

黄淮流域冬小麦按需补灌方法及其应用

王东

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室/农业部作物生理生态与耕作重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 为探索依据冬小麦需水进程和自然供水状况确定各关键生育时期最佳补灌水量的方法, 实现高产高水分利用效率的最优补灌方案, 为黄淮流域冬小麦节水高产栽培提供理论和技术支持, 于2007—2015年度在播种期水肥管理一致的基础上, 以生长季雨养(出苗至成熟期间无灌溉)处理为对照进行补灌试验。设置补灌时期和补灌量两个因子。选取各年度雨养处理与籽粒产量和水分利用效率均佳的最优补灌处理, 通过对小麦生育期自然供水量、灌水量及籽粒产量等指标进行统计和回归分析。结果表明, 在雨养条件下, 籽粒产量与播种期主要供水量(0—100 cm 土层土壤贮水量+播种期灌水量)和各生育阶段自然降水量呈极显著回归关系, 而在适时适量补灌的条件下, 籽粒产量受播种期土壤供水量和生长季自然降水量的影响明显减小。冬小麦实现高产和高水分利用效率, 从播种至各关键生育时期所需的适宜的累计供水量基本稳定。适时适量补充灌溉可有效弥补冬小麦各生育阶段自然供水的不足。在播种期供水适宜的条件下, 出苗至拔节期和出苗至开花期的最优补灌水量与雨养籽粒产量分别呈极显著二次曲线关系和极显著负相关。同时发现冬小麦播种期0—20, 0—40, 0—60, 20—40, 20—60 cm 土层土壤体积分含水量与0—100 cm 土层土壤贮水量均呈极显著线性相关, 利用0—40 cm 土层土壤含水量预测0—100 cm 土层土壤贮水量是可行的。多年试验表明, 黄淮流域冬小麦实现9 000~10 000 kg/hm² 高产和20.3~26.8 kg/(hm²·mm)高水分利用效率的全生育期最佳灌水量平均为101.8 mm, 变化范围为51.0~172.0 mm。2015—2016年在两试验点的实践验证表明, 利用0—40 cm 土层土壤体积分含水量预测0—100 cm 土层土壤贮水量, 模拟值与实测值的一致性较好。采用按需补灌方法, 与定额灌溉处理相比, 不仅保持了原有的高产水平, 而且减少灌溉水36.2~57.6 mm, 节约用水20.1%~32.0%, 显著提高水分利用效率。

关键词: 冬小麦; 按需补灌; 节水; 高产

中图分类号: S512.11; S274

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0220-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.035

A Method of Supplemental Irrigation On-demand for Winter Wheat and Its Application in the Huang-Huai Plain

WANG Dong

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology/

Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System, Ministry of Agriculture, Taian, Shandong 271018)

Abstract: In order to seek the optimal irrigation scheme for high yield and high water use efficiency (WUE) of winter wheat, and provide theoretical and technical support for water-saving and high-yielding cultivation of winter wheat, supplemental irrigation (SI) experiments were conducted to explore the methods for determining the optimal supplemental irrigation amount at critical growth stages of winter wheat according to water consumption and natural water supply. The experiments were conducted from 2007 to 2015 on the basis of the same water and fertilizer management during the sowing period, and the rain-fed treatment during the growing season (without irrigation during emergence to maturity) was taken as the control. Two factors including time and amount of SI were set. Selected the annual rain-fed treatment and the optimal supplemental irrigation treatments with better grain yield and WUE, and the natural water supply, irrigation capacity and grain yield of these treatments during growth period were analyzed statistically. The results showed that the grain yield was significantly correlated with the main water supply (soil water storage in 0—100 cm soil layer + irrigation amount at sowing) at sowing period and the precipitation in different growth stages under rain-fed conditions, but there was no significant relation between them under the optimal SI conditions. The suitable cumulative water supply from sowing to each critical growth stages for achieving

收稿日期: 2017-05-08

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503130); 国家自然科学基金项目(31271660)

第一作者: 王东(1973—), 男, 教授, 主要从事小麦高产高效栽培理论与技术研究。E-mail: wangd@sdau.edu.cn

high yield and high WUE was basically stable. Appropriate SI could effectively compensate for the lack of natural water supply at different growth stages. Under suitable water supply conditions at sowing stage, there was a significant quadratic curve relationship between the optimal SI amount and the rain-fed grain yield from emergence to jointing, and there was a significant negative correlation between the above two parameters from emergence to flowering stage. In addition, the volumetric soil water content in 0—20, 0—40, 0—60, 20—40, 20—60 cm soil layers were all significantly linearly related to soil water storage in 0—100 cm soil layer at sowing period. It was feasible to predict soil water storage in 0—100 cm soil layer by using 0—40 cm soil water content. 8-year-experimental results showed that the optimum irrigation rate during the whole growth period of winter wheat in Huang-Huai plain was averagely 101.8 mm, ranged from 51.0 to 172.0 mm, and this kind of irrigation rate could achieve high yield (9 000~10 000 kg/hm²) and high WUE (20.3~26.8 kg/(hm²·mm)). The data from two experimental sites during 2015—2016 showed that the soil water storage in 0—100 cm soil layer could be predicted by the volumetric soil water content in 0—40 cm soil layers, and the simulated values were consistent with the measured values. Compared with the quota irrigation treatment, on-demand SI treatment not only maintained high grain yield, but also reduced irrigation water by 36.2~57.6 mm, saved water by 20.1%~32.0%, and significantly improved WUE.

Keywords: winter wheat; supplemental irrigation on-demand; water-saving; high yield

黄淮流域是我国小麦主产区,小麦总产约占全国的 60%左右,但水资源总量却不足全国的 8%^[1]。该区约 80%左右的地下水资源用于作物灌溉^[2],许多地区地下水资源过度开采造成诸多环境问题,威胁农业可持续发展^[3],迫切需要开展节水栽培技术的研究。传统的节水技术多采用定额灌溉,通过减少灌水次数和灌水量降低灌溉水投入^[4-7]。然而由于降水年型不同,每年的总降水量及其季节分布均有较大差异,定额灌溉难以实现水分供给与作物需水的精确匹配,影响节水效果^[8]。水浇地小麦水分的供给有 3 个来源,包括土壤贮水(底墒)、自然降水和灌溉水。充足的底墒是冬小麦丰产的重要基础^[9-11]。在底墒一定的条件下,旱作小麦籽粒产量随生育期降水量的减少而明显降低^[12]。Zhang 等^[13]研究表明,在 1987—2015 年间,中国华北地区小麦生育期降水量减少,蒸散量增加,当前雨养条件下的小麦产量与 2000 年代相比在减少。该地区冬小麦在干旱年、平水年和丰水年最佳的灌水量分别为 186,161,99 mm^[14]。在黄淮流域年降水量为 506~629 mm 的条件下,冬小麦最佳的灌水量为 47.2~118.2 mm^[15-16]。可见依据自然供水状况确定最佳灌水量是实现节水高产的重要途径。可是如何依据降水的丰缺确定适宜的灌水时期和数量,尚缺乏具体措施和系统研究。本课题组前期研究探索了一种基于灌溉前土壤含水量确定补灌水量的方法。冬小麦关键生育时期一定深度土层土壤贮水

量是前期土壤贮水、降水、灌溉及作物耗水的综合表现^[15]。基于此,通过连续 8 年及多点多底墒条件下的补灌试验,选取各年度雨养处理与籽粒产量和水分利用效率均佳的最优补灌处理,综合分析其播种期供水量、各生育阶段自然降水量、补灌时期和补灌量等,以探明冬小麦实现高产高水分利用效率所需的最优补灌时期和水量与生长季自然供水(土壤水和降水)之间的关系,探索依据小麦需水进程和各生育阶段自然供水状况确定最佳补灌时期和补灌水量的按需补灌方法,并经实践验证,为该地区冬小麦节水高产栽培提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2007—2015 年连续 8 年分别在山东省兖州市小孟镇史家王子村(35°40'N—116°41'E,2007—2014 年)和肥城市边院镇南仇村(35°59'N—116°52'E,2014—2015 年),结合多点和多底墒条件试验进行按需补灌方法的研究。方法的实践验证于 2015—2016 年冬小麦生长季,分别在山东省岱岳区道朗镇玄庄村(36°12'N—116°54'E)和肥城市边院镇南仇村(35°59'N—116°52'E)大田进行。各年度试验田土壤质地类型均为粉壤土,各试验点小麦播种前 0—20 cm 土层土壤养分含量见表 1,0—100 cm 各土层土壤容重和田间持水量见表 2,试验期间年降水量和冬小麦各生育阶段的降水量见表 3。

表 1 各试验点冬小麦播种前 0—20 cm 土层土壤养分含量

试验地点	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
史家王子	15.09±1.03	1.05±0.05	99.83±15.61	27.97±6.49	126.32±9.59
南仇	14.95±1.34	1.05±0.07	97.57±3.59	44.63±1.03	114.77±7.26
玄庄	14.78±0.25	1.06±0.02	93.04±0.82	32.31±0.74	120.23±1.07

注:史家王子为 7 年试验的平均值±标准差;南仇为 2 年试验的平均值±标准差;玄庄为 1 年试验 3 个重复的平均值±标准差。下同。

表 2 各试验点 0—100 cm 各土层土壤容重(BD)和田间持水量(FC)

试验地点	0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm		60—80 cm		80—100 cm	
	BD/ (g·cm ⁻³)	FC/%	BD/ (g·cm ⁻³)	FC/%	BD/ (g·cm ⁻³)	FC/%	BD/ (g·cm ⁻³)	FC/%	BD/ (g·cm ⁻³)	FC/%
史家王子	1.47±0.08	39.6±1.7	1.54±0.07	37.5±1.3	1.52±0.05	38.2±1.7	1.54±0.04	38.9±0.5	1.47±0.08	39.6±1.7
南仇	1.46±0.01	41.5±0.4	1.60±0.02	37.6±0.4	1.56±0.03	37.2±0.3	1.57±0.01	37.5±0.2	1.53±0.01	40.0±0.3
玄庄	1.32±0.01	43.7±0.2	1.59±0.01	37.2±0.1	1.46±0.01	44.1±0.2	1.58±0.01	41.6±0.2	1.60±0.02	36.2±0.1

表 3 试验期间各试验点年降水量和冬小麦不同生育阶段的降水量 单位:mm

试验地点	播种—越冬	越冬—拔节	拔节—开花	开花—成熟	全生育期	年降水量
史家王子	36.7±26.3	48.4±17.4	47.2±26.8	47.0±43.0	179.3±39.2	576.5±52.8
南仇	54.4±45.0	48.5±28.8	21.6±10.6	35.6±5.9	160.0±0.21	539.6±40.7
玄庄	71.0	36.2	4.0	44.5	155.7	535.4

注:史家王子为 7 年试验的平均值±标准差;南仇为 2 年试验的平均值±标准差;玄庄为 1 年试验的降水量数据。

1.2 试验设计

1.2.1 补灌试验 2007—2015 年,选用黄淮地区大面积种植的高产冬小麦品种济麦 22,在播种期水肥管理一致的基础上,以生长季雨养(出苗至成熟期间无灌溉)处理为对照进行补灌试验。设置补灌时期和补灌量两个因子。补灌时期设拔节期、开花期、拔节期+开花期、越冬期+拔节期+开花期 4 个水平。每个时期仅补灌 1 次,越冬期在日平均气温下降至 3℃左右、表层土壤夜冻昼消时进行;拔节期和开花期均在 0—20 cm 土层土壤相对含水量降至 60%以下时进行。补灌量在 2007—2011 年度由目标土壤相对含水量确定:在拟湿润层深度统一设为 140 cm 的基础上,设置目标土壤相对含水量分别为 65%,70%,75%,80% 4 个水平;2011—2015 年度则由拟湿润层深度确定:设置拟湿润层深度分别为 10,20,30,40 cm 4 个水平,目标土壤相对含水量均设为 100%。依据公式 $CIR=10\times D_h\times(\theta_t-\theta_n)$ 计算补灌水量。式中: D_h 为拟湿润层深度(m); θ_t 为目标土壤体积含水量($v/v,\%$),即田间持水量($v/v,\%$)乘以目标土壤相对含水量; θ_n 为灌水前拟湿润层土壤体积含水量($v/v,\%$)。

2013—2014 年在定位实施上一年度试验的同时,另外选择一块土壤肥力、容重和田间持水量均匀一致的地块,通过夏玉米季灌水量的不同创造冬小麦播前底墒的明显差异,进行不同底墒条件下的补灌试验。每年度各处理播种期的水分管理方法为:当播种前 0—20 cm 土层土壤相对含水量(θ_{v-0-20})大于 70%时,不灌水;小于等于 70%时,用公式 $I_s=10\times 0.2\times(FC_{0-20}-\theta_{v-0-20})$ 计算需补灌水量。式中: FC_{0-20} 和 θ_{v-0-20} 分别为 0—20 cm 土层田间持水量($v/v,\%$)和土壤体积含水量($v/v,\%$)。播种期补灌水量最多不超过 60 mm。

每个处理 3 次重复。试验小区面积为 4 m×10 m=40 m²,小区之间设 1.0 m 隔离带,防止处理间水分侧渗影响。灌溉水水源为井水,灌溉时采用输水带供水,通过 PVC 水带均匀喷洒在试验小区内,分别用

水表和闸阀计量和控制灌水量。

1.2.2 方法验证 按需补灌方法建成后,于 2015—2016 年度,采用裂区设计,主区为品种,选用山农 23 和山农 29 两个冬小麦品种;副区为灌溉方式,设置按需补灌(SI)和定额灌溉(QI)两种灌溉方式。SI 处理依据按需补灌方法实施。QI 处理分别于播种期、拔节期和开花期各灌水 60 mm。

每个处理 3 次重复。试验小区面积为 2 m×23 m=46 m²,小区之间设 1.0 m 隔离带,防止处理间水分侧渗影响。灌溉水水源为井水,灌溉时采用输水带供水,通过小麦专用微喷带(ZL201220356553.7)^[17]均匀喷洒在试验小区内,微喷带进水端装有水表和闸阀,用以计量和控制灌水量。

1.3 田间管理

补灌试验分别于 2007 年 10 月 9 日、2008 年 10 月 11 日、2009 年 10 月 9 日、2010 年 10 月 10 日、2011 年 10 月 7 日、2012 年 10 月 10 日、2013 年 10 月 10 日、2014 年 10 月 11 日播种,基本苗为 180 株/m²;于 2008 年 6 月 15 日、2009 年 6 月 16 日、2010 年 6 月 17 日、2011 年 6 月 13 日、2012 年 6 月 14 日、2013 年 6 月 12 日、2014 年 5 月 31 日、2015 年 6 月 14 日收获。

按需补灌方法的实践验证在玄庄村于 2015 年 10 月 3 日播种,基本苗为 150 株/m²,2016 年 6 月 9 日收获;在南仇村于 2015 年 10 月 10 日播种,基本苗为 150 株/m²,2016 年 6 月 9 日收获。

各年度试验播种前每公顷施纯氮 105 kg、P₂O₅ 150 kg、K₂O 150 kg 作底肥,拔节期每公顷施纯氮 135 kg 作追肥。使用的肥料为尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 P₂O₅ 46%,含 N 18%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。其他管理措施同一般高产田。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤容重和田间持水量的测定 冬小麦播种前,用容积为 100 cm³ 的环刀,每 10 cm 一层采集 0—200 cm 土层的土壤样品,参照李涛等^[18]和王艳丽^[19]

的方法测定并计算 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—120,120—140,140—160,160—180,180—200 cm 土层土壤容重和田间持水量。

1.4.2 土壤含水量的测定 于冬小麦播种前 1 天,越冬期、拔节期和开花期灌水前 1 天及成熟期,用土钻每 20 cm 一层采集 0—200 cm 土层土样,装入铝盒,称鲜重后置于烘箱中,110 ℃烘至恒重,称干土重,计算土壤体积含水量和相对含水量。每小区(重复)取 1 个点,每处理 3 次重复。

土壤质量含水量(%)=(鲜土质量—干土质量)/干土质量×100

土壤体积含水量(%)=土壤质量含水量×土壤容重

土壤相对含水量(%)=土壤体积含水量/田间持水量×100

1.4.3 成熟期测产 小麦成熟期,每个试验小区收获 3 m² 脱粒,自然风干至籽粒含水量为 12.5%左右时称重计算产量,并折算成公顷产量。每个处理 3 次重复。

1.4.4 农田耗水量的计算 根据水平衡法^[20]计算小麦生育期农田耗水量,计算公式为:

$$ET=\Delta S+M+P$$

式中:ET 为农田耗水量(mm);ΔS 为 0—200 cm 土层土壤贮水消耗量(mm);M 为灌水量(mm);P 为降水量(mm)。地表径流、2 m 土体土壤水下渗量和地下水补给量均忽略不计。

1.4.5 水分利用效率的计算 水分利用效率的计算

参照 Sepaskhah 等^[21]的方法:

水分利用效率=籽粒产量/农田耗水量

1.5 数据分析

按需补灌方法的建立,仅选取 2007—2015 各年度雨养处理与籽粒产量和水分利用效率均佳的最优补灌处理。最优补灌处理的选取方法为:将补灌处理与雨养处理籽粒产量的比值乘以 0.5 加补灌处理与雨养处理水分利用效率的比值乘以 0.5,数值最高者为最优补灌处理。由于年际间的差异,各年度选出的最优补灌处理的籽粒产量在 9 000~10 000 kg/hm² 范围内,水分利用效率在 20.3~26.8 kg/(hm²·mm) 范围内(表 4)。使用 SPSS 统计分析软件(ANOVA;IBM SSPS Statistics, version 22.0),对多年(点)数据进行基本统计分析,得出各指标平均值、最大值、最小值、极差、标准差和变异系数。通过回归分析,明确冬小麦籽粒产量与播种期供水量及各生育阶段自然降水量之间的数量关系,高产高水分利用效率的最优补灌水量与雨养条件下的籽粒产量之间的数量关系,并拟合数学方程。利用这些数学方程,构建依据冬小麦需水进程确定各关键生育时期最优补灌水量的按需补灌方法。同时,为探索通过表层土壤含水量预测一定深度土层土壤贮水量的方法,以节省测定较深土层土壤贮水量所需时间和人力,通过回归分析,明确播种前 0—60 cm 各土层土壤体积含水量与 0—100 cm 土层土壤贮水量之间的数量关系。

