

# 宁夏中部干旱带荒漠绿洲灌水定额对玉米耗水规律及水分生产率的影响

金建新, 雷金银, 何进勤, 尹志荣, 桂林国

(宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002)

**摘要:**为探索干旱荒漠区不同灌水定额对玉米农田土壤水分变化、玉米耗水规律及水分生产率的影响,以不同灌水量梯度为试验设计,测定灌水前后土壤含水量变化,计算玉米阶段及全生育期耗水量,结合籽粒产量提出水分生产率最优灌溉制度。结果表明,土壤表层含水量主要受灌水定额的影响,在第三次灌水前 T1 土壤含水量降低为 13.2%,而 T9 仍然为 19.4%;深层则受作物蒸腾、棵间蒸发及灌水等多种因素综合作用,耗水量与灌水量成正比例关系, T1 全生育期耗水量为 182.39 mm, T9 为 258.25 mm, 差异显著, T9 产量最高, 达到 8611.2 kg/hm<sup>2</sup>, 但其水分生产率为 1.64 kg/m<sup>3</sup>, 低于 T7 (1.78 kg/m<sup>3</sup>)。因此合理的灌溉制度对于节水灌溉、提高水分生产率具有重要的意义。

**关键词:**灌水定额; 荒漠绿洲; 耗水规律; 水分生产率; 宁夏回族自治区

**中图分类号:** S311

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-6933(2016)S1-0031-05

水资源短缺已经成为影响我国经济发展的主要瓶颈,在水资源利用方面存在诸多浪费,特别是农业水资源利用过程中缺乏科学统筹和高效配置,浪费现象严重,一些地区还存在漫灌、串灌等落后方式,严重制约了我国农业可持续发展,特别是荒漠绿洲地区,提高水分生产率,制定科学合理的灌溉制度显得尤为重要。从作物生育期生理特点出发,研究缺水对其生长发育及后续生长的影响,通过对作物缺水响应的研究,寻求其非关键需水期,对非关键需水期及关键需水期所必需的土壤含水量及灌溉定额进行统筹,结合作物最终籽粒产量与作物需水量的关系,提出实现水分利用效率最大的非充分灌溉制度是发展节水、高效农业的必由之路,特别是近年来宁夏回族自治区(以下简称宁夏)黄河配水量的减少,直接影响区内农业综合生产。因此,发展节水灌溉、优化灌溉管理、调整种植结构迫在眉睫。1968年 Jensen 提出 Jensen 水分生产函数模型,提出了阶段水量和作物产量的关系,康绍忠等<sup>[1]</sup>将阶段水分亏缺对作物产量的影响及敏感指标进行初步探索,茆智等<sup>[2]</sup>、王修贵等<sup>[3]</sup>对不同作物水分生产函数及水分亏缺敏感性指标参数进行了研究,取得一定的成果,开始了非充分灌溉的专题研究。近年来随着植

物生理学、土壤水动力学等学科的发展,学者逐渐开始对基于作物生理的节水灌溉技术展开研究,提出配合施肥的控制性分根交替灌及基于 ABA 调节的水分利用措施,对玉米非充分灌溉条件下的需水量的研究也有诸多报道<sup>[4-5]</sup>,刘战东等<sup>[6]</sup>研究了膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米形态、耗水量的影响,提出了适应新疆维吾尔自治区的膜下滴灌玉米节水灌溉制度,孙占祥等<sup>[7]</sup>在 30 mm 灌水条件下研究了玉米土壤水分全生育期变化规律及其耗水规律,宇宙等<sup>[8]</sup>在膜下滴灌条件下通过对玉米不同生育期设置不同灌溉水量研究了其全生育期蒸散耗水量,明确了其全生育期蒸散量及日耗水量等。笔者基于宁夏盐池荒漠绿洲不同灌水定额对玉米土壤水分、耗水规律及水分生产率的影响,初步探索了宁夏中部干旱带荒漠绿洲玉米生产过程中水分生产率最高的灌溉制度,为提高水分生产率、发展高效节水灌溉制度,以及为当地玉米产业制定灌溉制度提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验站概况

