

# 水稻节水灌溉及其对环境的影响

茆智

(武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

**[摘要]** 水稻是中国最主要的粮食作物之一, 其产量约占粮食作物总产量的40%; 在全国约 $1.1 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>的粮食作物总面积中, 稻田面积约占28%。20世纪80年代以来, 水稻产区的水资源短缺已成为当地农业生产中的重要问题, 各地试验、开发、应用与推广了许多种水稻节水灌溉模式。文章根据这些新的水稻灌溉模式试验结果与推广经验, 将我国水稻节水灌溉主要模式归纳为浅、湿、晒结合, 间歇淹水, 半旱栽培和蓄雨型等4类。阐述了这些模式的田间水分控制标准以及节水、增产和提高水分生产率潜力; 提出了该4类模式的选择原则以及应用这些模式时应注意的问题; 分析、讨论了推广这些模式能够持续节水与提高水分生产率的机理以及对环境的影响。

**[关键词]** 水稻; 节水灌溉; 灌溉模式; 节水潜力; 环境影响

**[中图分类号]** S274.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)07-0008-09

水稻是我国主要粮食作物之一, 全国水稻产量约占粮食作物总产量的40%, 稻田面积约占全国粮食作物总面积的28%<sup>[1]</sup>。我国水稻小部分分布在北方(淮河-秦岭-白龙江以北), 虽然所占比重不大, 但绝对面积达数百万公顷, 不容忽视。北方稻区处于干旱半干旱地区, 水资源不足, 水量供需矛盾日益严重, 甚至有些地区由于缺水而难以维持继续种植。全国大部分稻田分布在南方, 在该区域, 水稻的灌溉用水量占总灌溉用水量的90%以上, 虽然南方降水及水资源比北方丰富, 但由于降水在年际、特别是年内分布极不均匀, 水资源在地区间的分布亦不均匀, 南方每个省(自治区)都有成百万亩的稻田水源不足, 加之工业、城镇及乡村生活用水的急剧增长, 缺水问题也日益突出。因此, 无论北方和南方, 推行水稻节水灌溉, 挖掘水稻地区农业节水潜力, 对促进当地农业生产乃至国民经济的发展有着十分重要的意义。

## 1 水稻节水灌溉模式

所谓水稻灌溉模式, 系通过灌溉与排水, 使水

稻田间在不同阶段形成的水分状态, 以及不同阶段内有水层时灌前最低水深、灌后最高水深和雨后允许的极限水深, 无水层时灌前最低土壤含水率, 或者露田或落干(无水层)天数、晒田天数等相应的控制标准。灌溉模式不同, 灌溉制度(灌水次数、时间、定额与灌溉定额)亦不同, 灌溉模式对水稻产量以及水土环境亦有显著的影响。

在我国1990年颁布的全国《灌溉试验规范》中, 对于稻田田间水分状况一些术语的含义, 提出了以下标准: 深水——水深大于60 mm; 浅水——水深为10~60 mm; 湿润——水稻根层土壤含水率为饱和含水率的80%至田面10 mm水深; 晒田——根层土壤含水率低于饱和含水率的80%<sup>[2]</sup>。

根据我国多年的试验研究与实践, 符合水稻节水、丰产的田间水分控制方式, 基本可归纳为以下4类模式<sup>[3,4]</sup>。亚洲许多国家的实践与试验结果也与此类似。

### 1.1 “浅、湿、晒”模式

该模式是我国应用地域最广, 时间较久的节水

灌溉模式，如广西壮族自治区大面积推广的“薄、浅、湿、晒”灌溉，北方推广的“浅湿”灌溉等。

作为示例，表 1 列出广西壮族自治区推广的“薄、浅、湿、晒”模式田间水分控制标准<sup>[3~5]</sup>。

北方地区（辽宁等省）所采用浅湿灌溉的田间水分控制标准为：插秧和返青期浅水，保持 30~

50 mm 浅水层；分蘖前期、拔节孕穗期、抽穗开花期浅湿交替，每次灌水 30~50 mm，至田面无水层时再灌水；分蘖后期晒田；乳熟期浅、湿、干、晒交替，灌水后水层深为 10~20 mm，至土壤含水率降到田间持水率的 80% 左右再灌水；黄熟期停水，自然落干。

表 1 浅湿晒模式田间水分标准（广西）

mm

Table 1 Standards of field water control with SWD (Guangxi)

生育阶段	插秧	返青	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗抽穗开花	乳熟	黄熟
灌前下限	15	20	0.90 $\omega_b$	0.6 $\omega_b$	10	0.9 $\omega_b$	0.5 $\omega_b$
灌后上限	20	40	10	20	40	10	0
雨极限	20	50	40	40	70	50	0
田间水分状态	浅水	浅水	湿润	浅、干、晒	浅水	湿润	干、晒

注： $\omega_b$  为土壤饱和含水率/%

### 1.2 “间歇淹水”模式

我国北方以及南方的湖北、安徽、浙江等省成功地采用了这种模式<sup>[3,4,6]</sup>。其水分控制方式为：返青期保持 20~60 mm 水层，分蘖后期晒田（晒田方法如浅、湿、晒模式），黄熟落干，其余时间采取浅水层、干露（无水层）相间的灌溉方式。依据不同的土壤、地下水位、天气条件和禾苗长势与生育阶段，可分别采用重度间歇淹水和轻度间歇淹水。重度间歇淹水，一般每 7~9 d 灌水一次，每次灌水 50~70 mm，使田面形成 20~40 mm 水层，

自然落干，大致是有水层 4~5 d，无水层 3~4 d，反复交替，灌前土壤含水率不低于田间持水率的 85%~90%；轻度间歇淹水，一般每 4~6 d 灌水一次，每次灌水 30~50 mm，使田面形成 15~20 mm 水层，有水层 2~3 d，无水层 2~3 d，灌前土壤含水率不低于田间持水率的 90%~95%，这种轻度间歇淹水方式，接近于湿润灌溉。浙江省推广的“薄露灌溉”与“轻度间歇淹水”的模式类似。作为示例，表 2 列出安徽省推广的间歇淹水模式田间水分标准。

表 2 间歇淹水模式田间水分标准（安徽）

Table 2 Standards of field water control with AWD (Anhui)

生育阶段	返青	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗	抽穗开花	乳熟	黄熟初期	黄熟中后期
灌前下限（占土壤饱和含水率的百分数）/%	100	85	65~70	90	90	85	65	50
灌后上限/mm	10~20	40	40	60	60	40	0	0
雨极限/mm	30	50	60	100	100	50	0	0
间歇脱水天数/d	0	3~5	4~7	1~3	1~3	3~5	全期	全期

### 1.3 “半旱栽培”模式

近年来通过对水稻需水规律和节水高产机理等进行系统的试验研究，提出了高效节水的“半旱栽培”模式。对这类灌溉模式，在山东济宁市也称为控制灌溉<sup>[3,4,7]</sup>（表 3），在湖南永州市称为控水灌

溉，在广西玉林地区称为水插旱管，等等，并已在这些地方成万亩甚至数百万亩的推广。这一模式与前述两类模式有较大差别，除在返青期建立水层，或是返青与分蘖前期建立水层外，其余时间则不建立水层。

表 3 半旱栽培模式田间水分标准 (山东)

mm

Table 3 Standards of field water control with SDC (Shandong)

生育阶段	插秧	返青	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗抽穗开花	乳熟及黄熟初期	黄熟中后期
灌前下限	5	15	0	0.7 $\omega_b$	0.75 $\omega_b$	0.7 $\omega_b$	0.5 $\omega_b$
灌后上限	15	30	30	0	0	0	0
雨后极限	20	50	50	20	30	30	0
田间水分状态	浅水	浅水	浅水	无水层	无水层	无水层	干、晒

注:  $\omega_b$  为土壤饱和含水率 / %

1.4 蓄雨型节水灌溉模式

为了充分地利用降雨,在不影响水稻高产的前提下,尽可能多蓄雨水,以提高降雨利用率。各地推广上述浅湿晒、间歇淹水和半旱栽培等类节水模式的农田中,也同时采用了蓄雨型模式。其要点是:平时可按上述各种节水灌溉模式进行灌溉,若遇降雨,不仅是当成一次灌水,而且对于雨水形成的水层,可以超出灌溉水层上限的标准。这不仅减少灌水量,而且也减轻排水负担。一般,在水稻生长的前期(返青、分蘖前期)和后期(乳熟期),宜浅蓄,雨后水深可超出灌溉水层上限 20~30 mm,而中期(拔节孕穗抽穗开花期)可多蓄,雨

后水深可超出灌溉水层上限 30~50 mm<sup>[3,4]</sup>。根据福建省、湖北省等地经验,这种少灌多蓄的灌溉模式,降水利用率可提高 10%~20%,节水约 10%~15%。由于只是在雨后多蓄,并非长期淹水,仍保持湿润、露田、晒田的条件,对水稻生育和产量并无明显影响。

各类灌溉模式的田间水分状态变化过程与控制标准的示意图如图 1。

此外,近来安徽、浙江等省还试验研究与初步推广了全旱栽培(无水层灌溉)模式,取得丰产与高效节水的效果。值得在进一步试验研究的基础上,因地制宜地推广、应用。

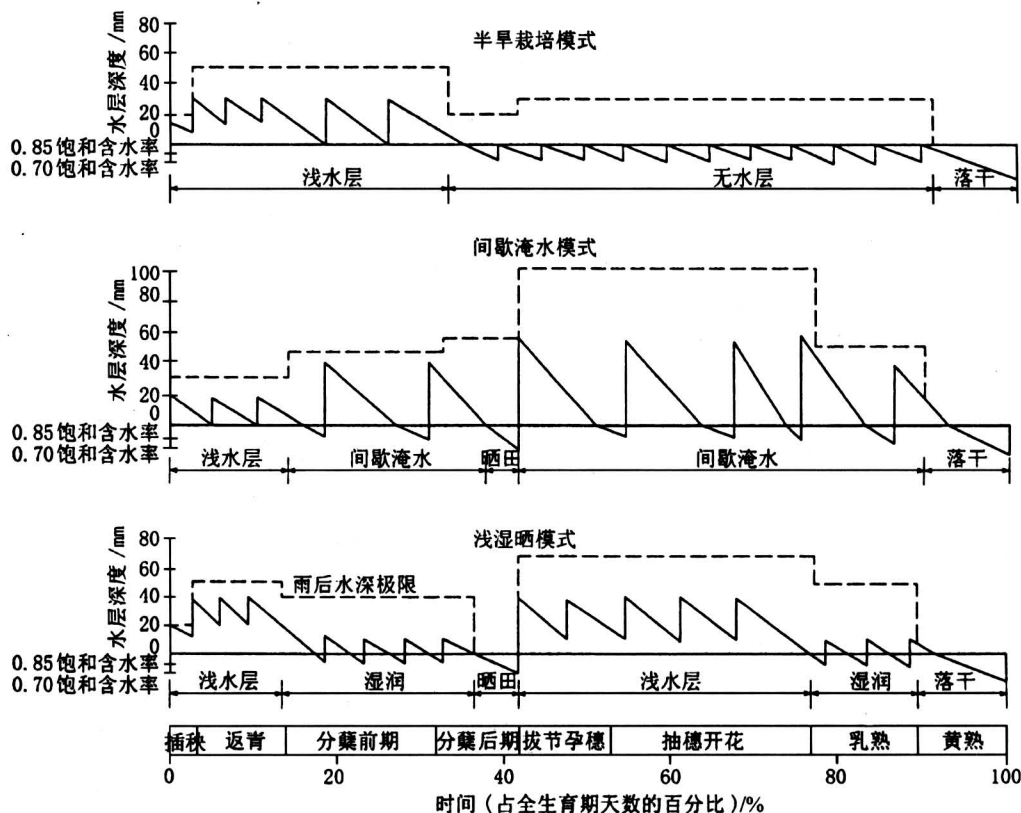


图 1 不同灌水模式田间水分状态及其控制标准示意图

Fig.1 Sketch diagram of variation process and standards of field water control with different irrigation regimes

## 2 水稻节水灌溉模式的田间节水潜力

### 2.1 不同灌溉模式的灌溉用水量及节水量

根据 15 个省、自治区的试验与调查成果，与传统的长期淹灌模式相比，浅湿晒、间歇淹水与半旱栽培模式的灌溉用水量可降低 8%~19%、13%~25% 与 30%~50%。湖北荆门、广西桂林和浙江杭州的试验成果<sup>[3,4,8,9]</sup>见表 4、表 5 和表 6。

表 4 中稻不同灌溉模式净灌溉定额对比  
(湖北荆门)  $\text{m}^3/\text{hm}^2$

Table 4 Net irrigation water use for mid-rice with different irrigation regimes (Jingmen, Hubei)

年份	长期淹灌 灌水量	间歇淹水 灌水量	间歇淹水 节水量	节水百分比 /%
1998	5 850	3 900	1 950	33.3
1999	8 850	7 425	1 425	16.1
2000	6 228	5 081	1 147	18.4
3年平均	6 976	5 469	1 507	21.6

表 5 不同灌溉模式净灌溉定额 (广西桂林,  
1996—1999 年平均)  $\text{m}^3/\text{hm}^2$

Table 5 Net irrigation water use with different irrigation regimes (Guilin, Guangxi, average values in 1996 - 1999)

稻别	长期淹灌	薄浅湿晒	间歇淹水
早稻	3 252	3 098	2 622
晚稻	6 419	5 787	5 622
全年 (早稻 + 晚稻)	9 671	8 885	8 244
全年百分比/%	100	91.9	85.2

表 6 不同灌溉模式净灌溉定额  
(杭州, 1998)  $\text{m}^3/\text{hm}^2$

Table 6 Net irrigation water use with different irrigation regimes (Hangzhou, 1998)

稻别	项目	长期淹灌	浅湿晒	半旱栽培
早稻	灌溉定额	2 607	2 205	1 645
	百分比/%	100	84.6	63.1
晚稻	灌溉定额	3 765	3 195	2 499
	百分比/%	100	84.9	66.4
全年 (早稻 + 晚稻)	灌溉定额	6 372	5 400	4 144
	百分比/%	100	84.7	65.0

### 2.2 不同灌溉模式下水稻产量与水分生产率

表 7 与表 8 为一些试验站在不同灌溉模式下的水稻产量与水的生产率成果<sup>[3,4,8,9]</sup>。水生产率归为两种：耗水生产率  $WP_1$ ——单位耗水量所获产量；灌溉水生产率  $WP_2$ ——单位净灌水量所获产量。这些成果表明，采用节水灌溉模式，能促进水稻少量 (10% 以下) 的增产，但由于节水幅度大，水的生产率显著提高： $WP_1$  与  $WP_2$  可以分别提高 14%~56% 与 13%~69%。我国其他一些地方的试验与调查结果表明，在不同的节水模式下，一般， $WP_1$  与  $WP_2$  可分别提高 20%~30% 与 30%~50%。

## 3 节水灌溉模式的选择及推广中应注意的问题

1) 水稻各种节水灌溉模式，有以下几点共性：返青期保持薄水层，分蘖后期晒田，黄熟落干断水，其余生育阶段避免长期连续淹水，特别是避免 60 mm 以上的深水；经常露田或晒田，但土壤含水率不低于田间持水率的 70%，低于田间持水率 80% 的连续历时不超过 3~4 d。但是，不同灌溉模式的具体淹水、露田、落干时期与程度 (标准) 不同，应根据土壤质地与肥力、地势、地下水埋深、气象、水稻品种、稻禾生长情况以及水源条件等因地制宜地选用。一般，土壤质地为粘土或壤土，肥力较高，地下水位较高的平原地区，宜采用重度间歇淹水模式，或浅湿晒模式，但有水层时水层较浅，湿润的历时较长，分蘖末期重晒；相反，可用轻度间歇淹水模式，或用浅湿晒模式但水层稍深，湿润历时较短，分蘖末期轻晒。以上两种条件下，也均可以采用半旱栽培模式。水源缺乏的灌区，在采用这些模式时，结合采用蓄雨模式，降雨后在允许范围内存蓄雨水。

2) 对于特殊类型稻田应采用一些特殊灌溉方式。如对盐渍型稻田，灌溉水除满足水稻生理需水外，还要利用水的下渗以压盐，并防止返盐，故要求长期淹灌<sup>[10]</sup>。对于冷浸型稻田，为有利于解决其长期土壤过湿、通气不足、水温土温低和有毒物质积累的问题，应在田间排水的基础上，采用间歇淹水模式，但每一灌水周期内的淹水天数短些，干、露、晒的无水层天数长些，或者，采用半旱栽培模式，以改善土壤通气性，提高水温、土温。

表7 不同灌溉模式下的水稻产量

kg/hm<sup>2</sup>

Table 7 Rice yields with different irrigation regimes

地点	年份	稻类	产量			
			长期淹灌	浅湿晒	间歇淹水	半旱栽培
湖北 荆门	1997	中稻	9 969		9 455	
	1998	中稻	7 769		8 790	
	2年平均值	中稻	8 869		9 123	
	平均值的百分比/%	中稻	100		1 02.9	
广西 桂林	1997	早稻	6 050	6 147	6 251	
	1997	晚稻	4 335	4 424	4 380	
	1998	早稻	5 766	5 772	5 919	
	1998	晚稻	7 484	7 970	7 995	
	4年·季平均值	早稻及晚稻	5 909	6 078	6 136	
	平均值的百分比/%	早稻及晚稻	100	1 02.9	1 03.8	
浙江 杭州	1998	早稻	6 075	6 306		6 746
	1998	晚稻	6 363	6 326		6 746
	两季平均值	早稻及晚稻	6 219	6 316		6 746
	平均值的百分比/%	早稻及晚稻	100	101.6		108.5

表8 不同灌水模式下田间水分生产率

kg/hm<sup>2</sup>

Table 8 Field water productivity with different irrigation regimes

地点	年份	稻类	WP <sub>1</sub>				WP <sub>2</sub>			
			长期淹灌	浅湿晒	间歇淹水	半旱栽培	长期淹灌	浅湿晒	间歇淹水	半旱栽培
湖北 荆门	1997	中稻	1.022		1.017		1.588		1.784	
	1998	中稻	0.856		1.122		1.328		2.254	
	2年平均值	中稻	0.939		1.070		1.458		2.019	
	平均值的百分比/%	中稻	100		114		100		138.5	
广西 桂林	1997	早稻	0.85	1.05	1.20		2.53	2.81	3.50	
	1997	晚稻	0.40	0.45	0.52		0.54	0.56	0.59	
	1998	早稻	0.87	0.88	1.18		2.10	2.37	2.45	
	1998	晚稻	0.51	0.61	0.57		1.11	1.34	1.26	
	4年·季平均值	早稻及晚稻	0.66	0.75	0.87		1.57	1.77	1.95	
	平均值的百分比/%	早稻及晚稻	100	114	132		100	113	124	
浙江 杭州	1998	早稻	1.168	1.371		1.775	2.33	2.86	4.10	
	1998	晚稻	0.994	1.169		1.599	1.69	1.98	2.70	
	两季平均值	早稻及晚稻	1.081	1.270		1.687	2.01	2.42	3.40	
	平均值的百分比/%	早稻及晚稻	100	117.5		156.1	100	120.4	169.2	

3) 推广节水灌溉模式,特别是推广间歇淹水、半旱栽培模式,由于田间无水层的时间较长,对稻

田水土环境有较大改变,须注意并防治其带来的不利影响。与深水条件相比,土壤干干湿湿条件下养

分挥发损失加大,宜用多次追肥来降低这种影响<sup>[11]</sup>。此外,要注意解决的主要问题还有:防草除草,在无水层条件下的追肥、补肥,防低温或高温危害等。特别是在气温低于12℃时或遇到寒露风时,要及时灌水,保持适当水层,加大农田热容量,防止因土温过低而影响稻禾生长;在气温高于35℃时,也要及时回灌,防止田间高温危害稻禾生长以及防治鼠害等<sup>[3,4,10]</sup>。

#### 4 节水灌溉模式的节水机理

稻田的水分消耗为蒸腾、棵间蒸发与渗漏三部分,除轻壤土等渗漏量特高的稻田外,一般蒸腾、棵间蒸发与渗漏约占总耗水量的40%~50%,15%~25%与25%~40%。

根据水稻水分生理特性,正常的蒸腾是水稻生育所需,它可促进光合作用,并由于蒸发的耗热降温,起到避免炎夏时叶温过高等作用。根据国内外近年观测研究结果,稻田短期(3~4 d以内)受到轻微干旱(土壤含水率为田间持水率的70%~80%),当时的蒸腾量与生长速率降低,但复水后可以恢复,甚至出现生长速率更高的“反弹”现象<sup>[12]</sup>,结果是:全生育期蒸腾下降约15%以内,一般不影响水稻的生育与产量;下降约20%,无显著影响;继续下降,则影响较大。节水灌溉,通过土壤含水率短期低于田间持水率80%,稍长时间低于持水率85%或90%,蒸腾量将降低。据一些地区观测,一般的节水灌溉模式,全生育期蒸腾量的降低值为10%~15%,用半旱栽培,可降低15%~20%。

棵间蒸发非水稻生理所需,可以在水稻耐旱性允许的限度内借以降低土壤水分以尽量减少棵间蒸发。控制土壤水分后,表土层含水率下降速率比根层土壤平均含水率下降速率快,土壤平均含水率为田间持水率的80%~90%时,0~5 cm表土层的含水率已在持水率的50%~60%以下,导致棵间蒸发降低率大于蒸腾降低率。据试验,在不影响水稻生育与产量条件下,节水灌溉可使棵间蒸发下降25%~35%。

在长期淹灌条件下,一定的稻田渗漏量可增加土壤含氧量,改善土壤通气状况,但是,露田、晒田的效果更好,浅水时因渗漏水量随渗漏水头的降低而降低;土壤含水率从饱和含水率(无水层)降到田间持水率阶段,渗漏量大降低;降到田间

持水率以下时,不产生渗漏。此三种情况的结果是大幅度降低全生育期渗漏量。据观测试验,对于平原地区的轻粘土、重壤土和中壤土稻田,采用浅湿晒和间歇灌溉模式可减少渗漏量30%~40%,采用半旱栽培模式可降低50%~70%;土壤透水性愈强,地下水埋深愈大,渗漏量降低的绝对值愈大<sup>[3,4]</sup>。

据以上分析,稻田的节水潜力,主要是降低渗漏量,一般可减少30%~40%,高的可达60%~70%;其次是降低棵间蒸发量,一般可减少25%~35%;蒸腾量降低最少,一般降低15%左右。总耗水量可以降低20%~35%。加上节水灌溉提高降雨利用率的作用,故一般条件下,采用节水灌溉模式,田间灌溉水量可减少25%~45%。在我国南方与北方,均有许多因采用节水灌溉模式将稻田净灌溉定额(3 000~7 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)降低30%~50%的实例。

采用水稻节水灌溉模式,不必新增大量的工程投资,节水效果好,田间节水后输配水的损失亦相应减少,应成为水稻灌区大力推行的节水灌溉措施。

稻田的灌溉用水,还包括泡田用水与秧田用水,因此,对于水稻节水灌溉,还应采取精细犁耙、多蓄雨水、缩短泡田天数等措施以节省泡田用水;也要采取有利于秧苗生育和节水的灌排措施。

#### 5 节水灌溉模式的高产机理

水稻属湿生类作物,具有喜湿、耐水、不耐旱的特性,由于具有从叶片通过叶鞘、茎节达根部的通气腔,能在淹水下生活。水稻田须保持较高的土壤含水率,一般,除成熟期外,土壤含水率不得低于田间持水率的70%,低于田间持水率80%的连续时间不能超过3~4 d<sup>[3,4]</sup>。另一方面,水稻并非水生作物,它与其他大田作物一样,要有良好的土壤通气条件才能使根系生育良好,土壤中微生物活动与有机物质的分解正常;长期淹水,影响水稻生长以致减产。采用上述节水灌溉模式,就是巧妙地安排稻田淹、干、湿、晒的时间与程度,既满足水稻对田间水分和耐湿不耐旱的要求,又可使土壤有良好的透气性和充足的氧气,协调好此两方面的矛盾,协调好水、肥、气、热的矛盾,为水稻生长发育创造良好条件。

田间充沛的水分是水稻光合作用的重要条件,



根据中国科学院植物生理研究所的试验研究结果,“当根层土壤水分保持在田间持水率 80% 以上时,稻禾的光合作用不会受影响”<sup>[3,4,12]</sup>。上述各类节水灌溉模式,除分蘖末期晒田与黄熟后期落干使土壤水分短期低于此标准外,其余时期土壤含水率均在此标准以上,不会影响光合作用,从而不影响正常生长;全生育期内大部分时期土壤含水率在田间持水率以上,有些阶段保持浅水层或湿润(饱和),满足了水稻喜湿的特性。

各种节水灌溉模式,在全生育期内采用露田、晒田方式避免土壤长期处于淹水和饱和状态,而有数次和一定的时间使土壤水分低于饱和含水率,可提高土壤透气性,增加土壤含氧量。据江苏省常熟水利科研所观测,采用浅、湿、晒模式的稻田,其氧化还原电位值比长期浅水淹灌的高 26~110 mV<sup>[3,4]</sup>。良好的透气性可促进水稻根系的生育,增强根系的活力。土壤的适度缺水,由于水稻的自身反馈调节能力,根系下扎,根数增加,根表面的吸附面积增加,根系活力亦增强。据广西桂林市农田灌溉试验中心站等处的观测,各类节水灌溉模式的根层深度比长期淹灌的深 10~20 cm,吸收能力最强的白根量比长期深水淹灌高出约 1 倍<sup>[12]</sup>。根系发育好、活力强,能为稻株生长发育吸收更多的水分和养分,具有明显的丰产优势。土壤透气性好有利于有机质的分解和根系吸收,也促进土壤微生物活动。据长沙灌溉试验站测定,采用轻度间歇淹水模式与长期淹灌相比,早稻田耕层中氨化细菌高 26 倍,有机磷细菌高 6 倍,纤维分解细菌高 10 倍,其他好气细菌均增加<sup>[13]</sup>;晚稻田增加也很显著。这些菌类大量增加,对有机质转化有重要影

响,从而显著地提高土壤肥力。透气性好,还可避免有毒物质积累。浅、湿、干交替的土壤环境,增大昼夜温差,生育期内积温升高,有利于稻株分蘖早、分蘖快。分蘖末期的晒田,可抑制无效分蘖。以上各种作用的结果是:单位面积穗数、穗平均实粒数及千粒重均增加,这就构成了高产的基础。各类节水灌溉模式均避免长期淹深水,可提高秸秆充实率,抗倒伏性能较好。因此,采用节水灌溉与长期深水淹灌相比,一般能增产 5%~10%。在我国南方与北方,均有许多因采用水稻节水灌溉模式将稻谷产量在 7 500~9 000 kg/hm<sup>2</sup>基础上提高 5%~10% 的实例。

## 6 水稻节水灌溉的环境影响

### 6.1 减轻水土污染

溶解于水中的养分会随稻田垂直渗漏而流入地下水,随旁渗而由排水排至容泄区。若渗漏水量减少,进入地下水与容泄区的养分亦减少。据广西桂林灌溉试验站测坑中不同渗漏量条件下养分流失的观测结果<sup>[14]</sup>(表 9),渗漏量减少 50% (由 6 mm/d 减少到 3 mm/d),氮肥(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)在水稻全生育期内流失量减少约 36%,磷肥(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)流失量减少约 58%。采用节水灌溉模式,与长期淹灌相比,稻田渗漏量约降低 30%~70%,氮肥、磷肥流失大幅度减少。据桂林试验站 1996 年观测,与长期淹水模式相比,用薄浅湿晒模式和间歇淹水模式,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 流失量分别减少了 27.7% 和 21.4%。养分流失特别是氮、磷肥流失的大幅度减少,不仅提高了肥料利用率,有利于高产,而且减轻对地下水、容泄区水体及土壤的污染。

表 9 晚稻田两种渗漏强度下养分流失量过程(广西桂林)

Table 9 Processes of fertilizer losses with two percolation rates from late rice fields (Guilin, Guangxi, 1992)

养分类型	渗漏强度 /mm·d <sup>-1</sup>	随渗漏水流失的养分数量/mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup>														
		8月				9月				10月		13次平均				
		10日	14日	18日	21日	5日	9日	14日	18日	21日	24日	1日	7日	11日	数值	百分比
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (氮肥)	3	9.6	10.5	9.1	11.9	8.7	8.6	9.3	8.7	10.4	9.4	10.4	9.2	9.4	9.63	63.9
	6	17.9	18.4	16.9	18.2	14.8	13.1	13.1	15.8	12.6	15.0	14.6	15.0	10.7	15.08	100
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (磷肥)	3	1.1	1.1	0.9	1.3	0.9	1.2	0.2	0.7	0.5	1.0	1.0	1.2	0.9	0.92	42.4
	6	4.9	3.2	3.9	3.2	1.6	2.1	0.9	1.2	1.3	1.6	1.3	2.2	0.8	2.17	100

### 6.2 提高土壤透气性

根据湖南、湖北、江苏与广西 4 省、自治区 7 个灌溉试验站的观测成果<sup>[3,4,5,8,11,12]</sup>,长期淹灌,

地下水位基本上长期维持在地表,采用节水灌溉模式,无水层阶段地下水位可降至地表以下 0.3~0.8 m,节水灌溉稻田土壤氧化还原电位提高

120%~200%，亦即节水灌溉条件下土壤氧气含量显著提高，从而土壤微生物活动增强，土壤透气性高，有毒物质减少，为水稻根系生育创造了良好土壤环境，有利于水稻生长发育。

### 6.3 改善田间小气候

根据上述7个灌溉试验站的观测资料<sup>[12]</sup>，与长期淹灌相比，采用节水灌溉模式稻田株间空气昼

夜温差可提高1~3℃，株间空气湿度降低1~5个百分点。广西玉林灌溉试验站对不同灌溉模式下农田小气候的观测数据(表10)<sup>[14]</sup>表明，节水灌溉对小气候的影响，在晴天中午比较明显。节水灌溉条件下的小气候有利于水稻生育和减轻病虫害与冷湿危害。

表10 水稻株高2/3处稻田的气温与相对湿度(广西玉林, 1992)

Table 10 Air temperature and relative humidity on rice fields at 2/3 of the stem height (Yulin, Guangxi, 1992)

观测日期(天气类型)		6月6日(阴)				6月9日(晴)			
观测时刻		8时	14时	20时	平均	8时	14时	20时	平均
气温℃	半旱栽培	26.0	28.8	26.2	27.0	24.7	28.0	25.1	25.9
	长期淹灌	26.1	27.2	26.1	26.5	24.0	26.8	25.0	25.3
相对湿度/%	半旱栽培	96	93	96	95	92	85	85	87
	长期淹灌	96	96	96	96	96	89	84	90

### 6.4 减轻水稻病虫害

节水灌溉对稻田小气候的影响——提高株间昼夜温差和降低株间空气湿度，有利于减轻水稻病虫害。表11列出广西玉林农业气象站对不同灌溉模

式下稻田的病虫害的调查结果<sup>[15]</sup>。表11中数据表明，在半旱栽培条件下，病虫害显著减轻，从而治理病虫害的农药用量可显著减少，稻田的水土环境污染程度亦可显著减轻。

表11 稻田病虫害调查成果(广西玉林, 1990年)

Table 11 Investigation results of the disease and insect pests for rice field (Yulin, Guangxi, 1990)

稻类		早稻						晚稻		
调查日期		6月1日			6月28日			9月15日		
病虫害称		稻纹枯病			稻飞虱			稻卷叶虫		
项目	调查总苑数	病害苑数	%	调查总苑数	虫害苑数	%	调查总苑数	虫害苑数	%	
半旱栽培	96	20	21	42	8	19	602	64	10.6	
长期淹灌	206	93	45	82	53	65	595	482	81	

## 7 结论

1) 我国已探索并推广了许多种水稻节水灌溉模式，这些模式基本上可归纳为浅湿晒、间歇淹水、半旱栽培与蓄雨型等几类。针对不同的土壤、肥力、地下水水位等条件，选用适宜的节水灌溉模式，均可以取得高产与大幅度节水的效果。

2) 与传统的长期淹水灌溉模式相比，采用不同的节水灌溉模式，田间节水率可达8%~50%，一般为20%~30%；增产率达2%~10%，一般为3%~5%；灌溉水的生产率可提高13%~70%，一般为20%~40%。表明水稻灌溉模式的改革具

有显著的节水潜力。

3) 稻田的节水潜力，主要是降低渗漏量，一般可减少30%~40%，高的可达60%~70%；其次是降低棵间蒸发量，一般可减少25%~35%；最少的部分是降低蒸腾量，一般降低10%~15%；对降雨的利用量可提高5%~10%。

4) 采用节水灌溉模式，可显著地减轻稻田水土环境污染，特别是减轻氮、磷污染，提高土壤透气性，增加土壤含氧量，大幅度地增加好气微生物含量，减轻土壤有毒物质积累，提高田间昼夜气温差，降低田间空气湿度，减轻病虫害。以上均为有利于农业可持续发展与人们生活的正面环境影响。



## 参考文献

- [1] 中国农业年鉴编委会. 中国农业年鉴——2000年[J]. 北京: 中国农业出版社, 2001, 264
- [2] 水利部农村水土保持司. 灌溉实验规范(中华人民共和国水利水电行业标准 SL13-90)[S]. 北京: 水利电力出版社, 1990, 19
- [3] 茆智. 水稻节水灌溉[J]. 中国农村水利水电, 1997, (4): 45~47
- [4] 茆智, 许志方. 水稻节水灌溉技术[M]. 节水灌溉技术, 北京: 中国中央电视台出版社, 1998
- [5] 吴锡瑾. 广西千万亩水稻节水灌溉技术[J]. 中国农村水利水电, 1996, (11): 6~9
- [6] Wang Guiting. Techniques of shallow-exposed irrigation of rice and its popularization [A]. Xu Zhifang. Proceedings of international symposium on water saving irrigation for paddy rice[C]. Beijing, CNCID, 1999. 47~53
- [7] 彭世彰, 俞双恩, 张汉松, 等. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1997. 18~41
- [8] Li Y H, Dong B, Yu F, et al. Improved irrigation management of paddy fields for sustainable increases in water productivity [A]. Andre Musy. