

雨养条件下地下水埋深对夏玉米产量与水分利用效率的影响

赵子焄^{1,2,3}, 张晓涛^{2,3}, 蒋 静¹

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室;
3. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心)

摘要:为研究雨养条件下不同地下水埋深对夏玉米产量与水分利用效率的影响,通过地下水自动控制系统设置地下水埋深为 0.7、1.3、1.8 m 和正常田间埋深共 4 个处理(分别记为 $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 、 $D_{2.4}$),对雨养条件下夏玉米生育期内的土壤含水率、降雨利用率、潜水蒸发量、株高、叶面积指数、产量和耗水量等指标进行分析。结果表明:雨养条件下地下水埋深对土壤平均含水率、降雨利用率和水分利用效率有显著影响;与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下夏玉米全生育期土壤平均含水率显著增加了 6.9%~28.6%,降雨利用率分别降低了 23.2%、11.4%和 2.8%,株高、叶面积指数和干物质积累量分别降低了 1.7%~5.2%、5.8%~13.7%和 9.4%~19.5%;与其他地下水埋深相比, $D_{1.8}$ 处理可保证该地区夏玉米产量最大,水分利用效率最高。

关键词:地下水埋深;降雨利用率;夏玉米;产量;水分利用效率

Effects of groundwater depth on yield and water use efficiency of summer maize under rainfed conditions//Zhao Zihan^{1,2,3}, Zhang Xiaotao^{2,3}, Jiang Jing¹(1. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 3. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing)

Abstract: In order to investigate the effects of different groundwater depths on the yield and water use efficiency of summer maize under rainfed conditions, four treatments with groundwater depths of 0.7, 1.3, 1.8 m and the normal field depth (recorded as $D_{0.7}$, $D_{1.3}$, $D_{1.8}$, and $D_{2.4}$, respectively) were set up using the groundwater automatic control system. The soil moisture content, rainfall utilization rate, phreatic evaporation, plant height, leaf area index, yield and water consumption during the growth period of summer maize under rainfed conditions were analyzed. The results show that the groundwater depth has significant effects on the average soil water content, rainfall utilization rate, and water use efficiency under rainfed conditions. Compared with $D_{2.4}$, the average soil moisture content during the whole growth period of summer maize under $D_{0.7}$, $D_{1.3}$, and $D_{1.8}$ treatments increased significantly by 6.9%~28.6%, the rainfall utilization rate decreased by 23.2%, 11.4%, and 2.8%, respectively, and the plant height, leaf area index, and dry matter accumulation decreased by 1.7%~5.2%, 5.8%~13.7%, and 9.4%~19.5%, respectively. Compared with other groundwater depths, the $D_{1.8}$ treatment can ensure the highest yield and water use efficiency of summer maize in this area.

Key words: groundwater depth; rainfall utilization rate; summer maize; yield; water use efficiency

在地下水浅埋区,大气水、植物水、土壤水、地下水构成了一个完整的农田水分体系^[1-2],地下水对土壤-植物-大气连续体系统生物过程起到了关键的调控作用,地下水位的变化不仅会引起土壤环境的变化^[3-4],还会对农作物的生长和产量产生重要影响^[5-7]。不同地区、不同作物对地下水埋深的要求有所不同^[8-10]。国内外学者对地下水埋深与作物产量

的关系进行了大量的研究。例如:张朝新^[11]通过控制恒定地下水位,提出砂姜黑土种植条件下,适宜农作物生长的地下水埋深范围为:小麦 0.6~1.5 m、黄豆 0.4~1.0 m、芝麻 0.5~1.0 m、玉米 0.4~1.0 m; Mejia 等^[12]在 Bainsville 无石淤泥壤土上开展了为期 2 年的地下灌溉田间试验,发现地下水埋深控制在 0.5 m 或 0.75 m 时,玉米产量高于自由排水处

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3900602)

作者简介:赵子焄(2000—),女,硕士研究生,主要从事节水灌溉研究。E-mail:2141886835@qq.com

通信作者:蒋静(1984—),女,副教授,博士,主要从事节水灌溉、水土资源与环境研究。E-mail:jiangjing@tyut.edu.cn

理,在较干旱的年份,地下水调控对玉米产量的促进效应更明显;胡永胜^[13]在研究地下水埋深对作物生长的影响时,发现雨养条件下夏玉米在砂姜黑土、黄潮土中种植的最优地下水埋深分别为 0.6、1.0 m;孔繁瑞等^[14]通过作物充分灌溉控制灌水量,通过蒸渗仪试验得出内蒙古地区适宜玉米生长的地下水埋深为 1.5~2.0 m;鄂继芳等^[15]通过 2 年田间试验探究了不同地下水埋深与灌水量对玉米生长的影响,结果表明河套灌区玉米生长适宜的地下水埋深应控制在 1.75~1.85 m,灌水量应控制在 107.3~116.5 mm;武朝宝等^[16-17]基于传统畦灌的蒸渗仪试验得出,为同步提高春玉米产量和水分利用效率,山西汾河灌区在作物生育期内的地下水埋深应控制在 1.0 m 以下;张智翔等^[18]在研究并探索土壤盐分和地下水相互关系时发现,当地下水埋深介于 1.8~2.2 m 时,可以有效平衡作物的生长和土壤平均含水率;Li 等^[19]在研究华北平原浅层地下水对田间土壤理化性质和作物产量的影响时强调,地下水埋深为 1.1 m 最有利于玉米籽粒中干物质的积累,可为夏玉米提供最高的产量和有利的生长条件。

以往关于不同土壤质地^[11-13]和不同灌溉制度^[14-17]条件下地下水埋深对玉米产量及水分利用效率的研究较多,而对于雨养条件下地下水埋深对玉米水分利用效率的研究较少。鉴于此,本文主要研究雨养条件下不同地下水埋深对夏玉米生育期土壤水分、潜水蒸发量、降雨利用率、生长指标、耗水量等的影响,以探寻雨养条件下地下水埋深对夏玉米土壤水分及产量的影响规律,为夏玉米高产栽培和节水灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 6—10 月(夏玉米生育期)在中国水利水电科学研究院大兴节水灌溉试验研究基地(39°62′16″N, 116°43′15″E)的群集式蒸渗仪展开。研究基地为暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温为 12.3℃,平均降水量为 554 mm,试验期间的气温和降水量变化见图 1,试验区土壤为砂壤土,土层深厚,有机质含量丰富,田间持水量和饱和含水量分别为 33.3%和 45.6%。

1.2 试验设计

试验所使用的夏玉米品种为纪元 168。群集式大型蒸渗仪包括称重式蒸渗仪(2.0 m×2.0 m×2.4 m)和非称重式蒸渗仪(2.0 m×2.0 m×3.5 m),蒸渗仪四周是混凝土边界,具有不透水性,底边可以自由排水。试验采用单因素完全随机区组设计,共设

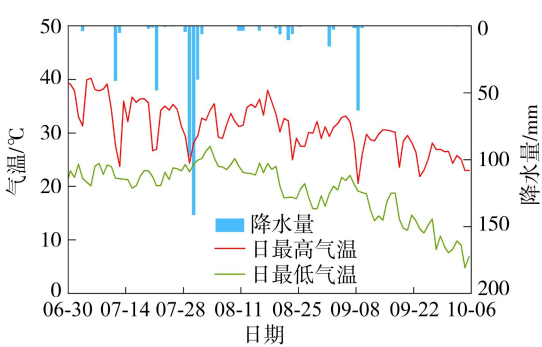


图 1 夏玉米生育期气温和降水量变化

3 个地下水埋深水平,分别为 0.7、1.3、1.8 m(依次记为 $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 处理),每个处理重复 4 次,并设置正常田间埋深(正常深度为 2.4 m,记为 $D_{2.4}$ 处理)做对照。地下水埋深由非称重式蒸渗仪的地下水自动控制系统实现,蒸渗测坑与供排水柱之间用管道连通,构成一个“连通器”。通过控制供排水柱的水位来间接控制蒸渗测坑内的地下水位。地下水自动控制系统如图 2 所示。

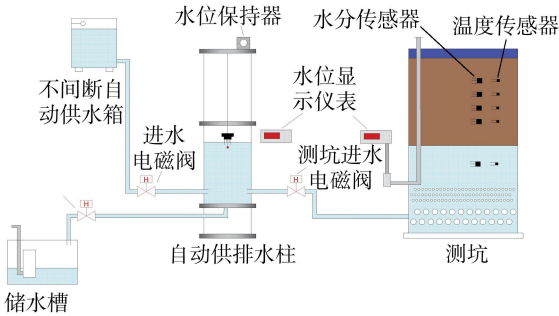


图 2 地下水自动控制系统

试验采用人工播种的方式,种植密度为 60 000 株/hm²。本试验种植夏玉米为 4 行 6 列,且蒸渗仪两两之间的距离与大田玉米行距相差不大,因此边际效应对本试验的影响可忽略不计。各试验处理施肥量相同,播种前施复合肥 450 kg/hm² ($w_{\text{总养分}} \geq 45.0\%$, $w(N) = w(P_2O_5) = w(K_2O) = 15\%$),拔节期追施尿素 450 kg/hm² ($w_{\text{总氮}} \geq 46\%$)。夏玉米在 6 月 29 日进行播前灌,6 月 30 日播种,10 月 6 日收获。试验均在大田气候下进行,没有启动防雨设备。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤数据

蒸渗仪内土壤的体积含水率和各层土壤温度用内置的土壤水分传感器(Hydra Probe II, 史蒂文斯公司,中国)测定并记录,监测时间间隔为 10 min。

1.3.2 地下补给量和深层渗漏量

称重式蒸渗仪配备 5 000 mL 量筒,每天 8:00 和 20:00 记录土壤渗漏量。非称重式蒸渗仪配备地下水供水控制系统,可自动监测渗漏量和地下水补给

量。进水量即潜水蒸发量,出水量即地下水渗漏量,进出水量之差即地下水补给量。在试验初期设置地下水埋深,在地下水稳定后,于8月2日至10月6日夏玉米收获期间,每天记录一次潜水蒸发量。

1.3.3 作物数据

生育期划分:苗期(6月30日至7月14日)、拔节期(7月15日至8月11日)、抽雄期(8月12日至9月16日)、成熟期(9月17日至10月6日)。

株高、叶面积:每个蒸渗仪测坑选择3株长势均匀的植株进行标记,在苗期和拔节期每3天测一次株高和叶面积,在大喇叭口期、抽雄期、成熟期每7天测一次株高和叶面积。株高和叶面积均采用钢卷尺测定。

干物质积累量:在拔节期后,每个小区选1株植株,每10天取样一次,将采集的样本带回实验室后,在通风烘箱105℃下杀青30 min,然后在70℃下烘干至恒重,此时重量为干物质积累量。

产量及构成要素:夏玉米籽粒成熟后,按小区单独收获,每个小区取1 m²的夏玉米来考种测产,夏玉米收获后,先测量穗长、穗粗、秃尖长、行粒数,然后脱粒,随机取100粒籽粒,重复3次测定百粒重,取平均值。所有夏玉米籽粒烘干至恒重,从而获得夏玉米产量。

1.3.4 作物耗水量和水分利用效率

作物耗水量(即蒸散量)采用田间水量平衡方程计算:

E_T = P + I - D + W_g - R + S_{WD} (1)

式中:E_T为蒸散量;P为降水量;I为灌溉量;D为土壤排水量;W_g为作物通过毛细管上升利用的地下水补给量;R为地表径流;S_{WD}为玉米生育期0~80 cm^[20]土层土壤水分消耗量,指生育期末的土壤含水量与生育期初时的差值。本实验为雨养条件,没有灌溉,故I为0。

水分利用效率E_{WU}为:

E_{WU} = Y/E_T (2)

式中:Y为玉米籽粒产量。

降雨利用率θ为:

θ = (ΔW - S_{gw})/P (3)

式中:ΔW为降雨前后土壤储水量变化;S_{gw}为地下水补给量。

依据地下水补给量和耗水量计算地下水贡献率C:

C = S_{gw}/E_T (4)

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010对试验数据进行处理,采用Origin 2021软件绘图,并采用SPSS软件进

行单因素方差分析。各处理间的显著性检验采用最小显著差异法(显著性水平α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深对土壤水分变化的影响

根据夏玉米根系在生育期内的分布范围^[21-22],将土层划分为0~20、20~40、40~100、100~200 cm。图3为不同地下水埋深下夏玉米不同土层土壤平均含水率随时间的变化。

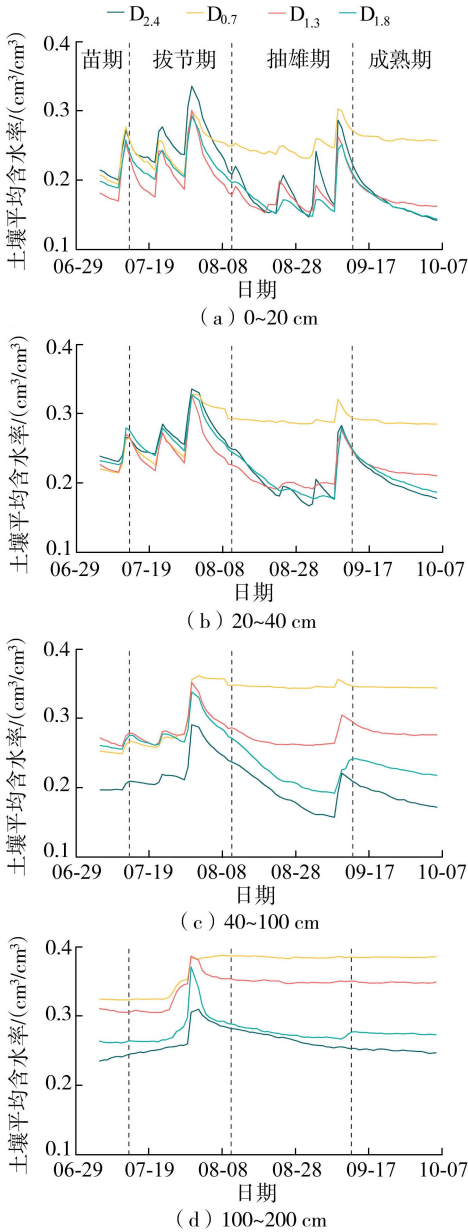


图3 不同地下水埋深下夏玉米不同土层土壤平均含水率变化

由图3(a)可知,苗期至拔节期,与D_{2.4}相比,D_{1.3}、D_{1.8}处理下0~20 cm土层土壤平均含水率分别降低了11.9%~19.3%和7.0%~12.8%;抽雄期至成熟期,D_{2.4}、D_{1.3}和D_{1.8}处理之间的土壤含水率无显著差异(P>0.05),但与D_{2.4}相比,D_{0.7}处理下的

土壤含水率增加了 29.3%~33.1%。由图 3(b)可知,在苗期,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的 20~40 cm 土层土壤含水率分别降低了 1.2%~5.7%、2.7%~5.0%、1.9%~2.7%;拔节期至成熟期, $D_{2.4}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的 20~40 cm 土层土壤平均含水率无显著差异 ($P>0.05$),但与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 处理下的土壤含水率增加了 26.9%~29.5%;7 月 29—30 日的一场较大降雨导致 $D_{0.7}$ 处理下的 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤含水率在较大降雨后分别高于 $D_{2.4}$ 处理 20.6%~61.0%和 21.5%~55.5%。由图 3(c)(d)可知,苗期至拔节期, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下 40~100 cm 土层土壤平均含水率无显著差异 ($P>0.05$),但高于 $D_{2.4}$ 处理 19.6%~22.6%;拔节期至成熟期,40~100 cm 和 100~200 cm 土层土壤平均含水率随地下水埋深的增加而降低:与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的 40~100 cm 土层土壤含水率分别增大 39.5%~50.7%、24.6%~37.0%和 11.8%~19.2%,100~200 cm 土层土壤含水率分别增大 24.7%~34.1%、19.8%~27.2%和 3.6%~8.0%。从夏玉米全生育期土壤平均含水率来看,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下全生育期土壤平均含水率显著增加了 6.9%~28.6%。

从全生育期看,当连续降水量大于 10 mm 时,会使 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤平均含水率比降雨前分别增大 20.8%~39.4%和 7.5%~28.5%,当降水量大于 60 mm 时,会使 40~100 cm 土层土壤平均含水率增大 26.9%~28.9%,连续降雨(总降水量 238.76 mm)会使 100~200 cm 土层土壤平均含水率增大 15.9%~22.3%,而降水量小于 60 mm 时,对 100~200 cm 土层土壤平均含水率影响较小。

2.2 不同地下水埋深下地下水补给与降雨入渗规律

2.2.1 地下水埋深和降水量对潜水蒸发量的影响

不同地下水埋深和降水量下的潜水蒸发量变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着生育期推进,不同地下水埋深下潜水蒸发量变化趋势基本一致,地下水埋深越大,潜水蒸发量的变化幅度越趋于平缓,这是因为地下水埋深不同导致的毛管力不同。潜水蒸发量随着地下水埋深的增加而减小, $D_{0.7}$ 处理下的潜水蒸发量最大,可达 10.37 mm/d。与 $D_{0.7}$ 相比, $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的潜水蒸发量分别降低 29.1%~58.9%和 58.8%~89.1%。 $D_{1.8}$ 和 $D_{1.3}$ 处理由于受 7 月 29 日至 8 月 2 日降雨的影响,8 月 2 日之后几天的潜水蒸发量较小。此外,由于降雨入渗补充土壤水分,植物根系需要的水分得以补充,进而减少了地下水对土壤水的补给,所以降水量增

加导致潜水蒸发量减少。

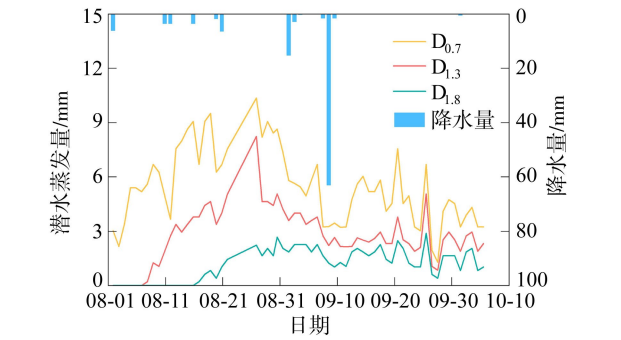


图 4 不同地下水埋深和降水量下的潜水蒸发量变化

2.2.2 地下水埋深对降雨利用率的影响

分析降水量与降雨前后不同地下水埋深的土壤储水量变化(图 5)可知,不同地下水埋深下,降水量与土壤储水量变化量呈线性正相关关系,决定系数大于 0.95。此外,地下水埋深越大,地下水补给量越小,导致斜率增大,即降雨利用率增大,降雨对土壤水的补给增大。与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下降雨利用率分别降低了 23.2%、11.4%和 2.8%。

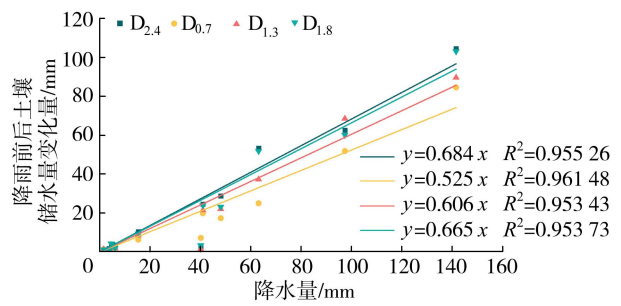


图 5 不同地下水埋深下降雨对土壤水补给的相关分析

2.3 地下水埋深对夏玉米生长指标的影响

2.3.1 地下水埋深对夏玉米株高和叶面积指数的影响

地下水埋深对株高影响不显著 ($P>0.05$),对叶面积指数影响显著 ($P<0.05$)。如图 6 所示,总体上,株高和叶面积指数随地下水埋深的增加呈降低趋势。其中,7 月 28 日至 9 月 16 日(拔节期至抽雄期)期间, $D_{2.4}$ 处理的株高和叶面积指数最大,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的株高分别降低 2.5%、1.7%和 5.2%,叶面积指数分别降低 6.0%、5.8%和 13.7%;在成熟期, $D_{0.7}$ 处理的株高和叶面积指数最大,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 和 $D_{1.3}$ 处理的株高分别提高 1.2%和 0.4%, $D_{1.8}$ 处理降低 2.3%, $D_{0.7}$ 处理的叶面积指数提高 8.3%, $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理的叶面积指数分别降低 0.9%和 4.9%。由以上分析可知,地下水埋深对株高和叶面积指数具有抑制作用。