试验与 2014 年 4 月—10 月在宁夏盐池县荒漠绿洲试验示范基地进行,试验基地位于宁夏东部

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2014BAD14B006);宁夏回族自治区自然科学基金(NZ15127)

作者简介:金建新(1988—),男,工程师,硕士,主要从事旱区农业和节水灌溉研究。E-mail:jinnxnk009@163.com

(东经 107°14'10", 北纬 37°21'18"), 为宁夏中部干旱带生态类型区。区内降雨稀少、蒸发量大、干旱指数大、风沙多、自然灾害频繁。多年平均气温为 7.8℃, 极端最高气温为 39.5℃, 极端最低气温为 -27.3℃, 平均大气湿度为 45%, 日照时数为 3 028 h, 大于等于 10℃ 的积温为 3 145℃; 大于 0℃ 的积温为 3 550℃。无霜期 150 d, 最大冻土深为 115 cm, 多年平均降雨量为 110 mm, 多年平均蒸发量为 2 644 mm, 降雨年内分布不均衡, 90% 的降雨主要集中在 7、8、9 三个月, 属于典型的内陆干旱季风气候。试验区降雨量、相对湿度及土壤物理参数见图 1、表 1。

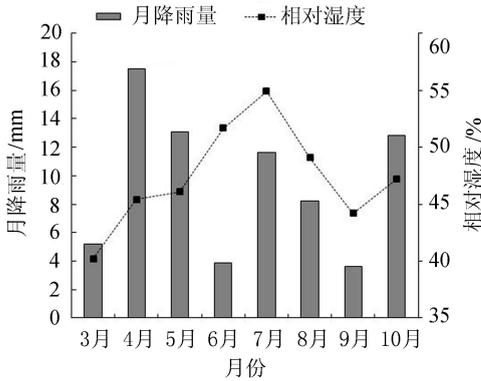


图 1 试验区降雨量与相对湿度

表 1 试验区土壤物理参数

土层深度/cm	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/%	总孔隙度/%	饱和含水率/%	土壤质地
0~20	1.42	21.69	42.3	31.44	砂土
20~40	1.44	23.12	38.8	32.35	砂土
40~60	1.38	20.25	42.1	28.89	砂质壤土
60~80	1.34	16.88	45.9	26.24	砂质壤土

### 1.2 试验设计与材料

试验于 2014 年 4—9 月进行, 共持续 6 个月。试验设计为大田水分因子试验, 采用灌水梯度设计, 田间随机区组排列, 玉米品种为中熟性屯玉 99 号, 采用膜下滴灌灌水, 用迷宫式滴头供水, 滴头流量为 0.2 L/s, 滴头间距为 30 cm, 用水表精确控制每次的灌水量。试验共设计了 9 个灌水定额处理 (T1~T9), 其他田间管理均相同, T1: 240 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、

T2: 270 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T3: 315 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T4: 360 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T5: 405 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T6: 450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T7: 495 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T8: 540 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、T9: 585 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 每个灌水定额处理设置 3 个重复, 每个小区面积 20 m<sup>2</sup>, 灌水周期为 8 d, 玉米种植采用 1 膜 2 管 3 行, 行距 40 cm、株距 25 cm, 在播种前施基肥, 主要为复合肥 750 kg/hm<sup>2</sup>, 尿素 375 kg/hm<sup>2</sup>, 硝酸钾 450 kg/hm<sup>2</sup>, 第 3~9 次灌水时在首部加肥料罐随水追施尿素每个小区 1.5 kg。试验区氨态氮含量为 14 mg/kg, 速效钾含量为 185 mg/kg, 速效磷含量为 69 mg/kg, 有机质含量为 13%,

### 1.3 数据处理方法

采用 Excel、SPSS8.0 软件进行原始数据的甄别处理、统计分析、相关性分析和部分图表的绘制, 在 Origin8.0 中进行检验模型与回归方程的拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水定额处理对土壤水分的影响

