

黄土高原半干旱区春小麦和春玉米产量动态与土壤干燥化效应模拟研究^{*}

胡伟^{1,2}, 李军^{1,3}, 孙剑¹, 陈豫¹, 王学春¹, 王美艳¹

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 新疆生产建设兵团农五师八十一团, 新疆 博乐 833411;
3. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 为了寻求与黄土高原半干旱区降水状况相适应、有利于土壤水分可持续利用的大田作物及其合理的施肥水平, 为当地粮食生产的可持续发展提供科学依据。在数据库组建的基础上, 应用 WinEPIC 模型定量模拟研究了黄土高原半干旱区固原 1960–2000 年不同肥力水平下连作春玉米和春小麦产量变化和深层土壤水分效应。结果表明: (1) 连作条件下春玉米和春小麦产量均随降水量呈现波动性降低趋势, 产量波动性春玉米明显大于春小麦; (2) 与连作春小麦相比, 春玉米田 0–7 m 土层土壤有效含水量较低, 土壤干燥化速度较快; (3) 随肥力水平的提高和作物连作年限的延长, 农田土壤干层逐年加深和加厚, 无肥、低肥、中肥、高肥处理下春玉米田土壤干层分别在连作第 9 年、第 6 年、第 8 年和第 6 年后分布于 2–3, 2–3, 2–4, 2–4 m 土层, 春小麦田土壤干层分别在连作第 11 年、第 8 年、第 6 年和第 8 年后分布于 2–3, 2–3, 2–3, 2–4 m 土层, 此后仅 0–2 m 土层土壤湿度随降水量发生年际变化; (4) 从产量稳定性、土壤干燥化程度和农田土壤水分可持续利用角度统筹考虑, 固原旱地适宜于种植春小麦, 适宜的施肥量范围为 N 60–90 kg/hm² 和 P₂O₅ 30–45 kg/hm²。

关键词: 黄土高原半干旱区; 粮食作物; WinEPIC 模型; 产量; 施肥; 土壤有效含水量; 土壤干燥化

中图分类号: S512.1; S513; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)01-0149-07

Simulation of Grain Yield and Soil Desiccation of Spring Wheat and Corn Fields in Semi-Arid Area of Loess Plateau

HU Wei^{1,2}, LI Jun^{1,3}, SUN Jian¹, CHEN Yu¹, WANG Xue-chun¹, WANG Mei-yan¹

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Xinjiang Production and Construction Agricultural 5th Division 81 Regiment, Bole, Xinjiang 833411, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To provide scientific basis for sustainable development of local crop production, that was fit for the fertilization levels and crop and adapt to precipitation condition of the dryland in semi-arid area of Loess Plateau as well as beneficial to soil water sustainable utilization. Based on model databases establishment, the WinEPIC model was used to simulate yield and soil water effects of continuous spring wheat under different level fertilization treatments at Guyuan of semi-arid area of Loess Plateau. The simulated results show as following: (1) Grain yield of the continuous spring wheat and corn decline along with rainfall changes, and spring corn yield volatility was higher than spring wheat. (2) Compared to spring wheat, available soil water amounts in 0–7 m soil layers of spring corn was lower, and soil desiccation speed was faster. (3) Thickness and distributed depth of desiccated soil layers on grain crop fields increased gradually

^{*} 收稿日期: 2008-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30471024; 30771280; 40371077)

作者简介: 胡伟(1981–), 男, 宁夏吴忠人, 硕士研究生, 主要从事有机农业和作物生产系统模拟与决策方面的研究。E-mail: wh_1981225@163.com

通信作者: 李军(1964–), 男, 甘肃涇川人, 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。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

as grain crops growth years and the level of fertilization. Distribution depth of desiccated soil layers of spring corn field was 2– 3 m of no fertilization and low fertilization, 2– 4 m of medium fertilization and high fertilization treatments after spring corn growth 9, 6, 8 and 6 years respectively. Distribution depth of desiccated soil layers of spring wheat field was 2– 3 m of no fertilization, low fertilization and medium fertilization treatments, 2– 4 m of high fertilization treatments after spring wheat growth 11, 8, 6 and 8 years respectively, then only 0– 2 m layer of soil moisture with the annual changes in rainfall. (4) From the yield stability, the degree of soil desiccation and soil moisture in grain crop fields sustainable use perspective into consideration, spring wheat is appropriate to plant in Guyuan dryland, and its fertilization apply amounts are N 60~ 90 kg/hm² and P₂O₅ 30~ 45 kg/hm².

Key words: semi-arid area of Loess Plateau; grain crop; WinEPIC model; grain yield; fertilization; available soil water amount; soil desiccation

春小麦和春玉米是黄土高原半干旱区旱作农田两大主要粮食作物。由于地处半干旱地区降水稀少且年际变幅大,旱地作物生产受干旱胁迫严重,产量低且稳定性差。李玉山研究认为^[1],随着旱塬地“以肥调水”等抗旱栽培技术的应用,农田土壤水分高效利用虽然促进了粮食增产,却导致旱作高产农田土壤干燥化,降水入渗深度变浅,土壤水库贮水量减少,农田作物产量波动性加剧。目前,旱塬地高产农田的产量稳定性和土壤水分环境效应引起了有关专家的极大关注^[2-6],但缺乏对旱地农田产量变化和深层土壤水分动态的长期定位试验研究,旱作高产农田深层土壤干燥化发生和作物产量波动规律尚不清楚。在初步模拟研究旱塬地小麦和春玉米产量动态和根层土壤水分变化基础上^[7-8],本研究借助美国研制的 EPIC 模型,长期定量模拟和分析不同施肥水平下连作春小麦和春玉米产量波动性和深层土壤水分动态变化,揭示黄土高原半干旱区旱作农田长时段内自然降水、土壤贮水和作物耗水的动态关系,寻求与当地降水状况相适应的、有利于土壤水分可持续利用的大田作物及其合理的施肥水平,为黄土高原半干旱区粮食生产的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