2.3.2 地下水埋深对夏玉米干物质积累量的影响

地下水埋深对夏玉米干物质积累量影响显著 ($P<0.05$)。如图 7 所示,在拔节期至抽雄期,干物

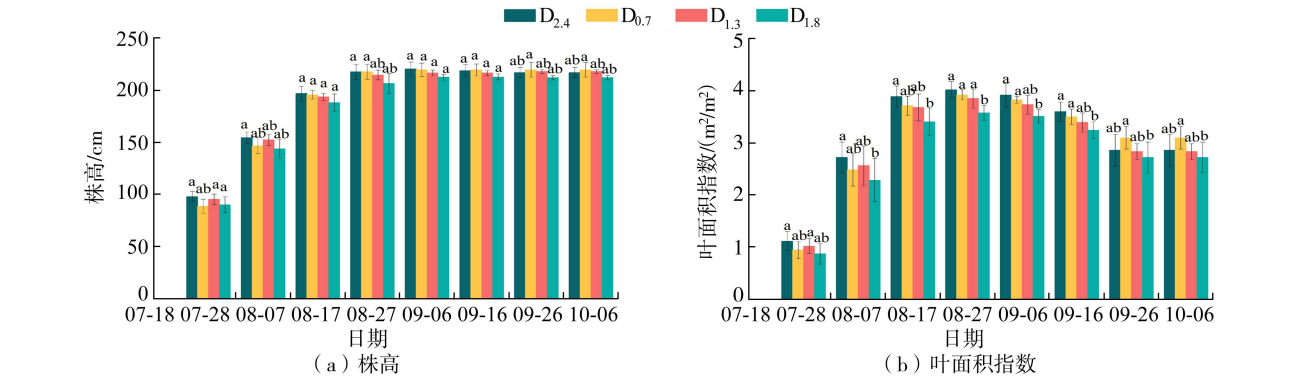


图6 不同地下水埋深下株高和叶面积指数的变化

质积累量随着地下水埋深的增大先增大后减小;在成熟期,干物质积累量随着地下水埋深的增加先减小后增大,但均低于 $D_{2.4}$ 处理。与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理在拔节期至抽雄期的干物质积累量分别降低 14.0%、9.4%和 19.5%,在成熟期的干物质积累量分别降低 10.7%、18.7%和 13.4%。由以上分析可知,地下水埋深对干物质积累量具有抑制作用。

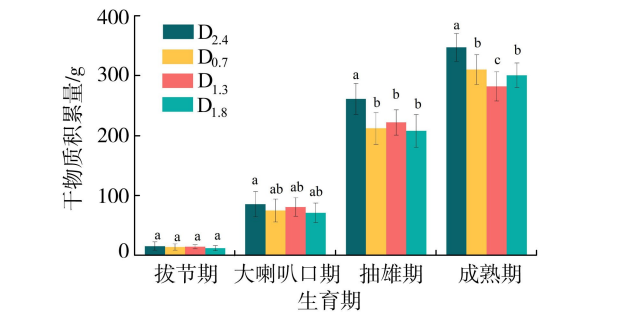


图7 各生育期不同地下水埋深下干物质积累量的变化

2.4 地下水埋深对水分利用效率的影响

地下水埋深对耗水量、水分利用效率和地下水贡献率影响显著 ($P<0.05$)。如表 1 所示,耗水量和地下水贡献率随着地下水埋深的增加而降低,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 全生育期耗水量分别增加了 56.1%、25.8%和 3.5%;地下水贡献率随着地下水埋深的增加而降低,且降低速度变快。在 3 种地下水埋深处理中,水分利用效率随着地下水埋深的增加而增加, $D_{0.7}$ 处理下的夏玉米产量最低,水分利用效率也最低,仅为 1.29 kg/m^3 ,与长期充分供水有关。 $D_{1.8}$ 处理下的产量略高于 $D_{2.4}$ 处理,水分利

用效率也最高,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{1.8}$ 处理的水分利用效率提高了 1.9%, $D_{0.7}$ 和 $D_{1.3}$ 处理的水分利用效率分别降低了 39.4%和 20.7%。

3 讨论

在地下水浅埋区,土壤毛细水的上升,使受水分胁迫的作物得到了有效水分补给,缓解了缺水的现状,并减少了对灌溉水的依赖。雨养条件下不同地下水埋深(0.7、1.3、1.8 m)对土壤水分影响的对比结果表明:0~20 cm 土层土壤平均含水率受地下水影响较小,受降雨影响较大,这与戴嘉璐^[23]、张豪强等^[24]的研究结果一致;20~40 cm 土层土壤平均含水率相差较小,这是因为夏玉米在苗期主要依靠浅层(0~20 cm)土壤水分;较大降雨(>60 mm)后,40~100 cm 土层土壤平均含水率随着地下水埋深的增加而减小,这是由于 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 处理的地下水位较深,地下水补给量较少,使得 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 处理下的 40~100 cm 土层土壤平均含水率降幅较明显;100~200 cm 土层土壤平均含水率随着地下水埋深的增加而降低,但都高于 $D_{2.4}$ 处理的土壤平均含水率。这是因为随着地下水埋深的增加,毛细水上升的高度降低,潜水蒸发量随着地下水埋深的增加而减小,对作物的水分补给减少,进而导致土壤平均含水率降低。从全生育期看,较大降雨会使 0~200 cm 土层土壤平均含水率达到生育期最大,这与张守军^[25]的研究结果一致。

地下水埋深越大,降雨对土壤水的补给越大,即降雨利用率越大。这是因为地下水埋深较大时,土壤水主要来源于降雨^[26],降雨被作物吸收的可能性

表1 不同地下水埋深下各生育期的耗水量及水分利用效率

处理	耗水量/mm				水分利用效率/(kg/m^3)	地下水补给量/mm	地下水贡献率/%
	苗期	拔节期	抽雄期	成熟期			
$D_{2.4}$	23.64 ^b	291.29 ^{ab}	125.25 ^c	30.31 ^c	470.48 ^b	2.13 ^a	0
$D_{0.7}$	36.44 ^a	373.26 ^a	226.50 ^a	98.11 ^a	734.31 ^a	1.29 ^c	526.74 ^a
$D_{1.3}$	34.64 ^a	318.57 ^{ab}	185.86 ^{ab}	65.85 ^b	591.88 ^{ab}	1.69 ^b	377.14 ^{ab}
$D_{1.8}$	31.64 ^a	243.52 ^b	150.17 ^{bc}	61.50 ^b	486.83 ^b	2.17 ^a	205.38 ^b

注:同列不同上标字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

较大;而当地下水埋深较浅时,土壤水主要来源于地下水和降雨,土壤含水率较高,抑制了作物对降雨的吸收,导致降雨利用率减小。因此,合理确定地下水位埋深对于灌区充分利用降雨资源、缓解灌溉水资源供需矛盾、制定节水灌溉规划等都具有重要的研究意义。

浅层地下水与作物根系土壤之间存在频繁的水分交换,而土壤水分又受到气象因素、土壤特征、植被状况、人为活动等因素的影响,导致不同研究者得出的适宜不同作物的地下水埋深有所不同。地下水埋深通过影响作物生长的土壤环境,影响作物的根系活力,进而影响作物的根冠关系和冠层的光合作用,影响作物生长发育。本文研究发现,地下水埋深越大,株高越小,但不同地下水埋深对夏玉米株高的影响不显著($P>0.05$),这与张守军^[25]、刘战东等^[27]的研究结果一致。叶面积指数随着地下水埋深的增加而减小,这与肖俊夫等^[28]的研究结果一致。当地下水埋深小于1.3 m时,干物质积累量随着地下水埋深的增加而增加;当地下水埋深超过1.3 m时,干物质积累量则随着地下水埋深的增加而降低。而鄂继芳等^[15]的研究表明,灌溉条件下,玉米地上部分生物量与地下埋深(1.4、1.8、2.2 m)呈负相关关系。这是因为地下水埋深较浅(0.7 m)时,充沛的地下水补给使土壤含水率保持在较高水平,影响了玉米根系的生长,最终导致作物干物质积累量下降。适宜的地下水埋深对提高作物产量和水分利用效率具有重要作用,本文研究发现, $D_{1.8}$ 处理的产量和水分利用效率最高,这是因为较大的地下水埋深(1.8 m)会削弱地下水向根层的补给,使耗水量和地下水贡献率减小,同时该地下水埋深又有利于保持适宜的土壤含水量,使玉米协调发展,实现高产,进而提高水分利用效率。

4 结 论

- a. 与正常田间埋深的处理相比,地下水埋深可使20~100 cm土层土壤平均含水率显著增加,随着地下水埋深的增加,潜水蒸发量逐渐减小,降雨利用率逐渐增大,当地下水埋深1.8 m时,降雨利用率为66.5%。
- b. 地下水埋深越大,株高越小,但不同地下水埋深对夏玉米株高的影响不显著($P>0.05$),叶面积指数随着地下水埋深的增加而显著减小,地下水埋深为1.3 m时,拔节期、抽雄期和大喇叭口期的干物质积累量最大。
- c. 相比其他地下水埋深, $D_{1.8}$ 处理的整体效果较好玉米产量和水分利用效率显著提高,实现了节

水和高产的目的。

- d. 雨养条件下地下水埋深对土壤含水量、降雨利用率和水分利用效率有显著影响。较大降雨可显著增加土壤含水量,同时通过增强降雨入渗过程而减少潜水蒸发量,从而提高降雨利用率,降低作物对灌溉水资源的依赖,实现节水目标。

参考文献:

[1] 邓文平,章洁,张志坚,等. 北京土石山区水分在土壤-植物-大气连续体(SPAC)中的稳定同位素特征[J]. 应用生态学报,2017,28(7):2171-2178. (Deng Wenping, Zhang Jie, Zhang Zhijian, et al. Stable hydrogen and oxygen isotope compositions in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) in rocky mountain area of Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7):2171-2178. (in Chinese))

[2] 赵勇,董义阳,翟家齐,等. 考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. 水资源保护,2024,40(3):78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3):78-89. (in Chinese))

[3] 孙仕军,隋文华,陈伟,等. 地下水埋深对辽宁中部地区玉米根系和干物质积累的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(2):497-506. (Sun Shijun, Sui Wenhua, Chen Wei, et al. Effects of groundwater depth on root system and dry matter accumulation of maize in central Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2):497-506. (in Chinese))

[4] Zimmermann I, Fleige H, Horn R. Longtime effects of deep groundwater extraction management on water table levels in surface aquifers [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1):133-143.

[5] 周宏,赵文智. 荒漠区包气带土壤物理特征及其对地下水水毛管上升影响的模拟[J]. 应用生态学报,2019,30(9):2999-3009. (Zhou Hong, Zhao Wenzhi. Soil physical characteristics of shallow vadose zone and modeling its effects on upward capillary rise of groundwater in an arid-desert area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9):2999-3009. (in Chinese))

[6] Zhou Lifeng, Han Xinlong, Yang Qiliang, et al. Optimizing sowing date to mitigate loss of growing degree days and enhance crop water productivity of groundwater-irrigated spring maize [J]. Agricultural Water Management, 2024, 305:109097.

[7] 白芳芳,乔冬梅,李平,等. 地下水埋深和施氮量对夏玉米灌浆特性及水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6):90-99. (Bai Fangfang, Qiao Dongmei, Li Ping, et al. Effects of groundwater depth and

- nitrogen application rate on grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2022, 40(6): 90-99. (in Chinese))
- [8] Du Mingcheng, Zhang Jianyun, Elmahdi A, et al. Variation characteristics and influencing factors of soil moisture content in the lime concretion black soil region in northern Anhui[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2251.
- [9] Zhang He, Li Yan, Meng Yali, et al. The effects of soil moisture and salinity as functions of groundwater depth on wheat growth and yield in coastal saline soils[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(11): 2472-2482.
- [10] 朱振闯, 孙仕军, 朱森森, 等. 地下水埋深对东北平原地下水补给及大豆生长动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1871-1882. (Zhu Zhenchuang, Sun Shijun, Zhu Miaomiao, et al. Effects of groundwater depth on groundwater recharge and soybean growth dynamics in Northeast China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1871-1882. (in Chinese))
- [11] 张朝新. 旱作物对地下水利用的研究[J]. *灌溉排水*, 1989, 8(1): 20-24. (Zhang Chaoxin. Research on groundwater use by dry crops[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1989, 8(1): 20-24. (in Chinese))
- [12] Mejia M N, Madramootoo C A, Broughton R S. Influence of water table management on corn and soybean yields[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 46(1): 73-89.
- [13] 胡永胜. 淮北平原不同地下水埋深对作物生长发育及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2023(23): 34-38. (Hu Yongsheng. Effects of different groundwater burial depths on crop growth and yield in HuaiBei Plain[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(23): 34-38. (in Chinese))
- [14] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(5): 44-48. (Kong Fanrui, Qu Zhongyi, Liu Yajun, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water, salinity and crop growth[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 44-48. (in Chinese))
- [15] 鄂继芳, 杨树青, 刘鹏, 等. 不同地下水埋深与灌水量对玉米生长效应及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(2): 209-219. (E Jifang, Yang Shuqing, Liu Peng, et al. Effects of different groundwater depth and irrigation amount on maize growth effect and yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(2): 209-219. (in Chinese))
- [16] 武朝宝. 地下水埋深对作物产量与水分利用效率的影响及作物系数变化[J]. *地下水*, 2011, 33(4): 20-23. (Wu Chaobao. Effect of groundwater depth on crop output & water-used efficiency and the change of crop coefficients[J]. *Ground Water*, 2011, 33(4): 20-23. (in Chinese))
- [17] 刘战东, 肖俊夫, 牛豪震, 等. 地下水埋深对冬小麦和春玉米产量及水分生产效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 29-33. (Liu Zhandong, Xiao Junfu, Niu Haozhen, et al. Influence of groundwater depth on yield and WUE of winter wheat and spring maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 29-33. (in Chinese))
- [18] 张智翔, 刘松涛, 李茜, 等. 明灌暗排区土壤盐分动态规律及适宜控盐地下水埋深研究[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(6): 52-60. (Zhang Zhixiang, Liu Songtao, Li Qian, et al. Soil salinity dynamics and optimal groundwater depth for salt control in farmland under surface irrigation and subsurface drainage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(6): 52-60. (in Chinese))
- [19] Li Xurun, Li Zhao, Fu Weizhang, et al. The influence of shallow groundwater on the physicochemical properties of field soil, crop yield, and groundwater[J]. *Agriculture*, 2024, 14(3): 341.
- [20] 王秋瑶. 大豆耗水和生长对地下水埋深变化的响应[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [21] 罗守德, 武殿林, 郭国亮, 等. 玉米根系在土壤中的伸长和分布[J]. *作物杂志*, 1985(4): 18-19. (Luo Shoude, Wu Dianlin, Guo Guoliang, et al. Elongation and distribution of maize roots in soil[J]. *Crops*, 1985(4): 18-19. (in Chinese))
- [22] 孟娇, 张晓涛, 党红凯, 等. 轮作期内冬小麦不同灌溉制度对夏玉米水分利用效率的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(4): 102-110. (Meng Jiao, Zhang Xiaotao, Dang Hongkai, et al. Effects of different irrigation regimes for winter wheat on water use efficiency of summer maize during rotation period[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 102-110. (in Chinese))
- [23] 戴嘉璐. 河套灌区维持玉米稳定生长的水氮与地下水埋深模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [24] 张豪强, 朱永华, 吕海深. 淮北平原夏玉米生长与土壤含水量和地下水的关系[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(5): 79-84. (Zhang Haoqiang, Zhu Yonghua, Lyu Haishen. Study on relationship between summer maize growth and soil water content and groundwater in HuaiBei Plain[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(5): 79-84. (in Chinese))
- [25] 张守军. 地下水埋深对玉米生长及地下水补给的影响[J]. *人民黄河*, 2019, 41(12): 142-145. (Zhang Shoujun. Experimental study on effects of groundwater depth on corn growth index and groundwater level recharge under horizontal irrigation conditions[J]. *Yellow River*, 2019, 41(12): 142-145. (in Chinese))