土壤水分主要受降雨、灌溉及作物腾发量消耗的影响, 宁夏盐池县荒漠绿洲区域因降雨量稀少, 影响土壤水分的主要因素为灌溉和作物生长消耗, 图 2 为第三次灌水前 (4 月 24 日) 土壤含水量, 可以看出灌溉定额对土壤含水量具有较大的影响, 表层土壤水分基本与灌水定额呈正比例关系, 在 0~20 cm 土层, T1 土壤含水量在灌水前降低到 13.2%, 而 T9 为 15.4%, 深层土壤含水量各处理总体表现为先降低再升高的趋势, 在 60~80 cm 土层处各处理土壤含水量达到了最小值, 但是灌水定额较大的处理土壤含水量相对稳定, T1、T2、T3 在 60~80 cm、100~120 cm 土层存在 2 个峰值, 而 T7、T8、T9 在 0~120 cm 土层之内土壤含水量基本保持在 10%~20% 之间, 这可能是受灌水量、作物吸收利用、棵间蒸发等综合影响的结果。T1、T2、T3 灌前在计划湿润层内平均含水量占田间持水量的 45%~55%, 在玉米拔节期至抽穗期该土壤水分属于重度胁迫, T4、T5、T6 计划湿润层的平均含水量占田间

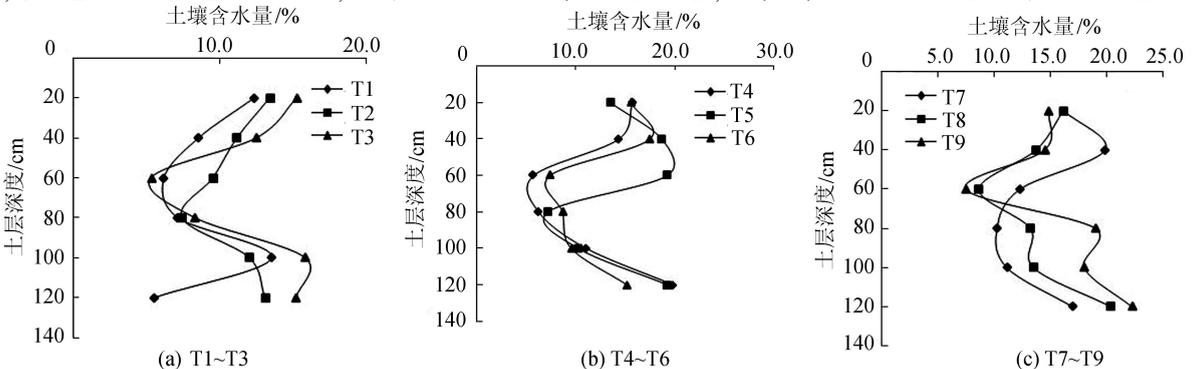


图 2 各灌水定额处理在第三次灌水前土壤含水量

持水量的比例为 60% ~ 70% ,在玉米耗水高峰期属于中度胁迫,T7、T8、T9 该比例为 75% ~ 85% ,属于轻度胁迫。

图 3 为各灌水定额处理在第三次灌水之后的土壤含水量。从图 3 可以看出,灌水后土壤含水量明显增加,最为明显的是 T7、T8、T9,表层含水量分别为 18.5%、19.6% 和 20.7% ,占田间持水量的 85% ~ 95% ,基本达到充分灌溉的要求,其深层土壤含水量变幅较小,和灌水前规律类似,0 ~ 120 cm 土壤含水量几乎都达到田间持水量的 80% 以上,而 T4、T5、T6 在灌水后土壤含水量在 0 ~ 120 cm 土层突变较多,但是在 0 ~ 60 cm 土层玉米根系分布区,其土壤含水量基本达到 15% 以上,在表层 0 ~ 20 cm 土层分别为 16.9%、17.4% 和 18.6% ,占到田间持水量的 75% ~ 80% ,在玉米关键需水期仍为轻度胁迫,以此作为灌溉指标可取得节水和增产的双重效应。T1、T2、T3 在灌水后其土壤含水量虽然也有显著上升,但是在表层玉米根系活动层含水量仍然较小,在 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量分别为 13.8%、14.2%、14.9% ,基本保持在田间持水量的 60% ~ 70% 范围内,并且随着土层深度增加其土壤含水量迅速减小,与灌水前类似,在 60 ~ 80 cm 土层达到最小值,随后又逐渐增大,仍然出现 2 个峰值,这可能与长期水分亏缺导致玉米生长受阻,根系发育不良无法深扎吸收利用较深土层水分,外加棵间蒸发较为强烈所致,

总体来说其 0 ~ 120 cm 土层土壤含水量占田间持水量的 55% ~ 65% ,可见 T1、T2、T3 在灌水后仍然处于重度胁迫状态,不利于玉米生长发育。

## 2.2 不同灌水定额处理玉米耗水规律及耗水模数

玉米植株各生育期的耗水量主要与玉米叶片蒸发、作物自身生长发育所需要的水分及维持农田小气候所需要的水分有关,玉米在各生育期的耗水量是多因素综合作用的结果,其中影响较大的有气象参数、品种、土壤性质及时空分布和田间管理等,同时次玉米生育期阶段耗水量和总耗水量也受灌溉制度的影响,各灌水定额处理不同生育期的阶段耗水量、总耗水量及耗水模数计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,各灌水定额处理在玉米不同生育期的阶段耗水量差异显著,但是不同灌水定额处理玉米随着生育期推进其耗水情况的变化趋势均为单峰偏右曲线,即在抽穗期—灌浆期玉米耗水量最大,其次是拔节期—抽穗期,不同灌水定额处理总体表现为灌浆期—成熟期的玉米阶段耗水量大于苗期,即玉米在苗期的阶段耗水量最小。T1、T3、T6、T9 在抽穗期—灌浆期和拔节期—抽穗期的阶段耗水量,分别比苗期增加了 174.3%、130.3%、105.4%、92.6% 和 105.1%、63.4%、35.6%、12.7% ,增幅明显。这是由于在拔节期光照逐渐增强,玉米营养生长加快,玉米在该生育期需要充足的水分以保证生长消耗和维持水分平衡,属于需水关

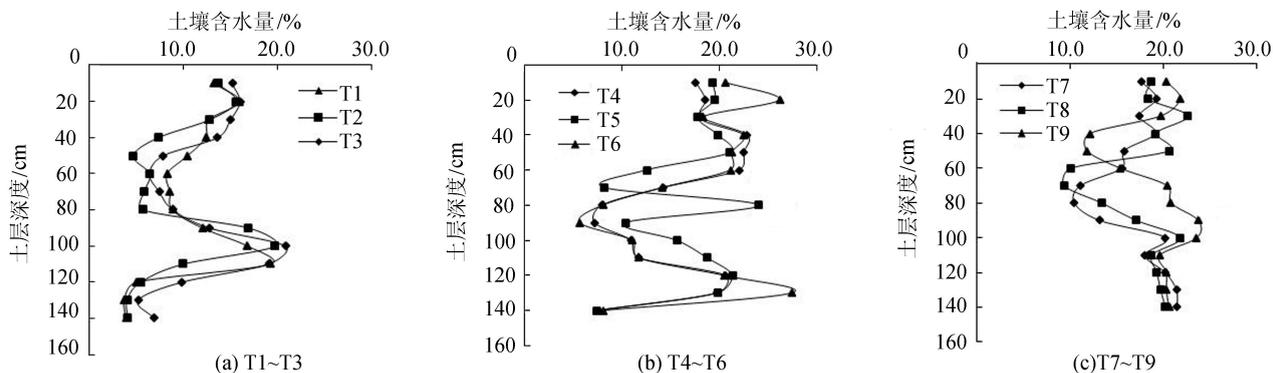


图 3 各灌水定额处理在第三次灌水后土壤含水量

表 2 不同灌水定额处理各生育期玉米耗水量与耗水模数

灌水定额处理	苗期		拔节期—抽穗期		抽穗期—灌浆期		灌浆期—成熟期		总耗水量/mm
	耗水量/mm	耗水模数	耗水量/mm	耗水模数	耗水量/mm	耗水模数	耗水量/mm	耗水模数	
T1	27.10	14.86	53.39	29.27	72.26	39.62	29.64	16.25	182.39
T2	32.47	15.66	56.98	27.48	84.61	40.81	33.26	16.04	207.32
T3	37.69	16.00	64.03	27.19	90.13	38.27	43.64	18.53	258.25
T4	42.26	16.36	66.44	25.73	98.16	38.01	51.39	19.90	279.69
T5	47.99	17.16	69.16	24.73	108.24	38.70	54.30	19.41	291.80
T6	52.03	17.83	70.21	24.06	103.59	35.50	65.97	22.61	317.26
T7	50.89	16.04	72.64	22.90	122.39	38.58	71.34	22.49	342.78
T8	62.85	18.34	73.88	21.55	125.17	36.52	80.88	23.60	374.84
T9	70.55	18.82	80.06	21.36	133.97	35.74	90.26	24.08	258.25

键期,在抽穗期玉米耗水量达到峰值,是因为在抽穗期玉米叶面积指数 LAI 达到最大值,加上光照强度较大,所以其腾发量较大,而且在抽穗期玉米由营养生长逐渐过渡到生殖生长阶段,玉米植株需要较多的水分来保证同化物的形成和积累。

由表 2 还可以看出,不同灌水定额处理在同一生育期阶段对玉米耗水量的影响也较为显著,在苗期其他处理与 T1 相比,耗水量分别大 19.5%、45.1%、57.2%、82.7%、90.9%、88.5%、138.8%、162.1%,而在拔节期,T1 比其他灌水处理耗水总量低 5.7%、15.6%、20.8%、25.6%、26.2%、30.8%、34.6%、44.0%,各处理对比表明,苗期灌水越多,玉米后期阶段耗水量及总耗水量越大,各处理灌水对玉米需水峰值的影响也较大。T1、T2、T3 在玉米生长过程中,特别是后期其处于重度水分胁迫状态,T7、T8、T9 的玉米处于轻度胁迫或不胁迫,灌水定额在抽穗期对重度、中度水分胁迫处理需水峰值的影响差异性较轻度胁迫时(T4、T5、T6)的大。总之,在不同灌水定额条件下,玉米耗水量与灌水量基本呈现正比例关系,这与张芮等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。因此对玉米早期进行蹲苗抗旱锻炼,对其后期对水分亏缺的适应能力及产量形成均有一定促进作用。

### 2.3 不同灌水定额处理玉米产量和水分生产率

产量主要受有效穗数和穗粒数的影响,水分胁迫对产量的影响具体表现在对产量构成要素的影响,不同灌水定额处理水分胁迫下玉米产量以及产量构成要素如表 3 所示。

表 3 不同灌水定额处理条件下玉米产量构成要素

灌水定额处理	穗长/cm	秃尖长/cm	穗粗/mm	穗重/g	穗行数/行
T1	13.50	0.50	42.75	141.64	15
T2	14.00	1.50	44.53	131.06	14
T3	14.50	1.25	44.86	139.51	14
T4	13.75	1.25	45.52	164.51	13
T5	14.00	1.67	45.88	161.93	14
T6	15.33	1.17	46.39	176.63	16
T7	16.22	1.83	50.57	231.86	14
T8	17.00	1.32	50.95	265.33	16
T9	17.67	1.67	54.34	274.67	18

灌水定额处理	行粒数/粒	穗粒数/粒	百粒重/g	轴重/g	轴粗/mm
T1	28	354	33.85	20.15	23.48
T2	27	340	31.76	20.83	22.31
T3	27	369	39.26	32.92	25.68
T4	28	324	34.34	19.66	42.52
T5	24	309	34.41	18.32	23.79
T6	28	352	35.25	22.00	24.32
T7	21	482	34.46	29.89	22.99
T8	35	531	33.90	31.04	27.59
T9	33	592	34.70	29.15	26.73

由表 3 分析可知,水分对玉米产量构成要素具

有明显的影 响,并且穗长、穗粗、穗行数、穗粒数、百粒重等产量构成要素均是随着灌水定额的增大而增大,各灌水定额处理间差异显著。不同程度的水分胁迫其影响程度和影响机理并不相同,各产量构成要素的影响是各生育期阶段缺水所产生的综合效应,如不同水分胁迫对穗长的影响,最小的 T1 和最大的 T9 相差达到了 30.7%,穗粗也具有相同的规律,T1 为 42.75 mm,比 T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8、T9 分别小 4.2%、4.9%、6.5%、7.3%、8.5%、18.3%、19.2%、27.1%,差异达到显著水平,其余各指标也具有类似的规律,这是因为在拔节期、抽穗期缺水往往会造成玉米籽粒库容不足,花期提前,花丝受精能力下降,使穗粒数下降;在拔节期水分亏缺对营养生长的影响最终影响到玉米的生殖生长及产量形成,以及影响生殖生长过程中干物质向籽粒的转移,主要表现在穗粒数和百粒重。秃尖长和轴重也是影响产量的主要影响因素,由表 3 可以看出,随着灌水量的增加,穗长增加其秃尖长和轴重也跟着增大,说明玉米在生长发育过程中,缺水会造成其干物质分配不合理,源与库失衡。

不同灌水定额处理玉米产量、灌溉定额和水分利用效率如表 4 所示。

表 4 不同灌水定额处理玉米产量、灌溉定额和水分利用效率

灌水定额处理	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	灌溉定额/ (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	4409.20	2025	2.18
T2	4632.41	2430	1.91
T3	4928.31	2835	1.74
T4	5738.58	3240	1.77
T5	5438.68	3645	1.49
T6	5863.04	4045	1.44
T7	7946.00	4455	1.78
T8	8493.60	4860	1.75
T9	8611.20	5265	1.64

从表 4 可以看出,不同程度的水分胁迫对产量均有影响,并且产量随着灌水定额的增加而增加,且不同灌水定额处理下产量差异显著,T2~T9 较 T1 最终籽粒产量分别增加 5.1%、11.8%、30.2%、23.5%、33.0%、80.2%、92.6%、95.3%,产量随着灌水定额的增加而增大,但是不同灌水定额处理之间的相对增幅并不一致,T4 相对于 T3 的增幅为 14.5%,T7 相对于 T6 的增幅为 35.5%,但是 T9 相对于 T8 的增幅仅仅为 1.4%,充分说明产量并不随着灌水量呈直线增加,而是有一个产量峰值,有研究表明,当一致增加灌水量时产量函数呈现出单峰偏右函数,因此,控制合理的灌水量对提高灌溉效率和发展节水农业至关重要。

水分利用效率变化规律出现先降低,然后增加再减小的变化趋势,T6的水分利用效率最低,仅为 $1.44\text{ kg/m}^3$ 。水分生产率最高的是T1,但是T1玉米最终的经济产量仅为 $4409.2\text{ kg/hm}^2$ ,这可能与T1的灌水定额最小有关,而T9虽然其产量最高,达到 $8611.2\text{ kg/hm}^2$ ,但其水分利用效率为 $1.64\text{ kg/m}^3$ ,低于T7与T8,说明过多的灌水量不仅不能明显提高产量,而且其水分利用效率较低,因此合理的灌溉制度对于节水灌溉、提高水分利用率具有重要的意义。

### 3 结 语

灌水定额不论对土壤含水量还是玉米耗水、产量及水分利用效率均有不同程度的影响,对土壤含水量、产量及玉米耗水量基本表现为正比例关系。但是从水分利用效率的角度来看,并不是灌水量越大越好,T7水分生产率最大,取得了节水和保产双重效应。不同生育期阶段玉米对缺水的反映并不相同,有研究表明,在苗期适当缺水蹲苗将有利于后期同化物的积累,在抽穗一期-灌浆期缺水对玉米产量的影响最大,不同生育期阶段的水分亏缺对玉米产生不同生理效应,但是持续的水分胁迫对玉米产量的影响不是各生育期阶段的简单叠加,而是更为复杂的生理机制。因此,研究水分亏缺对玉米生长发育及生理机制的影响,有助于促进对玉米节水灌溉

原理和技术的认识,以及为在西北内陆干旱地区指导玉米种植和制定灌溉制度提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 康绍忠,党育和. 作物水分生产函数与经济用水灌溉制度的研究[J]. 西北水利科技,1987(1):1-11.
- [2] 菲智,崔远来,李新建. 我国南方水稻水分生产函数试验研究[J]. 水利学报,1994(9):21-31.
- [3] 王修贵,张祖莲. 作物产量对水分亏缺敏感性指标的初步研究[J]. 灌溉排水,1998,17(2):25-30.
- [4] 张强,徐飞,王荣富,等. 控制性分根交替灌溉下氮形态对番茄生长、果实产量及品质的影响[J]. 应用生态学报,2014,12(25):3547-3555.
- [5] 张艺灿,曹国勇,邹英宁. 分根交替灌溉处理根的根系形态和内源激素含量变化[J]. 贵州农业科学,2016,44(1):129-131.
- [6] 刘战东,肖俊夫,刘祖贵,等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):60-64.
- [7] 孙占祥,冯良山,杜桂娟,等. 玉米灌溉田土壤水分变化及其耗水规律研究[J]. 玉米科学,2010,18(1):99-102.
- [8] 宇宙,王勇,罗迪汉,等. 膜下滴灌条件下玉米蒸散耗水规律研究[J]. 节水灌溉,2015,34(11):56-59.
- [9] 张 芮,成自勇,李有先. 水分亏缺对膜下滴灌制种玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(2):125-128.

(收稿日期:2016-11-30 编辑:方宇彤)

(上接第30页)

灌溉是沙坡头区农业发展的必然选择,全社会必须为此做出长期而艰苦的努力。

### 参考文献:

- [1] 宁夏回族自治区农牧厅. 2003年宁夏引黄灌区农业供水形势对策及节水技术措施[R]. 银川:宁夏回族自治区农牧厅,2003.

区农牧厅,2003.

- [2] 郭浩,张林海,徐宁红,等. 农业节水灌溉科普知识[R]. 银川:宁夏回族自治区水利厅,2007.
- [3] 孙广生,乔西现,孙寿松. 黄河水资源管理[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001.

(收稿日期:2016-11-12 编辑:徐 娟)

· 简讯 ·

## 《水资源保护》主编王沛芳教授荣获国家科技进步一等奖

2017年1月9日,2016年度国家科学技术奖励大会在北京隆重举行。《水资源保护》主编王沛芳教授主持的“生态节水型灌区建设关键技术及应用”获国家科技进步一等奖。

王沛芳教授领衔的“生态节水型灌区建设关键技术及应用”研究团队针对我国农业面源污染防控和水资源节约重大需求,创建生态节水型灌区建设理论方法体系,构建节水减污和面源防控四道防线系统,发明水肥精准施用设备、便携式水质净化器等核心技术和创新装置,开发灌区智能监控管理系统,攻克灌排系统与面源防控相耦合的关键技术瓶颈,在新技术的工艺、结构、材料和装备方面取得重大原创性突破。成果广泛应用于灌区规划设计和建设运行中,取得了重大社会经济与生态环境效益。

本刊编辑部 供稿