平上波动,密度效应消失。

(4)在 1957~2001年模拟研究期间,长武和延安不同密度处理刺槐林地 0~10m 土层土壤湿度剖面分布均呈现出随林龄增长,林地土壤干层厚度逐年加深和加厚,林地密度越高,土壤干层加深速度越快。长武高、中高、中低和低等 4种密度处理刺槐林地土壤干层完全达到 10m 深度的时间分别为 8年生、10年生、14年生和 26年生,延安分别为 8年生、10年生、13年生和 18年生。此后,林地土壤干层厚度均超过 10m,密度效应消失。

(5)模拟结果表明,半湿润区长武刺槐林地密度以 1500~3000株/hm²为宜,半干旱区延安刺槐林地密度以 1500株/hm²为宜,否则土壤干燥化进程较快、干旱胁迫程度较重。长武和延安刺槐林地土壤水分持续利用的最大年限分别为 26a和 18a。地区间刺槐林地的密度效应差异明显,延安同密度刺槐林地土壤干燥化程度较长武严重。

References:

- [1] Chen H S, Wang K L, Shao M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41 (4): 155-161.
- [2] Chen Y M, Liang Y M, Cheng J M. Zonal character of vegetation construction on the Loess Plateau *Journal of Plant Ecology*, 2002, 26 (3): 339-345.
- [3] Chen Y M, Liu G B, Yang Q K. Zonal characteristics of artificial forest effecting soil moisture on the Loess Plateau *Journal of Natural Resources*, 2004, 19 (2): 195-200.
- [4] Cheng J M, Wan H. *Vegetation construction, soil and water conservation on the Loess Plateau of China* Beijing: China Forestry Press, 2002.
- [5] Gerik T J, W L Haman, J R Williams, *et al* User's Guide: CroPMAN (Crop Production and Management) Model, Version 3.2 Blackland Research and Extension Center, Temple, Texas, 2003.
- [6] Hou Q C, Han R L, Han S F. Initial research on "dried soil layer" of artificial forestland and grassland in the Loess Plateau *Soil and Water Conservation of China*, 1999, (5): 11-14.
- [7] Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation equations for soil water transfer and use in the EPIC model *Agricultural Research in the Arid Area*, 2004, 22 (2): 72-75.
- [8] Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation equations for soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (2): 166-173.
- [9] Li J, Shao M A, Zhang X C, *et al* Simulation equations for crop growth and yield formation in the EPIC model *Journal of Northwest A & F University (Natural science edition)*. 2004, 32 (Suppl): 25-30.
- [10] Li J, Shao M A, Zhang X C. Databases construct for the EPIC model on the Loess Plateau region *Journal of Northwest A & F University (Natural science edition)*, 2004, 32 (8): 21-26.
- [11] Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamics on rainfed highland of the Loess Plateau *Journal of Natural Resources*, 2004, 19 (6): 738-746.
- [12] Li J, Shao M A, Zhang X C, *et al* Simulation of soil desiccation and yield fluctuation of high yield maize field on rainfed highland of the Loess Plateau *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (2): 54-58.
- [13] Li K R, Wang Y M. Research of soil water characters and productivity of black locust tree forestlands on highland and gully areas of the Loess Plateau. See: *Natural resources and Environmental Scientific Bureau of CAS (edit). Comprehensive management and development of small watersheds on the Loess Plateau* Beijing: S Scientific and Technical Documents Publishing House, 1992.
- [14] Li S R, Zhang W Q, He K N. Soil Moisture Dynamic of the *Robinia pseudoacacia* with Different Density in Semiarid Region on the Loess Plateau, *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, (02): 31~35.
- [15] Li Y S. Characters of soil water cycling and its influences on land water cycling of the loess region of China *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3 (2): 91-101.
- [16] Li Y S, Su S M. *Comprehensive study on high efficiency eco-economic systems of Wangdonggou at Changvu county* Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1991.
- [17] Li Y S. Effects of forest on water cycle on the Loess Plateau *Journal of natural resources*, 2001, 16 (5): 427-432.
- [18] Mu X M, Xu X X, Wang W L, *et al* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on the Loess Plateau *Acta Pedologica Sinica*,

- 2003, 40 (2): 210-217.
- [19] The national soil survey and investigation office. Records of Chinese soil survey (vol 5). Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995.
- [20] Shaanxi Province soil survey and investigation office. Soils of Shaanxi Province. Beijing: Science Press, 1992.
- [21] Texas A&M Blackland Research Center. Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1.0. BRC report No. 0406, 2004.
- [22] Wang B T, Wang Y, Guo J H, *et al*. Effect on biomass of stand density of artificial black locust forest in semi-arid region of the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3 (3): 35-39.
- [23] Wang J X, Huang B L, Luo W X. Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of drought prone the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (11): 2395-2401.
- [24] Wang L, Shao M A, Zhang Q F. Distribution and characters of soil dry layer in northern Shaanxi the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (3): 436-442.
- [25] Wang M B, Li H J. Research of water ecology on artificial forestlands of the Loess Plateau. Beijing: China forestry Press, 2001.
- [26] Williams, J R, C A Jones, J R Kiniry, D A Spangle. The EPIC crop growth model. *Transaction of ASAE*, 1989, 32 (2): 475-511.
- [27] Williams J R, Dyke P T, Fuchs W W, *et al*. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User Manual. USDA Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 1990.
- [28] Wu Q X, Yang W Z. The vegetation construction and sustainable development of the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998.
- [29] Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern region of China. *Scientia of Silvae Sinicae*, 1996, 32 (1): 78-84.
- [30] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (5): 433-438.
- [31] Yang W Z, Shao M A. Research on Soil Water of the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000.
- [32] Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation on soil water conditions of conservation forest ecosystem of loess region. *Scientia of Silvae Sinicae*, 1996, 32 (4): 289-296.
- [33] Zhao H W, Li B C. Analysis of growth of firewood forest of black locust in Jingchuan County. *Protection Forest Science and Technology*, 2000, (1): 17-19.
- [34] Zhang J J, He W, Na L. Study on appropriate density of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia Pseudoacacia* for soil and water conservation forests in Loess area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, (2): 58-62.
- [35] Zhao Y J, Li J, Wang X C, *et al*. Simulation of water productivity and soil desiccation of artificial *Pinus tabulaeformis* forestland on the Loess Plateau. *Journal of Northwest A & F University (Natural science edition)*, 2007, 35 (7): 61-68.

参考文献:

- [1] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展. *林业科学*, 2005, 41 (4): 155 ~ 161.
- [2] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征. *植物生态学报*, 2002, 26 (3): 339 ~ 345.
- [3] 陈云明, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原人工林土壤水分效应的地带性特征. *自然资源学报*, 2004, 19 (2): 195 ~ 200.
- [4] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [6] 侯庆春, 韩蕊莲, 等. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999, (5): 11 ~ 14.
- [7] 李军, 邵明安, 张兴昌. EPIC模型中农田水分运移与利用的数学模拟. *干旱地区农业研究*, 2004, 22 (2): 72 ~ 75.
- [8] 李军, 邵明安, 张兴昌. EPIC模型中土壤氮磷运转和作物营养的数学模拟. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (2): 166 ~ 173.
- [9] 李军, 邵明安, 张兴昌. EPIC模型中作物生长和产量形成过程的数学模拟. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2004, 32 (增刊): 25 ~ 30.
- [10] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC模型数据库组建. *西北农林科技大学学报*, 2004, 32 (8): 21 ~ 26.
- [11] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究. *自然资源学报*, 2004, 19 (16): 738 ~ 745.
- [12] 李军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱地高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究. *中国生态农业学报*, 2007, 15 (2): 54 ~ 58.
- [13] 李凯荣, 王佑民. 黄土塬区刺槐人工林地土壤水分的特征与生产力研究. 见: 中国科学院资源环境局. 黄土高原小流域综合治理与发展. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- [14] 李世荣, 张卫强, 贺康宁. 黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态. *中国水土保持科学*, 2003, (02): 31 ~ 35.
- [15] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3 (2): 91 ~ 101.
- [16] 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究. 北京: 科学技术文献出版社, 1991.

- [17] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427 ~ 432.
- [18] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(2): 210 ~ 217.
- [19] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 (第五卷). 北京: 中国农业出版社, 1995. 244 ~ 254.
- [20] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤. 北京: 科学出版社, 1992.
- [22] 王百田, 王颖, 郭江红, 等. 黄土高原半干旱区地区刺槐人工林密度与地上生物量效应. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 35 ~ 39.
- [23] 王进鑫, 黄宝龙, 罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征. 生态学报, 2004, 24(11): 2395 ~ 2401.
- [24] 王力, 邵明安, 张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布与分异特征. 应用生态学报, 2004, 15(3): 436 ~ 442.
- [25] 王孟本, 李洪建. 黄土高原人工林水分生态研究. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [28] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998.
- [29] 杨维西. 试论我国北方地区人工林植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32(1): 78 ~ 84.
- [30] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433 ~ 438.
- [31] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [32] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学, 1996, 32(4): 289 ~ 296.
- [33] 赵宏伟, 李宝船. 泾川县刺槐炭薪林生长状况分析. 防护林科技, 2000, (1): 17 ~ 19.
- [34] 张建军, 贺维, 纳磊. 黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究. 中国水土保持科学, 2007, (2): 58 ~ 62.
- [35] 赵玉娟, 李军, 王学春, 等. 延安油松人工林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟研究. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35(7): 61 ~ 68.