(下转第 71 页)

empirical study based on TOPSIS method [J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(1): 5-8. (in Chinese))

[10] Guo Liangliang, Xie Xinxin, Zeng Jian, et al. Optimization model of water resources allocation in coal mine area based on ecological environment priority[J]. Water, 2023, 15(6): 1205.

[11] 刘晓民, 王文娟, 王震宇, 等. 基于 GT-ANP 理论的生态脆弱区煤-水协调绿色开采度评价[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 203-210. (Liu Xiaomin, Wang Wenjuan, Wang Zhenyu, et al. Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 203-210. (in Chinese))

[12] 解馨馨, 杨军耀, 陈军锋. 露井联采矿区煤-水-生态协调发展评价体系研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 135-140. (Xie Xinxin, Yang Junyao, Chen Junfeng. Study on evaluation system of coal-water-ecology coordinated development model in open-pit combined mining area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 135-140. (in Chinese))

[13] 张彦, 李明然, 寇利卿. 基于 PSR-PCA-ANFIS 模型的保定市中心城区水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 68-75. (Zhang Yan, Li Mingran, Kou Liqing. Evaluation of water resources security in Baoding central city based on PSR-PCA-ANFIS model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2): 68-75. (in Chinese))

[14] 张晓峰, 石永杰, 刘俊, 等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 80-87. (in Chinese))

[15] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (Ai Yadi, Wei Chuanjiang, Ma Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))

[16] 何婧, 孙银光. 高职院校国家助学金评定如何帮助较不利学生?: 基于 AHP-熵权法的评定[J]. 教育与经济, 2024, 40(6): 84-93. (He Jing, Sun Yingguang. How does the selection of state grants for higher vocational colleges help disadvantaged students? an evaluation study based on AHP and entropy[J]. Education & Economy, 2024, 40(6): 84-93. (in Chinese))

[17] 杨毅彪, 孙恒五, 戴震, 等. 基于博弈论组合赋权的地方高校校内专业评估[J]. 系统科学学报, 2025, 33(2): 149-154. (Yang Yibiao, Sun Huanwu, Dai Zhen, et al. Research on specialty evaluation in local colleges and universities based on the combination weighting of game theory[J]. Journal of System Science, 2025, 33(2): 149-154. (in Chinese))

[18] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域超标准洪水调度策略研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3): 55-61. (Kong Lingting, Qian Zhen, Liu Min. Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3): 55-61. (in Chinese))

[19] 刘睿佳, 杨侃, 陈静, 等. 基于区间直觉模糊 TOPSIS 法的水资源空间均衡评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 56-61. (Liu Ruijia, Yang Kan, Chen Jing, et al. Evaluation of water resources spatial equilibrium based on extended TOPSIS method with interval intuitionistic fuzzy sets[J]. Yellow River, 2023, 45(3): 56-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-24 编辑: 俞云利)

+++++

(上接第 64 页)

[26] 王丽娟, 宋翹楚, 吴为, 等. 江苏沿海滩涂地下水埋深及矿化度变化规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 52-57. (Wang Lijuan, Song Qiaochu, Wu Wei, et al. Variation law of groundwater depth and mineralization of coastal tidal flats in Jiangsu Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 52-57. (in Chinese))

[27] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624. (Liu Zhandong, Liu Zugui, Yu Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617-624. (in Chinese))

[28] 肖俊夫, 南纪琴, 刘战东, 等. 不同地下水埋深夏玉米产量及产量构成关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 36-39. (Xiao Junfu, Nan Jiqin, Liu Zhandong, et al. Study on yield and yield components of summer maize under different groundwater levels [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 36-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-20 编辑: 俞云利)