

# 节水农业的土壤水分调控与标准研究

\*\*\*\*\*

张薇 司徒淞

(中国水稻研究所)

王和洲

(中国农业科学院农田灌溉研究所)

**提 要** 研究了节水高产的土壤水分调控理论依据,提出了小麦—夏玉米连作一体化栽培,农水措施结合后获得的水分利用效率达  $2.01 \text{ kg/m}^3$  的土壤水分调控标准,对提高水分利用效率及指导当前的节水农业实践具有现实意义。

**关键词** 节水农业 土壤水分 调控标准

## Study on Soil Moisture Regulating and Criterion for Water-Saving Agriculture

Zhang Wei Si-tu Song

(China National Rice Research Institute, Hangzhou)

Wang He-zhou

(Farm Irrigation Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences)

**Abstract** One of the important factors to accomplish water-saving high-yielding is soil moisture on farmland. It is a link to transform water resources to the amount of water taken into the plant and the production. The paper presents the theory foundation for soil moisture regulation of water-saving high-yielding and the cultivation technique to wheat-corn continuous cropping. The average water use efficiency could reach  $2.01 \text{ kg/m}^3$ .

**Key words** Water-saving agriculture Soil moisture Regulating criterion

## 1 引 言

一个合理的农田土壤水分调控和控制标准是实现提高农业用水有效性的关键。土壤水分既要保证作物高产,不产生过多的奢侈蒸腾,有较高的光合生产率,又要有较小的棵间土壤蒸发,这样才能达到节水高产,创造出较高的作物水分利用效率。为了探讨得出一个节水高产的土壤水分调控标准与范围,必须先对影响土壤水分调控标准的主要因素及其特点作一系统研究,并结合分析各因素在提高水分利用效率的地位和作用、相互之间的关系。这一标准与范围将是有充分的理论基础为依据,且在生产实践中是可行的。调控的依据主要内容有:作物耗水量特征、农田土壤水分变化特点、土壤水分与作物蒸腾强度、光合强度的关

\* 收稿日期:1996-03-18 1996-04-14 修订

\*\* “八五”国家科技攻关研究项目

\*\*\* 张薇,副研究员,杭州市体育场路 中国水稻研究所,310006

系、作物水分亏缺的允许程度。然后根据影响提高水分利用效率的诸因素及其特点,采取相应的关键农水措施,在生产实践中把水分利用效率提高到一个新的水平<sup>[1]</sup>。

1991~1995年在中国农业科学院商丘节水农业持续发展试验区,通过大田、小区、测坑、筒栽进行试验研究。试验区概况及试验方法、设备见参考文献[2]。

## 2 作物耗水量特征

在作物生长过程中,植株蒸腾量和棵间蒸发量之间存在一定的关系,田间土壤水分表面蒸发所消耗的土壤水分约占总耗水量的一半。据商丘试区试验结果<sup>[3]</sup>,小麦总耗水量多年平均为 $5975.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,由播种到返青以前,处于苗期、分蘖阶段,叶面积系数较小,麦田大部分尚未被小麦叶面覆盖,棵间蒸发大于植株蒸腾。棵间蒸发对植株是无效的水分损失,此时要加强减少棵间的土表蒸发的农业措施。植株蒸腾是小麦正常生长所必需的生理过程,每生产1个单位的干物质,需要由叶面蒸腾400~600倍的水分(即小麦的蒸腾系数),小麦植株蒸腾量约占小麦总耗水量的50%~60%。麦田的棵间蒸发随植株的生长而减少,植株蒸腾则随植株的生长而增加,并在孕穗至抽穗期间达最大值,乳熟以后逐渐减少至停止。