采用 Microsoft Excel 整理和计算数据,用最小显著差数(LSD)法对各处理数据进行多重比较。

表 4 冬小麦不同生育期灌水量及籽粒产量和水分利用效率

年度(年)	处理	灌水量/mm				籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
		播种期	越冬期	拔节期	开花期		
2007—2008	W1	0	0	0	0	7527.6	21.1
	W2	0	0	44.3	17.6	9585.4	24.7
2008—2009	W1	0	0	0	0	6614.8	23.5
	W2	0	0	60.1	20.6	9266.6	26.8
2009—2010	W1	0	0	0	0	7349.5	19.2
	W2	0	0	27.9	57.5	9273.4	22.6
2010—2011	W1	0	0	0	0	6391.9	21.0
	W2	0	29.6	45.3	9.8	10103.8	22.6
2011—2012	W1	0	0	0	0	6982.7	18.2
	W2	0	0	20.8	42.1	9681.5	20.9
2012—2013	W1	0	0	0	0	6651.3	19.4
	W2	0	0	67.3	48.6	9773.6	23.4
2013—2014	W1	54.6	0	0	0	5018.4	18.5
	W2	54.6	0	60.1	57.3	9234.9	22.2
2013—2014	L—W1	53.1	0	0	0	5348.5	21.6
	L—W2	53.1	0	59.4	58.1	8972.1	23.4
	H—W1	36.4	0	0	0	7016.7	22.5
	H—W2	36.4	0	50.9	45.8	9504.4	23.6
2014—2015	W1	0	0	0	0	8047.0	18.9
	W2	0	0	25.0	26.0	9118.0	20.3

注:W1 为雨养处理;W2 为籽粒产量(9 000~10 000 kg/hm²)和水分利用效率(20.3~26.8 kg/(hm²·mm))均佳的最优补灌处理;L 为低底墒条件(播种期 0—100 cm 土层土壤贮水量为 202.5 mm);H 为高底墒条件(播种期 0—100 cm 土层土壤贮水量为 267.4 mm)。

2 结果与分析

2.1 播种前 0—60 cm 各土层土壤体积含水量与 0—100 cm 土层土壤贮水量之间的数量关系

从表 5 可以看出,冬小麦播种前 0—20,0—40,0—60,20—40,20—60 cm 土层土壤体积含水量与 0—100 cm 土层土壤贮水量均呈极显著线性相关,其决定系数 R^2 值随测定土层深度和厚度的增加而增大,说明在该地区小麦播种前的上层土壤含水量与一定深度土层土壤贮水量关系密切。从决定系数 R^2 值大小和测定土层深度考虑,利用 0—40 cm 土层土壤含水量预测 0—100 cm 土层土壤贮水量是可行的。

2.2 冬小麦籽粒产量与播种期供水量及各生育阶段自然降水量之间的数量关系

从表 6 可以看出,在小麦生长季雨养(出苗至成熟期间无灌溉)条件下,籽粒产量与播种期主要供水量(0—100 cm 土层土壤贮水量+播种期灌水量)、播种至越冬期降水量、越冬至拔节期降水量、拔节至开花期降水量、开花至成熟期降水量呈极显著回归关

系,决定系数 R^2 值达到 0.996。而在籽粒产量和水分利用效率均佳的最优补灌条件下,籽粒产量与播种期主要供水量及各生育阶段降水量无显著回归关系,说明在播种期供水适宜且在出苗至成熟期间无灌溉的条件下,可以通过播种期主要供水量和各生育阶段自然降水量预测冬小麦籽粒产量。而在小麦生育期内适时适量补灌的条件下,籽粒产量受播种期土壤供水量和生长季自然降水量的影响明显减小。

2.3 最优补灌处理冬小麦各生育阶段的主要供水量

从表 7 可以看出,W1 和 W2 处理播种至越冬期主要供水量的变异系数为 9.3%。W2 处理播种至拔节期、播种至开花期和播种至成熟期主要供水量的变异系数分别为 10.8%、7.0%和 6.0%,低于或接近于 10%,且均低于 W1 处理。说明冬小麦实现高产和高水分利用效率,在生育进程中,从播种至每个关键生育时期所需的适宜主要供水量基本稳定。播种至越冬期、播种至拔节期、播种至开花期、播种至成熟期的主要供水量分别为 326.8、373.3、463.5、549.6 mm,有利于实现小麦高产和对水分的高效利用。

表 5 播种期 0—60 cm 各土层土壤体积含水量与 0—100 cm 土层土壤贮水量之间的数量关系

序号	回归模型	R	R^2	F	df_1	df_2	Sig.
1	$S_s=7.577\theta_{v-0-20}+95.355$	0.984	0.968	239.248	1	8	0.000
2	$S_s=7.265\theta_{v-0-40}+100.068$	0.985	0.969	253.391	1	8	0.000
3	$S_s=7.955\theta_{v-0-60}+77.008$	0.986	0.972	282.688	1	8	0.000
4	$S_s=6.602\theta_{v-20-40}+113.983$	0.956	0.914	85.107	1	8	0.000
5	$S_s=7.828\theta_{v-20-60}+75.300$	0.967	0.935	114.579	1	8	0.000

注: θ_{v-0-20} 、 θ_{v-0-40} 、 θ_{v-0-60} 、 $\theta_{v-20-40}$ 、 $\theta_{v-20-60}$ 分别为播种期 0—20,0—40,0—60,20—40,20—60 cm 土层土壤体积含水量(v/v ,%)。 S_s 为播种期 0—100 cm 土层土壤贮水量(mm)。