借助美国研制的 WinEPIC 模型,选择固原试区代表黄土高原半干旱区,将收集到的固原试区 1958– 2001 年的 44 a 的实时逐日气象数据(逐日日照时数、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速、风向)在 Excel 中按照 EPIC 模型要求进行处理后,经过模型附带的 WXPm 气象处理软件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^[9]。通过实地观测和查阅相关资料^[10-12],

建立了固原的黄绵土土壤剖面土壤理化性状数据库,以及固原春小麦和春玉米田间管理数据库(春小麦种植密度为 4.5×10^6 株/hm²,春玉米种植密度 5×10^4 株/hm²),定量模拟研究黄土高原半干旱区旱地不同施肥水平下连作春玉米和春小麦产量变化和深层土壤水分变化动态。

1.1 研究区概况

固原地处 36.0°N, 106.4°E, 海拔 1 676.0 m, 年均气温 6.1℃, ≥10℃年积温 2 259.7℃, 年降水量 455.4 mm, 年蒸发量 1 772.5 mm, 冬季寒冷干旱、夏季炎热多雨,昼夜温差大,春季和夏初雨量偏少,灾害性天气多,降水年际间差异大。土壤主要为黄绵土,田间持水量和凋萎湿度分别为 19% 和 5%。农作物以小麦和春玉米为主,秋杂粮品种繁多,主要有马铃薯、豆类、糜、荞麦等。

1.2 WinEPIC 模型简介

土壤侵蚀和生产力影响计算模型 EPIC (Erosion– Productivity Impact Calculator) 是美国研制的定量评价“气候– 土壤– 作物– 管理”综合连续系统的动力学模型。它由气象模拟、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,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^[13-14]。本研究采用的 WinEPIC3060 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,特别适合于旱地作物土壤水分生态环境效应的模拟和分析^[15-16]。在世界范围内 EPIC 模型已广泛应用于大田作物生产力的模拟研究^[17-20]。有关 EPIC 模型中

的数学模拟原理、参数修订、数据库组建、模型验证及其应用研究,可参看相关文献^[9,21-26]。

1.3 模拟研究方法

为了比较不同施肥水平下连作春小麦和春玉米产量动态和土壤水分利用演变状况,设定 4 种施肥水平处理:无肥、低肥($N\ 60\ kg/hm^2$, $P_2O_5\ 30\ kg/hm^2$)、中肥($N\ 90\ kg/hm^2$, $P_2O_5\ 45\ kg/hm^2$)和高肥($N\ 120\ kg/hm^2$, $P_2O_5\ 60\ kg/hm^2$),肥料施用时间同于大田。在 1960–2000 年期间,分别定量模拟和分析比较黄土高原半干旱区连作春小麦和春玉米产量波动性和土壤水分动态变化。在统计作物生育期降水量时,春小麦以每年 3 月初春小麦播种至 7 月初春小麦成熟,春玉米以每年 4 月中旬春玉米播种至 9 月下旬春玉米成熟为时段进行统计。在分析农田逐月土壤有效含水量变化动态时,以每月 15 日土壤有效含水量模拟数据代表该月土壤有效含水量;在分析农田土壤湿度剖面分布变化特征时,采用模型输出的每年 9 月 15

日土壤湿度剖面分布模拟数据代表该年农田的土壤湿度剖面分布特征,其中土壤剖面分别为 0–0.01, 0.01–0.2, 0.2–0.5, 0.5–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6, 6–7 m 10 个土层。

2 模拟结果与分析

2.1 实时降水特征

1960–2000 年固原年降水量为 268.1~751.5 mm,平均值为 438.2 mm,标准差 106.1 mm,变异系数为 24.2%,41 a 降水量呈现波动性下降趋势(图 1)。在 41 a 期间,年降水量多集中在 7–9 月,占全年降水量的 60%。春小麦生育期降水量为 122.9~388.2 mm,平均值为 233.2 mm,标准差 62.3 mm,变异系数为 26.7%,春玉米生育期降水量和年降水量变化趋势基本一致,其值为 202.4~704 mm,平均值为 377.3 mm,标准差 103.1 mm,变异系数为 27.3%。

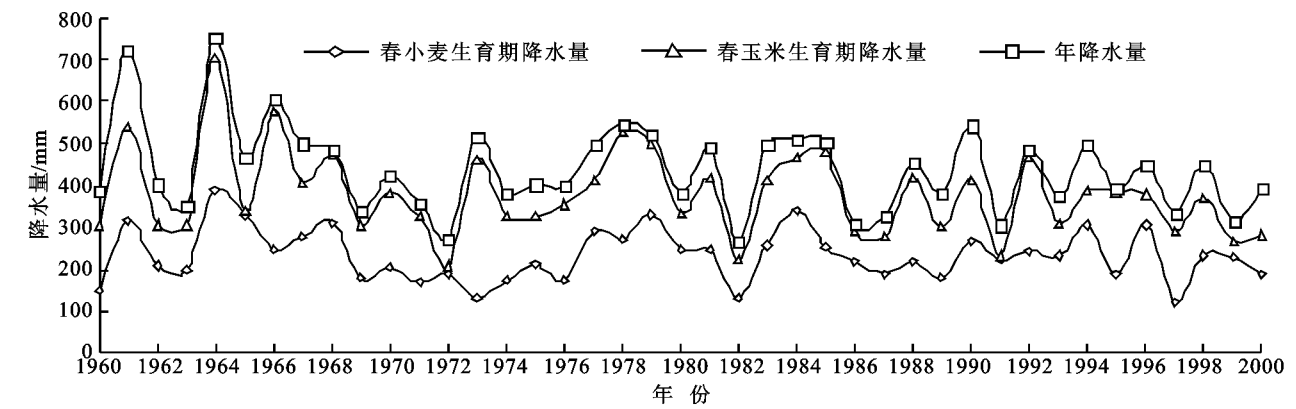


图 1 固原年降水量和农作物生育期降水量观测值

2.2 不同施肥水平下作物产量变化动态模拟

在 1960–2000 年研究期间,固原试区连作春玉米和春小麦产量模拟值均随降水量呈现波动性降低趋势(图 2)。春玉米和春小麦在无肥、低肥、中肥和高肥施肥条件下产量模拟值变化趋势基本一致,高产年份多出现在模拟前期和降水较多的年份,低产年份则多出现在模拟后期和降水较少的年份,在高产和平产年份,肥力处理间产量差异十分明显,施肥处理明显高于无肥处理,而在低产年份,肥力处理间产量差异较小。

无肥、低肥、中肥和高肥 4 种施肥水平下固原连作春玉米产量分别为 0.271~4.42, 0.312~5.596, 0.318~5.788, 0.332~5.985 t/hm^2 , 平均值分别为 1.709, 2.353, 2.644, 2.782 t/hm^2 , 标准差分别为 1.004, 1.297, 1.357, 1.414 t/hm^2 , 变异系数分别为 58.7%, 55.1%, 51.3%, 50.8%, 连作春小麦产量变化范围分别为 0.519~3.033, 0.835~3.578, 0.998

~3.787, 1.058~3.958 t/hm^2 , 平均值分别为 1.439, 2.067, 2.460 和 2.669 t/hm^2 , 标准差分别为 0.726, 0.719, 0.703, 0.748 t/hm^2 , 变异系数分别为 50.6%, 34.8%, 28.5%, 28.0%。固原试区不同肥力水平下连作春玉米产量与其变异系数均高于连作春小麦,表明在不同肥力水平下春玉米产量波动性明显大于连作春小麦。

2.3 不同肥力处理下作物生长期干旱胁迫与氮素胁迫的变化

在 1960–2000 年研究期间,无肥、低肥、中肥和高肥 4 种施肥条件下固原试区春玉米生长期干旱胁迫天数和氮素胁迫天数的年均值均大于春玉米(表 1)。固原试区连作春玉米和春小麦均呈现高肥处理下干旱胁迫天数明显多于无肥、低肥和中肥处理,而 N 素胁迫程度则表现出随施肥量增加而逐渐降低。结果表明:固原试区连作春玉米比春小麦更容易遭受干旱胁迫, N 素胁迫的程度也明显高于春小麦。

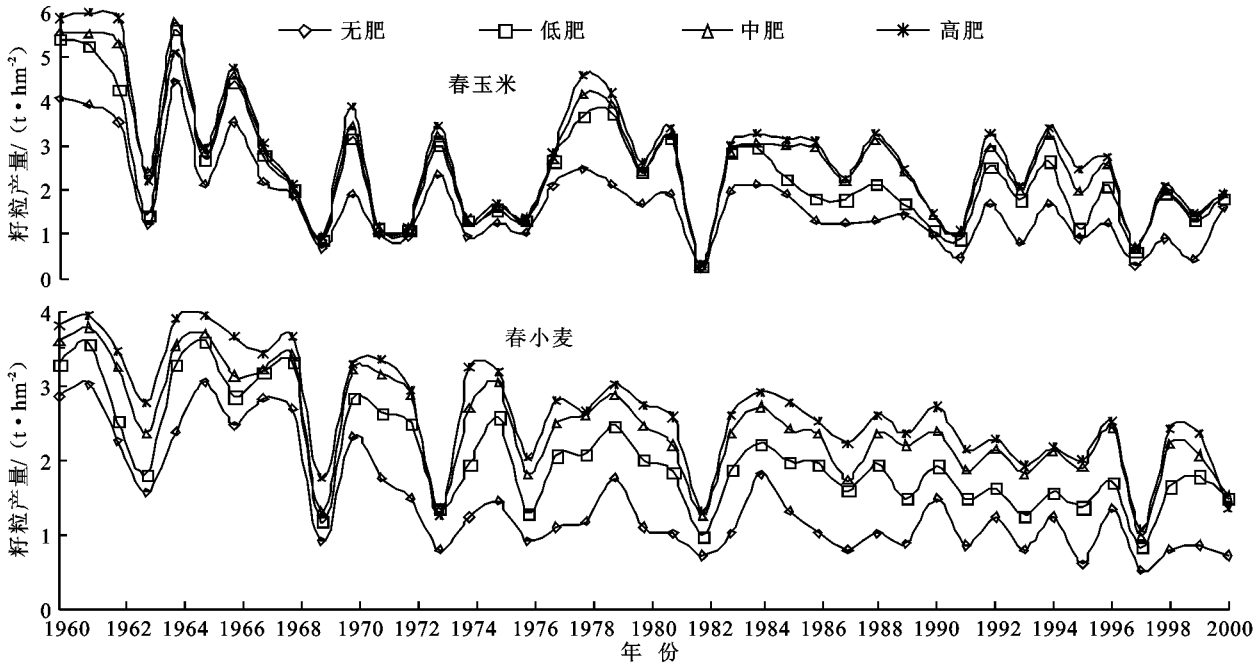


图 2 固原试区不同施肥条件下连作春玉米和春小麦产量模拟值变化比较

表 1 41 a 研究期间不同肥力处理下作物
生长期干旱胁迫与氮素胁迫模拟值

项 目	干旱胁迫时间/d		氮素胁迫时间/d	
	春玉米	春小麦	春玉米	春小麦
无肥	48.1	22.7	49.4	42.3
低肥	55.9	25.1	23.9	17.1
中肥	61.5	29.1	16.5	9.6
高肥	62.8	38.2	4.3	2.5

2.4 不同施肥水平下农田 0- 7 m 土层土壤有效含水量变化

在 1960- 2000 年模拟研究期间, 固原试区无肥条件下春玉米和春小麦地 7 m 土层逐月土壤有效含水量变化曲线均在较高水平上波动, 而低肥、中肥和高肥处理下逐月土壤有效含水量明显低于无肥处理, 且在较低水平上波动, 肥力越高, 土壤有效含水量越低, 年度和季节变幅越大。在干旱年份和作物生长旺盛期, 农田土壤有效含水量显著降低, 而在多雨年份和休闲期得到降水补充而恢复和提高。通常春玉米田每年 5- 8 月生长期土壤有效含水量较低, 而 9 月至翌年 4 月土壤有效含水量较高。每年 5- 6 月小麦旺盛生长时期, 麦田土壤有效含水量显著降低, 而在 7 月小麦收获后得到恢复和提高(图 3)。无肥、低肥、中肥和高肥处理下玉米田 0- 7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值分别在 567~ 1 019, 497~ 1 019, 469~ 1 019 和 371~ 1 019 mm 范围内波动, 其平均值分别为 606, 536, 511, 421 mm, 标准差分别为 57. 8, 69. 1, 74. 7, 95. 6 mm, 变异系数分别为 9. 6%, 12. 8%, 14. 6%, 22. 7%。连作春小麦地 0

- 7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值分别在 546~ 1 019, 364~ 1 019, 337~ 1 019, 227. 5~ 1 019 mm 范围内波动, 其平均值分别为 758, 587, 560, 454 mm, 标准差分别为 87. 9, 101. 8, 103. 3, 115. 4, 变异系数分别为 11. 6%, 17. 3%, 18. 5%, 25. 4%。固原试区连作春玉米和春小麦均呈现无肥与低肥、中肥和高肥处理间差异十分显著, 低肥与中肥处理间差异不明显, 但与高肥处理间差异十分明显, 肥力越高, 土壤有效含水量越低, 年度和季节变幅越大。

不同施肥水平下固原试区春玉米和春小麦模拟初期的前 1~ 4 a 期间, 土壤干燥化趋势十分强烈, 此后当土壤干层达到稳定后 7 m 土层土壤有效含水量长期在较低水平上随降水量变化而波动(图 3)。无肥、低肥、中肥和高肥处理下固原玉米田土壤有效含水量均从 1960 年 1 月(春玉米播种前) 的 1 019 mm, 分别降低到 1963 年 1 月的 665, 595, 595, 504 mm, 春玉米连作 3 a 期间分别减少 354, 424, 424, 515 mm, 年均土壤干燥化速度为 118. 0, 141. 3, 141. 3, 171. 7mm/a; 4 种肥力条件下固原麦田土壤有效含水量均从 1960 年 1 月(春小麦播种前) 的 1 019 mm, 分别降低到 1963 年 1 月的 828, 737, 709, 418 mm, 3 a 期间分别减少 190, 281, 309, 418 mm, 年均土壤干燥化速度为 63. 6, 93. 9, 103. 1, 139. 5 mm/a。模拟结果表明: 固原试区不同肥力水平下连作春玉米土壤有效含水量均低于连作春小麦, 但其土壤干燥化速度明显快于连作春小麦。

2.5 不同施肥条件下农田土壤湿度剖面分布特征

在 1960- 2000 年期间, 随着肥力水平和作物产

量水平的提高,土壤干燥化程度加剧,土壤干层厚度逐年增厚。和模拟初期的 1960 年相比,无肥、低肥、中肥和高肥处理下春玉米和春小麦田均在连作模拟初期出现了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的过程,之后形成稳定的土壤干层,现以固原试区连作春玉米和春小麦无肥、高肥处理为例表示模拟初期、中期和末期土壤湿度剖面分布特征的变化过程(图 4,5)。4 种肥力处理玉米田土壤水分利用最大深度分别在连作第 7~8 年、第 4~5 年、第 6~7 年和第 4~5 年达到 3,3,4,4 m,分别在玉米田连作第 9 年、第 6 年、第 8 年和第 6 年后玉米田 2~3,2~3,2~4,2~4 m 土层土壤湿度长期保持基本稳定状

态,已不随降水发生年度变化,只有 0~2 m 土层土壤湿度随降水量发生年际变化,无肥、低肥处理下连作春玉米土壤干层分布于 2~3 m 土层,中肥和高肥处理下分布于 2~4 m 土层。类似于春玉米,4 种肥力处理麦田土壤水分利用最大深度分别在连作第 9~10 年、第 6~7 年、第 4~5 年和第 6~7 年达到 3,3,3,4 m,分别在麦田连作第 11 年、第 8 年、第 6 年和第 8 年后麦田 2~3,2~3,2~3,2~4 m 土层土壤湿度长期保持基本稳定状态。无肥、低肥和中肥处理下连作春小麦土壤干层分布于 2~3 m 土层,高肥处理下分布于 2~4 m 土层。模拟结果表明:固原连作春玉米干燥化进程快于连作春小麦。

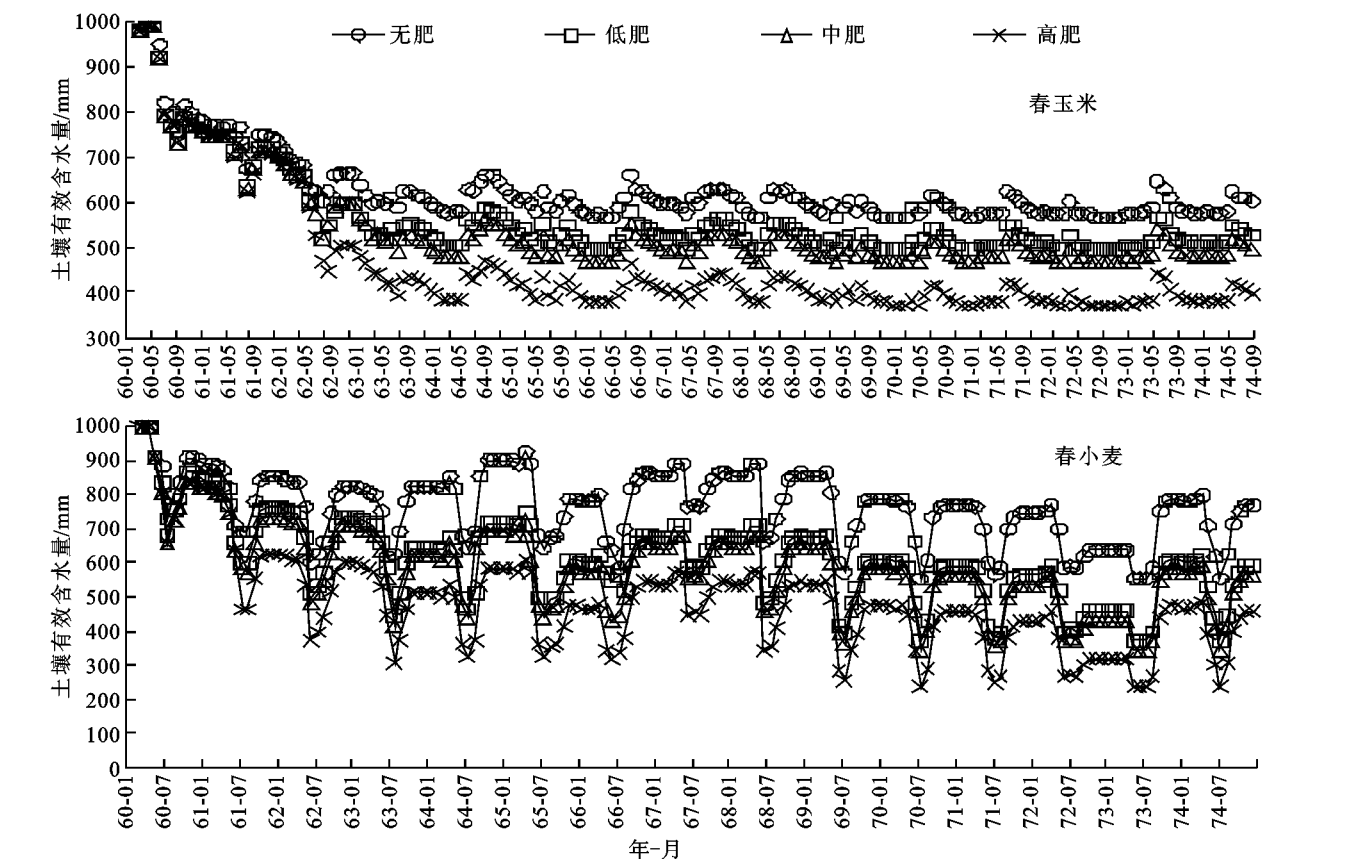


图 3 固原不同施肥条件下连作春玉米和春小麦 0~7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值变化动态

3 结论与讨论

水分和养分是影响黄土高原旱地农业生态系统生产力的主要因素,对作物生长具有协同效应^[27]。黄土高原半干旱区降水稀少且年际变幅大,旱地作物生产受干旱胁迫严重,产量低且稳定性差。施肥是提高旱区作物水分利用率,实现增产的主要措施^[28-29]。刘忠民等^[30]认为增施肥料可以促进春小麦根系增长,根量增加,从而提高了产量和水分利用效率。黄明斌等^[2]认为旱作农田高生产力改变了土壤耗水层深度和降水入渗补给深度。旱地长期施肥

对土壤水库有较大影响,施肥处理的土壤水分处于一个较低的水平,而不能恢复到无肥或裸地的土壤水分水平,导致了旱作高产农田土壤干燥化^[1,31]。王力等^[6]认为土壤干层是由于降水不能满足植被需求,当降水量一定时,起决定作用的便是作物种类,并且提出了形成干燥化现象的农作物主要包括玉米、小麦、谷子,向日葵等。长武旱塬长期定位试验研究表明^[1-2],高产小麦和玉米根系直接吸水层达 3 m,对土壤水分利用深度可以达到 5 m,能使 2 m 以下土壤含水量明显低于裸地和荒草地,也明显低于低产粮田。

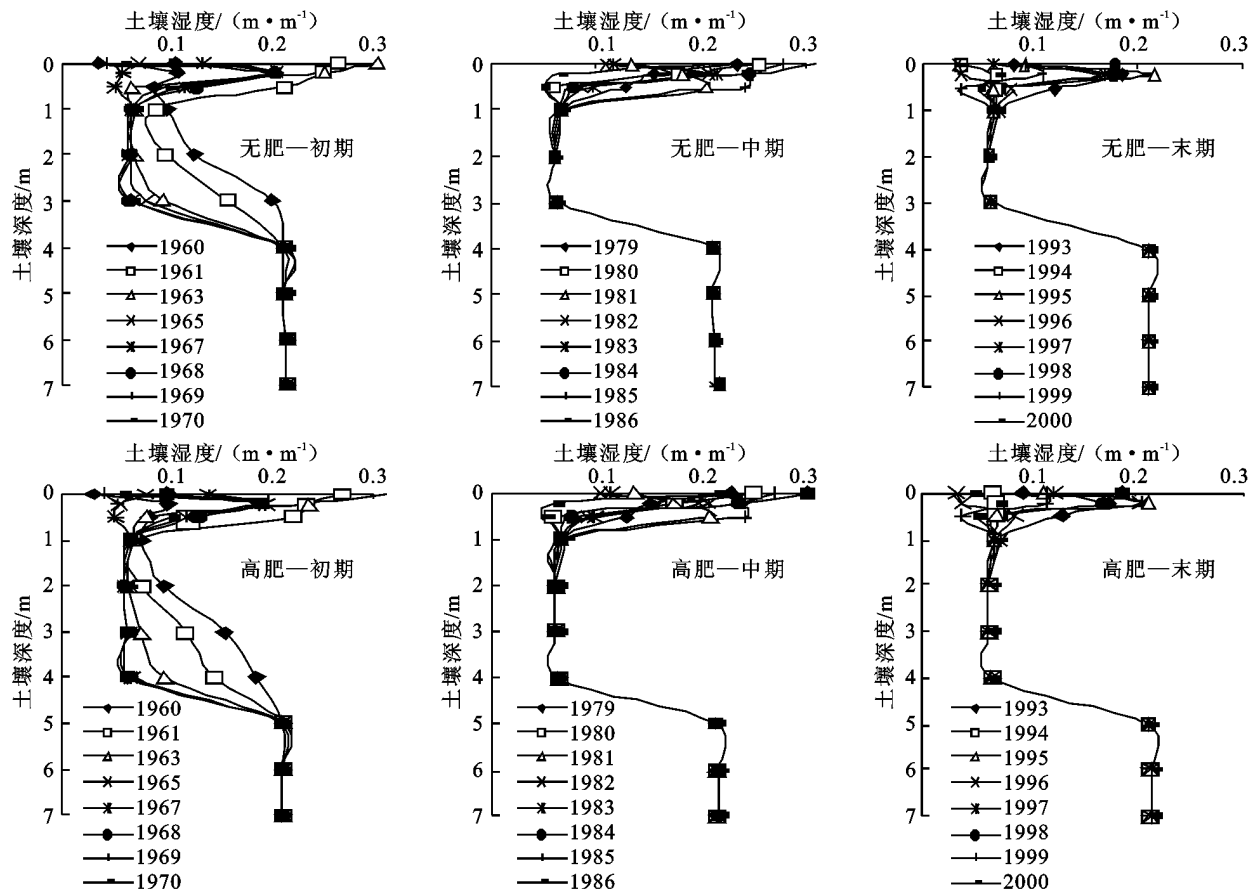


图 4 固原试区春玉米田模拟初期、中期和末期 0—7 m 土壤湿度剖面分布变化比较

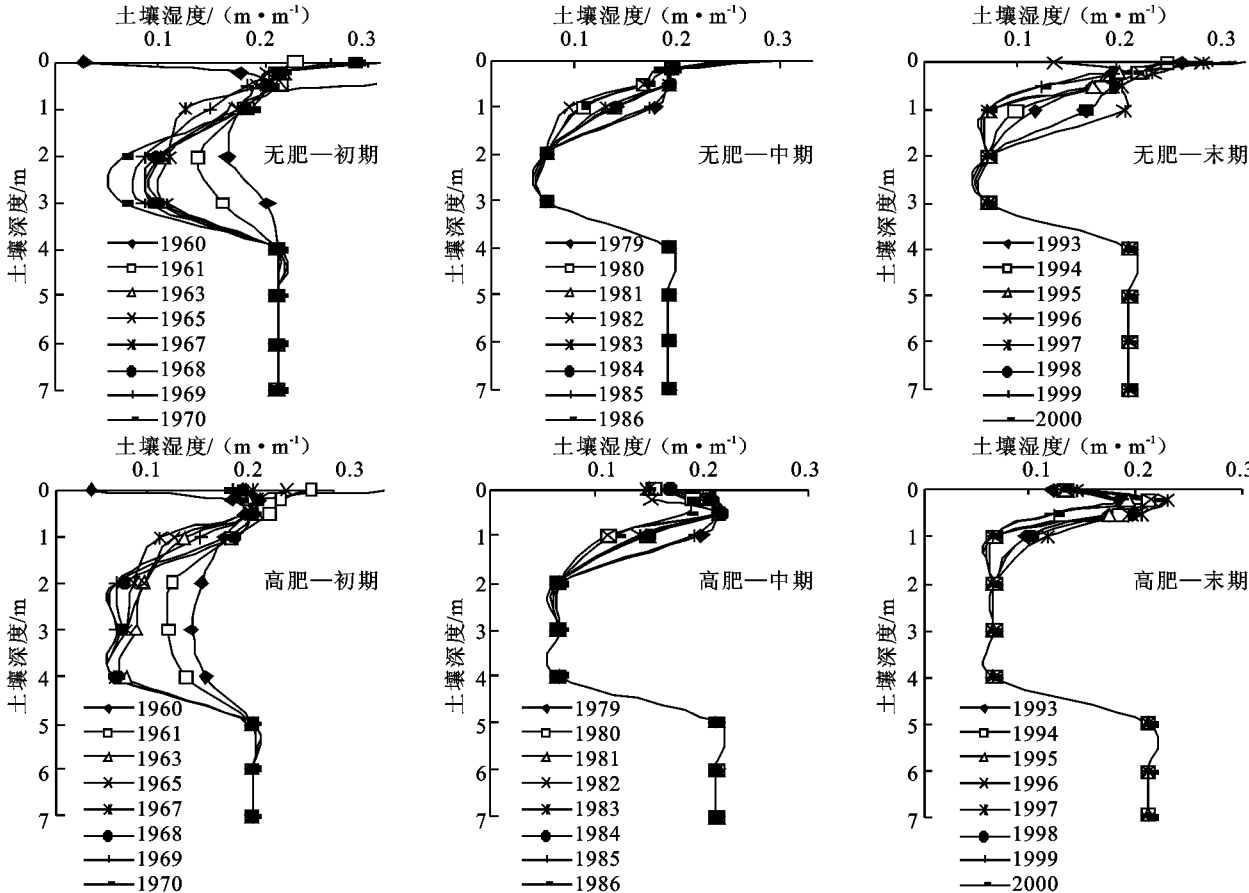


图 5 固原试区春小麦田模拟初期、中期和末期 0—7 m 土壤湿度剖面分布变化比较

本试验模拟结果表明:施肥提高了春玉米和春小麦的产量,却导致了旱作农田深层土壤水分过耗和土壤干燥化现象的发生。在土壤干燥化过程中,高产农田比低产农田的作用程度更强,它们都造成了土壤干层,即土壤含水量长年接近凋萎湿度的层次。在模拟过程中,连作条件下春玉米和春小麦产量均随降水量呈现波动性降低趋势,产量波动性春玉米明显大于春小麦。黄土高原半干旱区年降水量多集中在 7—9 月,通常春玉米生长旺盛期(7—8 月)土壤有效含水量较低,而在 9 月至翌年 4 月土壤有效含水量相对较高,小麦旺盛生长期(5—6 月)土壤有效含水量显著较低,而在 7 月小麦收获后得到恢复和提高。与连作春小麦相比,春玉米田 0—7 m 土层土壤有效含水量较低,土壤干燥化速度较快。由于降水只能补偿到 1.5~2 m 土层,模拟前期农田 2—4 m 土层形成了难以恢复的土壤干层,严重影响了农田生态系统的稳定性。无肥、低肥、中肥、高肥处理下春玉米田土壤干层分别在连作第 9 年、第 6 年、第 8 年和第 6 年后分布于 2—3, 2—3, 2—4, 2—4 m 土层,春小麦田土壤干层分别在连作第 11 年、第 8 年、第 6 年和第 8 年后分布于 2—3, 2—3, 2—3, 2—4 m 土层。从产量稳定性、土壤干燥化程度和农田土壤水分可持续利用角度统筹考虑,固原旱地适宜于种植春小麦,适宜的施肥量范围为 $N\ 60\sim 90\text{ kg/hm}^2$ 和 $P_2O_5\ 30\sim 45\text{ kg/hm}^2$ 。在干旱年份从事粮食生产时,采用免耕或休闲耕作制,通过对全年或雨季耕地休闲来蓄积雨水,实现降水在时间上的富集与叠加,消除作物生产带来的土壤干燥化危害。今后,在土壤干燥化恢复方面,除了选择适宜施肥量外,还可以考虑能否采用休闲轮作方式(作物→作物→休闲)或粮草轮作来恢复土壤干层的水分,揭示黄土高原半干旱区旱作农田长时段内自然降水、土壤贮水和作物耗水的动态关系,寻求与当地降水状况相适应的、有利于土壤水分可持续利用的大田作物、施肥水平和轮作方式,为黄土高原旱区粮食生产的可持续发展提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
- [2] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54.
- [3] 穆兴民, 徐学选, 陈霏巍. 黄土高原生态水文研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [4] 郝明德, 王旭刚, 党廷辉, 等. 黄土高原旱地小麦多年定

位施用化肥的产量效应分析[J]. 作物学报, 2004, 22(3): 1108-1102.

- [5] 董翠云, 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作农田高生产力的水分环境效应与产量波动性[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 204-206.
- [6] 王力, 邵明安, 王全九, 等. 黄土区土壤干化研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 9(4): 27-30.
- [7] 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(16): 738-745.
- [8] 李军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱塬区高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 54-58.
- [9] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(8): 21-26.
- [10] 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.
- [11] 王吉智. 宁夏土壤[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1990.
- [12] 李小芳, 李军, 王学春, 等. 半干旱黄土丘陵区柠条林水分生产力和土壤干燥化效应模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 113-119.
- [13] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Trans ASAE, 1989, 32(2): 475-511.
- [14] Williams J R, Dyke P T, Fuchs W W, et al. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User Manual[M]. USDA Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 1990.
- [15] Texas A & M Blackland Research Center. Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1.0[M]. BRC report No. 0406, 2004.
- [16] Gerik T J, Harman W L, Williams J R, et al. User's Guide: Crop Man (Crop Production and Management) Model, Version 3.2[M]. Blackland Research and Extension Center, Temple, Texas, 2003.
- [17] Bryant K J, Benson V W, Kiniry J R, et al. Simulating corn yield response to irrigation timings: Validation of the EPIC model[J]. Prod. Agric., 1992(5): 237-242.
- [18] Cabelguenne M, Debaeke P. Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat[J]. Plant Soil, 1998, 202: 175-192.
- [19] Jose C, Inma F, Philippe D, et al. Simulation of Maize Yield under Water Stress with the EPIC phase and CROPWAT Models[J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 679-690.

自然处于相对弱势, 它不能像人一样思考, 拥有并行使权利。因此需要人类来发挥自己的主观能动性, 以生态道德为基础和导向, 建立一系列的制度、法规等来协调人与自然的关系。水土保持补偿机制的建立达到了支持水土保持事业, 强化生态道德和缓解人与自然之间的生态伦理关系的作用^[3]。

8 结 语

以上部分从 7 个不同的理论入手, 揭示了水土保持生态补偿的理论基础。复合生态系统理论提出了水土保持生态补偿制度建立的迫切性和根本性; 环境资源价值理论说明了建设水土保持生态补偿制度的价值所在; 外部经济效益理论、产权理论、公共产品理论和公平理论从经济学和管理学的角度阐述了建立水土保持生态补偿制度的可能性和必要性; 而生态伦理理论则说明水土保持补偿机制应该具有的特殊性。

由于水、土资源具有公共产品属性等特性, 决定了建立水土保持生态补偿机制的主体是政府。政府在建立该补偿机制过程中应当结合水土保持生态补偿机制的理论基础, 科学合理的完成从立法到执法的各项工作, 对补偿对象、补偿强度、补偿方式等核心问题进行全面而严格的确定^[14]。总体上应从社会公平性、维护公共利益的原则出发, 通过政策和经济的手段, 解决区域内或区域间资源、环境和经济发展的不平衡问题, 激励全社会共同参与水土保持和生态环境保护, 最终实现资源和环境永续利用和可持续发展。

参考文献:

[1] 仇蕾, 王慧敏. 复合生态系统运行中的熵理分析[J]. 科学管理研究, 2004, 22(6) : 1-3.

[2] 郭超颖, 毕华兴, 林靓靓, 等. 水土保持生态补偿的生态学与系统学基础[J]. 中国水土保持, 2008(1) : 28-30.

[3] 张小蒂. 资源节约型经济与利益机制[M]. 上海: 上海三联书店, 1993.

[4] 沈满洪, 陆篝. 论生态保护补偿机制[J]. 浙江学刊, 2004(4) : 217-220.

[5] 王礼先. 中国水利百科全书: 水土保持分册[M]. 中国水利水电出版社, 2004.

[6] 黄立洪, 柯庆明, 林文雄. 生态补偿机制的理论分析[J]. 中国农业科技导报, 2005, 7(3) : 7-9.

[7] 郭升选. 生态补偿的经济学解释[J]. 西安财经学院学报, 2006, 19(6) : 43-48.

[8] 毕华兴, 毕嘉敏, 刘立斌, 等. 论实行水土保持生态补偿的经济学基础[J]. 中国水土保持, 2008(1) : 25-27.

[9] 毕华兴, 林靓靓, 郭超颖. 建立中国水土保持生态补偿机制的基本准则[J]. 中国水土保持, 2008(1) : 19-21.

[10] 姜德文, 郭孟霞, 毕华兴, 等. 水土保持生态补偿理论与机制[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(6) : 93-98.

[11] 陈钦. 公益林生态补偿研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.

[12] 郭升选. 生态补偿的经济学解释[J]. 西安财经学院学报, 2006, 19(6) : 43-48.

[13] 周鸿, 蒙睿. 生态补偿机制的生态伦理学基础[J]. 云南环境科学, 2005, 24(2) : 37-39.

[14] 胡续礼, 张旸, 杨树江, 等. 浅析水土保持生态补偿机制建立的理论基础及实现途径[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4) : 6-8.

(上接第 155 页)

[20] Roloff G, de Jong R, Zentner R P, et al. Estimating spring wheat yield variability with EPIC[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1998, 78(3) : 541-549.

[21] 李军, 邵明安, 张兴昌. EPIC 模型中农田水分运转与利用的数学模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2) : 73-75.

[22] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2) : 166-173.

[23] 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.

[24] 王宗明, 梁银丽. EPIC 模型在黄土高原地区的应用[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1) : 44-47.

[25] 胡伟, 李军, 王学春, 等. 宁南旱地连作春小麦产量动态与土壤干燥化效应模拟研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(2) : 295-300.

[26] 王学春, 李军, 胡伟, 等. 黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下连作春玉米产量与土壤干燥化效应模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1) : 1-11.

[27] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3) : 411-416.

[28] 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3) : 221-226.

[29] 党廷辉. 施肥对旱地冬小麦水分利用效率的影响[J]. 生态农业研究, 1999, 7(2) : 28-31.

[30] 刘忠民, 山仑, 邓西平. 施肥和密度对春小麦产量根系及水分利用的影响[J]. 水土保持研究, 1998, 5(1) : 71-75.

[31] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 旱地长期施肥对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1) : 95-97.