小麦播种出苗后,气温逐渐降低,日耗水量也逐渐下降,耗水量占总耗水量的9.9%。入冬越冬期,小麦生理活动缓慢,耗水量进一步减小,越冬至返青期耗水量占总耗水量的3.8%,日平均耗水0.46 mm。翌年春天返青以后,随着气温升高,小麦生长发育也逐渐加快,水分的消耗也随之增加,日耗水1.0 mm。其中大部分还是通过棵间蒸发损失,为防止干旱,此时需灌溉和采取土壤保墒农艺措施。拔节到抽穗,小麦进入旺盛生长时期,耗水量急剧增加,到播种后200天,即灌浆初期达到高峰,在高峰前后10天,抽穗灌浆期是需水最多时期。由于植株茎叶的覆盖,棵间蒸发大大降低,而叶面蒸腾显著增加,在一个月时间内,耗水量占总耗水量的30.4%,日耗水量达4.0 mm。此时应控制叶片奢侈蒸腾而消耗的水分。抽穗到成熟的41天时间里,耗水量占总耗水量的45.8%,日耗水量为4.4 mm,比前一阶段略有增加,尤其是在抽穗前后,茎叶迅速伸长,绿色面积达最大值。小麦产量 $4500 \sim 5250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,一般干旱年只需灌溉返青、灌浆两水,灌溉定额为 $1200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

玉米、棉花幼苗期的生长中心是根系,为了使根系发育良好,并向纵深发展,须保持表土层疏松干燥和下层土比较湿润的状况,土壤含水量可控制在田间持水量的52%~55%,为夏玉米、棉花蹲苗创造良好的条件。夏玉米、棉花不同生育期的需水规律见参考文献[3]。

## 3 农田土壤水分变化特点

作物利用的土壤水分主要在1 m深的土层以内,根据不同土层水分的作用与变化特点,把1 m土层分成三层见表1。

根据不同土层水分的特点和对作物的利用程度,在以后所阐述的土壤含水量均表示0~40 cm土层平均含水量。

据已有试验表明,土壤蒸发与土壤水分呈线性关系,即随着土壤水分的增大,土壤蒸发加大,故应根据土壤水分运动的特点而采取减少土壤水分的无效蒸发的农艺措施。

表 1 农田土壤水分变化特点(以麦田为例说明)

土壤层	土层深/cm	水分变化特点
活跃层	0~20	作物主要供水层,小麦约 60%根量分布区,耗水量多、强度大、含水量变幅大
次活跃层	20~40	补给活跃层水分,小麦根直接吸水层,变幅较大,补给来源:深层水、灌溉水、春季降水
贮存层	40~100	小麦拔节后才能用到此层水分,水分分布均匀稳定,补给来源:灌溉水、雨季降水、深层地下水

备注:作物根系活动层 1 m 深。活跃层与次活跃层的耗水量约占 1 m 土层总耗水量的 70% 以上。

#### 4 土壤水分与作物光合强度和蒸腾强度的关系

作物植株蒸腾主要受生理因素的控制和调节,随作物类型、生育期、群体结构而异。在个体层次上,叶片的水分利用效率与植物的生理活动有直接关系,它是由叶片的光合强度与蒸腾强度决定的。通过土壤水分与作物光合强度和蒸腾强度的研究,定量地探索出产生奢侈蒸腾的土壤含水量阈值,对于指导节水灌溉,合理利用降水,还为土壤-植物系统水分调控技术(如喷施抑蒸剂)的应用,减少作物奢侈蒸腾,提高水分利用效率,有着重要的作用。