表 6 冬小麦籽粒产量与播种期主要供水量及各生育阶段自然降水量之间的数量关系

水分条件	回归模型	R	R^2	F	df_1	df_2	Sig.
W1	$Y_s=35.776S_{si}+6.831P_{sw}+10.103P_{wj}+10.064P_{ja}+9.476P_{am}-5250.452$	0.998	0.996	188.705	5	4	0.000
W2	$Y_s=-1.478S_{si}+4.724P_{sw}+12.440P_{wj}+5.861P_{ja}+1.570P_{am}+8460.087$	0.730	0.532	0.911	5	4	0.552

注:W1 为雨养处理;W2 为籽粒产量(9 000~10 000 kg/hm²)和水分利用效率(20.3~26.8 kg/(hm²·mm))均佳的最优补灌处理; Y_s 为籽粒产量; S_{si} 为播种期主要供水量($S_{si}=0-100$ cm 土层土壤贮水量+播种期灌水量); P_{sw} 、 P_{wj} 、 P_{ja} 、 P_{am} 分别为播种至越冬期降水量、越冬至拔节期降水量、拔节至开花期降水量、开花至成熟期降水量。

表 7 雨养处理和高产高水分利用效率的最优补灌处理各生育阶段的主要供水量

项目	W1				W2			
	WS_{sw}	WS_{sj}	WS_{sa}	WS_{sm}	WS_{sw}	WS_{sj}	WS_{sa}	WS_{sm}
数据数量	10	10	10	10	10	10	10	10
平均值	326.8	370.3	414.5	462.1	326.8	373.3	463.5	549.6
最大值	380.6	446.6	480.6	525.2	380.6	446.6	521.7	624.5
最小值	284.3	311.8	352.8	406.8	284.3	311.8	412.9	513.4
极差	96.3	134.8	127.8	118.4	96.3	134.8	108.8	111.1
标准差	30.3	42.3	43.4	38.4	30.3	40.4	32.6	32.7
变异系数	9.3	11.4	10.5	8.3	9.3	10.8	7.0	6.0

注:W1 为雨养处理;W2 为籽粒产量(9 000~10 000 kg/hm²)和水分利用效率(20.3~26.8 kg/(hm²·mm))均佳的最优补灌处理; WS_{sw} 、 WS_{sj} 、 WS_{sa} 和 WS_{sm} 分别为播种至越冬期、播种至拔节期、播种至开花期、播种至成熟期主要供水量(播种期 0—100 cm 土层土壤贮水量+降水量+灌水量)。

2.4 冬小麦实现高产高水分利用效率的最优补灌水量与雨养条件下籽粒产量之间的数量关系

从表 8 可以看出,冬小麦实现高产和高水分利用效率所需的全生育期最优补灌水量与出苗至成熟期间无灌溉的雨养籽粒产量呈极显著负相关关系,说明雨养籽粒产量越高,获得高产高水分利用效率所需的补灌水量越少,这与小麦播种期和生长期自然供水(土壤水和降水)的变化有关系。

利用 2007—2015 各年度试验播种期主要供水量及各生育阶段自然降水量,通过表 7 中籽粒产量与播种期主要供水量和各生育阶段自然降水量的回归模型,计算出各年度试验雨养条件下的籽粒产量(模拟值)。将各年度小麦出苗至拔节期和出苗至开花期的最优补灌水量与相应的模拟雨养籽粒产量进行回归分析。结果见表 8。在播种期供水适宜的条件下,小麦出苗至开花期最优补灌水量与雨养籽粒产量呈极显著负相关关系。出苗至拔节期最优补灌水量与雨养籽粒产量呈极显著二次曲线关系,这为通过模拟手段确定冬小麦高产节水

的最优补灌水量提供了理论和技术支持。

2.5 冬小麦按需补灌方法

根据以上试验结果和各年度冬小麦播种期的水分管理方法,制定用于预测播种期、越冬期、拔节期和开花期需补灌水量的按需补灌方法:

2.5.1 播种期土壤贮水量与需补灌水量的预测 播种前测定田间地表下 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤容重、田间持水量和体积含水量,并计算 0—20 cm 土层土壤相对含水量(θ_{r-0-20} ,%) 和 0—40 cm 土层土壤平均体积含水量(θ_{v-0-40} ,v/v,%)。用 0—40 cm 土层土壤体积含水量与 0—100 cm 土层土壤贮水量的回归模型(表 5,公式 1)计算播种前 0—100 cm 土层土壤贮水量(S_s ,mm):

$$S_s=7.265\theta_{v-0-40}+100.068 \tag{1}$$

按照各年度冬小麦播种期的水分管理方法,根据 θ_{r-0-20} 数值的大小,判断是否需要在播种期补灌。当 $\theta_{r-0-20}>70\%$ 时,无需补灌;当 $\theta_{r-0-20}\leq 70\%$ 时,用公式(2)计算播种期需补灌水量(I_s ,mm):

表 8 高产高水分利用效率的最优补灌水量与雨养条件下的籽粒产量之间的数量关系

序号	回归模型	R	R ²	F	df ₁	df ₂	Sig.
1	$SI_t=-0.040Y_a+372.539$	0.856	0.733	21.969	1	8	0.002
2	$SI_{su}=-0.022Y_s+224.742$	0.933	0.870	53.538	1	8	0.000
3	$SI_{sj}=-7.085E-6Y_s^2+0.066Y_s-89.748$	0.863	0.745	75.509	3	7	0.000

注:SI_t 为实现高产(9 000~10 000 kg/hm²)和高水分利用效率(20.3~31 kg/(hm²·mm))所需的最优补灌水量;SI_{su} 为实现高产和高水分利用效率在小麦出苗至开花阶段所需的最优补灌水量;SI_{sj} 为实现高产和高水分利用效率在小麦出苗至拔节阶段所需的最优补灌水量;Y_a 为实测的雨养籽粒产量;Y_s 是利用 2007—2015 各年度播种期主要供水量及各生育阶段自然降水量,通过表 6 中雨养条件下的籽粒产量与播种期主要供水量和各生育阶段自然降水量的回归模型计算出的雨养籽粒产量(模拟值)。

$$I_s=10\times0.2\times(FC_{0-20}-\theta_{v-0-20}) \tag{2}$$

式中:FC₀₋₂₀ 为 0—20 cm 土层田间持水量(v/v,%);
 θ_{v-0-20} 为 0—20 cm 土层土壤体积含水量(v/v,%)。

2.5.2 越冬期需补灌水量的预测 在日平均气温下降至 3℃左右、表层土壤夜冻昼消时,用公式(3)计算冬小麦播种至越冬期主要供水量(W_{S_{sw}},mm):

$$WS_{sw}=S_s+P_{sw}+I_s \tag{3}$$

式中:P_{sw} 为播种至越冬期自然降水量(mm)。

按照冬小麦实现高产高水分利用效率在播种至越冬期所需的适宜主要供水量(326.8 mm,表 7),根据 W_{S_{sw}} 数值的大小,判断是否需要在越冬期补灌。当 W_{S_{sw}}≥326.8 mm 时,无需补灌;当 W_{S_{sw}}<326.8 mm 时,用公式(4)计算越冬期需补灌水量(I_w,mm):

$$I_w=326.8-WS_{sw} \tag{4}$$

2.5.3 拔节期需补灌水量的预测 在拔节期 0—20 cm 土层土壤相对含水量降至 60%以下时,利用籽粒产量与播种期主要供水量和各生育阶段降水量的回归模型(表 6,公式 5)预测雨养条件下的冬小麦籽粒产量(Y_s,kg/hm²):

$$Y_s=35.776S_{si}+6.831P_{sw}+10.103P_{wj}+10.064P_{ja}+9.476P_{am}-5250.452 \tag{5}$$

式中:P_{sw} 和 P_{wj} 为实测降水量;P_{ja} 和 P_{am} 为 0。

利用小麦出苗至拔节期最优补灌水量与雨养籽粒产量的回归模型(表 8,公式 6)计算冬小麦出苗至拔节期需补灌水量(SI_{sj},mm):

$$SI_{sj}=-7.085E-6Y_s^2+0.066Y_s-89.748 \tag{6}$$

用公式(7)计算冬小麦拔节期需补灌水量(I_j,mm):

$$I_j=SI_{sj}-I_w \tag{7}$$

2.5.4 开花期需补灌水量的预测 在开花期 0—20 cm 土层土壤相对含水量降至 60%以下时,用公式(5)预测雨养条件下的冬小麦籽粒产量(Y_s,kg/hm²)。计算时,P_{sw}、P_{wj} 和 P_{ja} 为实测降水量,P_{am} 为 0。利用冬小麦出苗至开花期最优补灌水量与雨养籽粒产量的回归模型(表 8,公式 8)计算冬小麦出苗至开花期需补灌水量(SI_{si},mm):

$$SI_{si}=-0.022Y_s+224.742 \tag{8}$$

用公式(9)计算冬小麦开花期需补灌水量(I_a,mm):

$$I_a=SI_{si}-I_w-I_j \tag{9}$$

2.6 冬小麦按需补灌方法的应用与验证

2.6.1 播种前 0—100 cm 土层土壤贮水量的模拟值与实测值比较 从表 9 可以看出,根据冬小麦播种前 0—20 cm 土层土壤体积含水量预测 0—100 cm 土层

土壤贮水量,两试验点模拟值与实测值的相对误差分别为-9.0%和-2.2%;根据 0—40 cm 土层土壤体积含水量预测,两试验点模拟值与实测值的相对误差分别为-4.2%和 6.2%。表明利用 0—40 cm 土层土壤体积含水量预测 0—100 cm 土层土壤贮水量,模拟值与实测值的一致性较好。

表 9 播种期 0—100 cm 土层土壤贮水量(S_v)的模拟值与实测值比较

试验地点	输入条件	模拟值/mm	实测值/mm	相对误差/%
玄庄	θ_{v-0-20}	251.2	276.1	-9.0
	θ_{v-0-40}	264.5	276.1	-4.2
	θ_{v-0-20}	216.3	221.2	-2.2
南仇	θ_{v-0-40}	235.0	221.2	6.2

注: θ_{v-0-20} 为 0—20 cm 土层土壤体积含水量(v/v , %); θ_{v-0-40} 为 0—40 cm 土层土壤体积含水量(v/v , %)。

2.6.2 按需补灌与定额灌溉关键生育时期补灌水量比较 从表 10 可以看出,两试验点 SI 处理播种期、拔节期和开花期补灌水量均显著低于 QI 处理,全生育期总灌水量比 QI 处理分别减少 57.6 mm 和 36.2 mm,节约用水 32.0%和 20.1%。

2.6.3 按需补灌与定额灌溉农田耗水量、籽粒产量和水分利用效率比较 从表 11 可以看出,两试验点不同品种和灌溉方式处理间比较,规律一致。同一品种,SI 处理的籽粒产量与 QI 处理的无显著差异,但农田耗水量显著降低,水分利用效率显著提高。说明按需补灌可以在保持冬小麦高产水平的基础上,显著减少水分消耗、提高水分利用效率,比定额灌溉挖掘出更大的节水潜力。

表 10 按需补灌(SI)与定额灌溉(QI)关键生育时期补灌水量比较 单位:mm

试验地点	处理	I_s	I_w	I_j	I_a	总灌水量
玄庄	SI	45.8b	0	34.6b	42.0b	122.4b
	QI	60.0a	0	60.0a	60.0a	180.0a
南仇	SI	50.4b	0	54.3b	39.2b	143.8b
	QI	60.0a	0	60.0a	60.0a	180.0a

注: I_s 、 I_w 、 I_j 和 I_a 分别为播种期、越冬期、拔节期和开花期灌水量;数据后不同字母表示同一试验地点不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

表 11 不同处理冬小麦农田耗水量、籽粒产量和水分利用效率

试验地点	品种	处理	农田耗水量/mm	籽粒产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
玄庄	山农 23	SI	445.5b	9402.8a	21.1a
		QI	495.7a	9554.3a	19.3b
	山农 29	SI	427.4c	9351.9a	21.9a
		QI	481.2a	9407.1a	19.5b
南仇	山农 23	SI	386.1b	9016.7a	23.4a
		QI	416.4a	9203.5a	22.1b
	山农 29	SI	397.5b	9135.2a	23.0a
		QI	425.8a	9297.8a	21.8b

注:SI 和 QI 分别为按需补灌和定额灌溉处理。数据后不同字母表示同一试验地点的不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

土壤垂直剖面水分的分布分为活跃层(0—20 cm)、次活跃层(20—50 cm)、过渡层(50—200 cm)和相对稳定层(200—500 cm)。活跃层和次活跃层土壤水分在 12 月至翌年 3 月中旬处于相对稳定期、3 月下旬至 5 月中旬处于缓慢下降期、5 月下旬至 9 月中旬处于增失交替期、9 月下旬至 11 月末处于持续下降期^[22]。尽管如此,许多研究认为表层土壤含水量与一定深度土层土壤含水量之间存在数量关系。早在 1979 年,Biswas 等^[23]就提出用表层土壤水分来估算深层水分的线性表达式。Ragab 等^[24]也发现 0—5,0—10 cm 土层土壤水分均与 0—50 cm 土层土壤水分呈较好的线性关系。王国玉等^[25]研究了 0—10, 0—20,0—30,0—40,0—50 cm 土层土壤含水量与 0—100 cm 土层土壤含水量的关系并建立了预测模型,以 0—50 cm 的预测效果最佳。刘苏峡等^[26]和杨静敬等^[27]也得到了与之一致的结果。本文对连续 8 年及多点多底墒条件的试验数据分析表明,冬小麦播种前 0—20,0—40,0—60,20—40,20—60 cm 土层土壤体积含水量与 0—100 cm 土层土壤贮水量均呈极显著线性相关,其决定系数 R^2 值呈现随测定深度和厚度增加而增大的趋势。说明在该地区粉壤土条件下,小麦播种前的上层土壤含水量与一定深度土层土壤贮水量关系密切;综合考虑决定系数 R^2 值大小和测定土层深度,利用 0—40 cm 土层土壤含水量预测 0—100 cm 土层土壤贮水量是可行的。而且两试验点的实践验证结果表明,采用 0—40 cm 土层土壤体积含水量预测 0—100 cm 土层土壤贮水量,模拟值与实测值的一致性较好。

播种期一定深度土层土壤贮水和整个生长季节的降水是小麦耗水的主要来源,特别是在干旱和半干旱地区^[28]。我国黄淮地区年降水量一般为 400~800 mm,而冬小麦生长季的降水量只有 150~180 mm,仅占冬小麦总需水量的 25%~40%^[29-30],因此播种期的土壤贮水对满足冬小麦全生育期耗水具有重要作用^[11]。在雨养或有限供水的条件下,冬小麦对土壤水的消耗量约占全生育期总耗水量的 40%~50%^[31]。然而,冬小麦并不能完全使用 0—200 cm 土层中的有效贮水,其最大消耗量仅为 72%^[32]。由于冬小麦的根系 71.1%分布在 0—60 cm 土层,25.0%分布在 60—120 cm 土层,只有 3.9%分布在 120—200 cm 土层^[33],深层土壤根长密度小于 0.8 cm/cm³ 就会限制对土壤水的吸收,在小麦成熟时,尽管上层土壤已经缺水,但在深层根区仍会残留超过 100 mm 的可用水不能被小麦吸收利用^[34]。也就是说冬小麦所消耗的土壤水分主要来自 0—120 cm 土层,这与本试验评估主要土壤供水量所采用的土体深度(100 cm)基本一致。降水对作物产量的调

节作用受土壤供水和灌溉的影响。有研究表明,在雨养条件下只有抽穗前的降水与籽粒产量呈正相关关系,其他时期的降水和全生育总降水量均与籽粒产量无显著相关关系^[31]。本试验结果表明,在雨养条件下,冬小麦籽粒产量与播种期主要供水量(0—100 cm 土层土壤贮水量+播种期灌水量)和各生育阶段自然降水量呈极显著回归关系,而在小麦生育期内适时适量补灌的条件下,籽粒产量受播种期土壤供水量和生长季自然降水量的影响明显减小。冬小麦实现高产和高水分利用效率,从播种至各关键生育时期所需的适宜主要供水量基本稳定。说明在冬小麦生育进程中,水分供给与作物需水的精确匹配是实现高产和高水分利用效率的重要途径。适时适量补充灌溉可有效弥补冬小麦各生育阶段自然供水的不足。

在小麦苗期、返青至拔节期及生理成熟至收获期适度水分亏缺不会对籽粒产量造成较大的负面影响,而且有利于实现高产和高水分利用效率^[35]。本文连续8年的补灌试验和两试验点的实践验证试验均表明,播种期、拔节期和开花期是冬小麦水分管理的关键时期。前人已针对冬小麦适宜的灌水量做了较多的研究,但由于试验条件不同,结果有较大差异。Xu等^[4]认为,拔节期灌水60 mm是华北平原实现冬小麦高产高水分利用效率的最佳灌溉方案。另有研究表明,在拔节期灌水120 mm或在拔节期和抽穗期各灌水60 mm可实现冬小麦高产和高水分利用效率^[36]。Sun等^[14]认为,降水年型不同,适宜的灌水量亦不同,干旱年、平水年和丰水年冬小麦最佳灌溉量分别为186,161,99 mm。可是如何依据降水的丰缺确定适宜的灌水时期和数量,尚缺乏具体措施和系统研究。本课题组前期研究探索了一种基于灌溉前土壤含水量确定补灌水量的方法。冬小麦关键生育时期一定深度土层土壤贮水量是前期土壤贮水、降水、灌溉及作物耗水的综合表现^[15]。基于此,通过连续8年及多点多底墒条件试验,发现在播种期供水适宜的条件下,小麦出苗至开花期的最优补灌水量与雨养籽粒产量呈极显著负相关;出苗至拔节期的最优补灌水量与雨养籽粒产量呈极显著二次曲线关系,依此建成了冬小麦按需补灌方法。试验还表明,冬小麦实现高产高水分利用效率的全生育期最佳灌水量平均为101.8 mm,变化范围为51.0~172.0 mm。采用按需补灌方法,与定额灌溉处理相比,不仅保持了原有的高产水平,而且减少灌溉水36.2~57.6 mm,节约用水20.1%~32.0%,显著提高水分利用效率。

4 结论

(1)在雨养条件下,籽粒产量与播种期主要供水量(0—100 cm 土层土壤贮水量+播种期灌水量)和

各生育阶段自然降水量呈极显著回归关系,而在适时适量补灌的条件下,籽粒产量受播种期土壤供水量和生长季自然降水量的影响明显减小。

(2)冬小麦获得高产和高水分利用效率,从播种至各关键生育时期所需的适宜主要供水量基本稳定。适时适量补充灌溉可有效弥补冬小麦各生育阶段自然供水的不足。在播种期供水适宜的条件下,出苗至拔节期和出苗至开花期的最优补灌水量与雨养籽粒产量分别呈极显著二次曲线关系和极显著负相关。

(3)冬小麦播种期0—20,0—40,0—60,20—40,20—60 cm 土层土壤体积含水量与0—100 cm 土层土壤贮水量均呈极显著线性相关。综合考虑决定系数 R^2 值大小和测定土层深度,利用0—40 cm 土层土壤含水量预测0—100 cm 土层土壤贮水量是可行的,模拟值与实测值的一致性较好。

(4)多年试验表明,黄淮流域冬小麦实现9 000~10 000 kg/hm²高产和20.3~26.8 kg/(hm²·mm)高水分利用效率的全生育期最佳灌水量平均为101.8 mm,变化范围为51.0~172.0 mm。采用按需补灌方法,与定额灌溉处理相比,不仅保持了原有的高产水平,而且减少灌溉水36.2~57.6 mm,节约用水20.1%~32.0%,显著提高水分利用效率。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2015) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 244-245, 260-261, 407-410.
- [2] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1/2): 211-218.
- [3] Hu Y K, Moiwo J P, Yang Y H, et al. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(3/4): 219-232.
- [4] Xu C L, Tao H B, Tian B J, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196(9): 268-275.
- [5] Tari A F. The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167(3): 1-10.
- [6] 周吉红, 毛思帅, 王俊英, 等. 限量灌溉对京郊小麦产量、水分利用效率及效益的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1043-1049.
- [7] 叶德练, 齐瑞娟, 张明才, 等. 节水灌溉对冬小麦田土壤微生物特性、土壤酶活性和养分的调控研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(1): 224-231.

- [8] Yuan Z, Yan D H, Yang Z Y, et al. Impacts of climate change on winter wheat water requirement in Haihe River Basin[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2016, 21(5): 677-697.
- [9] Rinaldi M. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: A seasonal analysis with the CERES-Wheat model[J]. Field Crops Research, 2004, 89(1): 27-37.
- [10] Hong E M, Nam W H, Choi J Y, et al. Projected irrigation requirements for upland crops using soil moisture model under climate change in South Korea[J]. Agricultural Water Management, 2016, 65(2): 163-180.
- [11] 林祥, 王东, 谷淑波. 播种期补灌对土壤含水量和小麦籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(12): 1700-1711.
- [12] 孟晓瑜, 王朝辉, 李富翠, 等. 底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 369-375.
- [13] Zhang X Y, Qin W L, Chen S Y, et al. Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades: A case study in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179(1): 47-54.
- [14] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1139-1145.
- [15] Wang D, Yu Z W, White P J. The effect of supplemental irrigation after jointing on leaf senescence and grain filling in wheat[J]. Field Crops Research, 2013, 151(9): 35-44.
- [16] Guo Z J, Yu Z W, Wang D, et al. Photosynthesis and winter wheat yield responses to supplemental irrigation based on measurement of water content in various soil layers[J]. Field Crops Research, 2014, 166(9): 102-111.
- [17] 山东农业大学. 小麦专用微喷带: 中国, 201220356553. 7 [P]. 2013-02-06.
- [18] 李涛, 李芹, 王树明, 等. 不同橡胶林对土壤容重及田间持水量的影响研究[J]. 热带农业科学, 2015, 35(12): 1-6, 12.
- [19] 王艳丽. 环刀法测定土壤田间持水量实验结果分析[J]. 地下水, 2016, 38(2): 55-57.
- [20] 刘增进, 李宝萍, 李远华, 等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 58-63.
- [21] Sepaskhah A R, Tagafteh A. Yield and nitrogen leaching in rapeseed field under different nitrogen rates and water saving irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2012, 112(9): 55-62.
- [22] 贾志峰. 土壤水的监测技术与运移规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [23] Biswas B C, Dasgupta S K. Estimate of soil moisture at deeper depth from surface layer data[J]. Mausam, 1979, 30(4): 40-45.
- [24] Ragab R. Towards a continuous operational system to estimate the root-zone soil moisture from intermittent remotely sensed surface moisture[J]. Journal of Hydrology, 1995, 173(1/4): 1-25.
- [25] 王国玉, 池宝亮, 李娜娜, 等. 晋南旱塬地农田土壤水分动态及预测模拟[J]. 山西农业科学, 2014, 42(10): 1106-1110.
- [26] 刘苏峡, 邢博, 袁国富, 等. 中国根层与表层土壤水分关系分析[J]. 植物生态学报, 2013, 37(1): 1-17.
- [27] 杨静敬, 蔡焕杰, 王松鹤, 等. 杨陵区浅层土壤水分与深层土壤水分的关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 53-57.
- [28] He G, Wang Z H, Li F C, et al. Soil water storage and winter wheat productivity affected by soil surface management and precipitation in dryland of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 171(6): 1-9.
- [29] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma, 2006, 136(3/4): 708-715.
- [30] Liu H J, Yu L P, Luo Y, et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(2): 483-492.
- [31] Zhang X Y, Wang Y Z, Sun H Y, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5): 1103-1112.
- [32] An S Q, Liu G S, Guo A H. Consumption of available soil water stored at planting by winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2003, 63(2): 99-107.
- [33] Zhou S L, Wu Y C, Wang Z M, et al. The nitrate leached below maize root zone is available for deep-rooted wheat in winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Environmental pollution, 2008, 152(3): 677-687.
- [34] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2275-2287.
- [35] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Systems, 2003, 78(3): 355-367.
- [36] Bian C Y, Ma C J, Liu X H, et al. Responses of winter wheat yield and water use efficiency to irrigation frequency and planting pattern[J]. PLoS one, 2016, 11(5): e0154673.