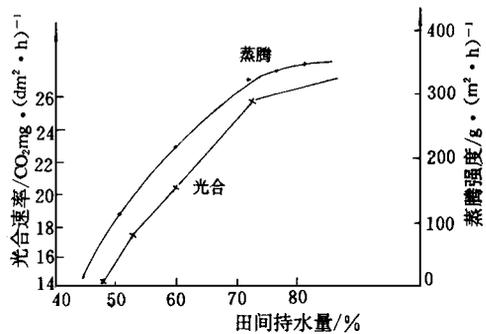


图 1 土壤含水量与小麦光合速率、蒸腾强度

在小麦拔节抽穗期,同步测定土壤含水量与光合强度、蒸腾强度的关系,绘成图 1。当土壤含水量低于田持 52% 处有低折点,曲线斜率  $t_g = 1.5$ ,曲线斜率急剧增大,表明土壤已处于干旱威胁,光合强度受到显著抑制。土壤含水量在田持 52%~72%,光合强度与土壤含水量成正比例直线增加,曲线斜率  $t_g = 1$ ,处于正常光合阶段。土壤含水量超过田持 72% 以上时,曲线斜率  $t_g = 0.3$ ,此时光合作用随土壤含水量增加的甚为平缓,也就是作为干物质累积不再随土壤含水量增加而成正比例增加。蒸腾强度与光合强度有着密切的平行关系,它们之间具有显著的相关关系,相关系数  $r = 0.9219$ ,达 1% 极显著水平。它们都依赖于太阳辐射和光能捕获,二者之间的差别主要是光合作用取决于有效辐射,而蒸腾作用与总辐射能有关。因而它们变动的趋势大致相同。蒸腾强度在土壤含水量处于 52% 时,有一低折点,随着土壤含水量增加,蒸腾量增加;超过田持 75%,蒸腾强度随土壤含水量增加而继续增大,增加强度较平缓,即已有所抑制,但作为干物质累积的“源”光合作用增加甚微;对作物水分和养分的吸收运输和对降低作物表面温度有利,对干物质的累积作用已不大,因而可认为在田持 75% 以上的土壤含水量,小麦便开始产生奢侈蒸腾。对夏玉米灌浆期测定结果和小麦相类似,在田持 78% 时产生奢侈蒸腾。对小麦及夏玉米测定结果进行积分计算,小麦与夏玉米的奢侈蒸腾量占其同期的总蒸腾量的 33% 和 24.6%。一般在灌水后或雨后土壤含水量均超过 75% 田持,应主动采用喷洒抑蒸剂(黄腐酸等)措施减少“奢侈蒸腾”。

## 5 作物对水分亏缺的允许程度

在水资源缺乏的地区,充分利用有限的灌溉水源,供应有限的水量要达到一定的产量水平或显著增产。为此,需研究作物对水分亏缺的允许程度,明确各种作物最适需水量和灌溉量下限、目标产量的必须水量以及供应水量最佳时期和方法。用最低的水量取得最大的效益。据商丘试区试验资料<sup>[3]</sup>表明,作物不同生育阶段对缺水敏感程度差异很大,把作物需水最多、对缺水最敏感时期称为作物“需水临界期”,这就为水资源不足地区在非充分供水条件下灌“关键水”提供了依据。小麦为拔节—抽穗—灌浆期,玉米为抽雄灌浆期,棉花为铃期。再从作物各生育阶段土壤干旱减产系数分析,在非充分灌溉条件下,受旱处理比对照(适宜土壤水分)皆有不同程度的减产。根据 Jensen(1988 年)公式,求出各生育阶段干旱的减产系数,其公式为

$$\frac{Y_o}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[ \frac{W_i}{W_{mi}} \right]^i$$

式中  $Y_m$ ,  $W_{mi}$ —充分灌溉条件下,小麦产量与生育阶段的耗水量;

$Y_o$ ,  $W_i$ —非充分灌溉条件下,小麦产量与生育阶段的耗水量;

$i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ —各生育阶段数;

$i(i=1, 2, 3, 4, 5)$ —分别代表播种—越冬,越冬—返青,返青—拔节,拔节—抽穗,抽穗—成熟五个生育阶段减产系数。

将试验数据代入 Jensen 公式,得出小麦各生育阶段减产系数:  $\alpha_1$ (播种—越冬):0.1156,  $\alpha_2$ (越冬—返青):0.1146,  $\alpha_3$ (返青—拔节):0.1105,  $\alpha_4$ (拔节—抽穗):0.3418,  $\alpha_5$ (抽穗—成熟):0.2454。减产系数表明,在非充分灌溉条件下,各生育阶段水分供应不足,首先是拔节—抽穗阶段干旱减产系数最多,其次是抽穗—成熟阶段,其余时期影响较小。

同样,求出夏玉米不同生育阶段土壤干旱的减产系数。  $\alpha_1$ (出苗—拔节):0.1254,  $\alpha_2$ (拔节—抽穗):0.3420,  $\alpha_3$ (抽穗—灌浆):0.2301。夏玉米在拔节—抽穗期土壤干旱对产量影响最大。

上述试验表明,作物在不同生育阶段对土壤干旱的敏感性具有较大差异,因而对水分亏缺的允许程度也不同。已往资料认定作物不同生育阶段的土壤适宜水分范围下限为田持 70%。据我们多年田间观测,作物在某些阶段,如冬小麦灌浆后期,夏玉米和棉花苗期和后期土壤水分可降至 52%~55%田持,对作物生长没有发生不利的影 响。这就可根据作物对水分的亏缺允许程度和需水临界期进行适时适量的有限灌溉以获得较高的产量,可大幅度提高水分利用效率。

## 6 节水高产的土壤水分调控标准与范围

为了减少土表蒸发与作物奢侈蒸腾,而又能节水且保持较高的产量水平,通过上述土壤水分调控理论依据的分析,只有通过农、水措施结合于一体才能使土壤水分生态环境因素和作物因素达到相互协调,作物水分利用效率得以提高。而土壤水分消耗,利用与调控后处于一个合理的消长动态过程,则是节水高产农田土壤水分环境与调控机制极其关键的环节。根据小麦—玉米连作节水高产一体化栽培试验与实践,采用间歇灌溉、覆盖秸秆技术、喷施

黄腐酸等抑蒸剂、密植等农水措施,获得了水分利用效率平均为  $2.01 \text{ kg/m}^3$  的较高水平,其土壤水分变化动态过程如图 2。从图可知,小麦生长期内约 75%~78% 时段土壤水分变化于田持的 58%~65% 范围,仅在灌溉和雨后的短时间高于 65% 田持。玉米生长期内适逢雨季,土壤水分除苗期外,约有 70%~75% 时段土壤水分变化于田持 70% 以上。因此,可以认为,小麦苗期和成熟期土壤水分下限为田持的 52%~55%,其它生育阶段为 58% 田持。土壤水分上限值,小麦、玉米在田持 72%~75%,可作为节水高产土壤水分的调控标准与范围。小麦、夏玉米产量分别为  $5250 \text{ kg/hm}^2$  和  $8250 \text{ kg/hm}^2$ ;水分利用效率达  $1.61 \text{ kg/m}^3$  和  $2.42 \text{ kg/m}^3$ 。

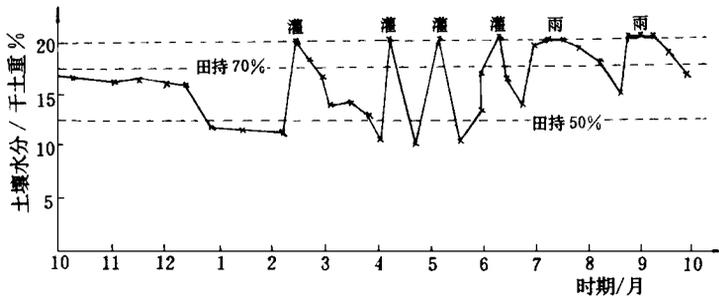


图 2 小麦—玉米连作土壤水分变化过程线(1993~1994 年)

### 参 考 文 献

- 1 司徒淞,张薇. 试论黄淮海平原的节水农业. 农田水利与小水电,1995(3):10~14
- 2 司徒淞,张薇,王和洲等. 间歇灌溉田间试验及节水机理. 农业工程学报,1994,10(增刊):117~121
- 3 贾大林,司徒淞. 节水农业与区域治理. 北京:中国农业科技出版社,1992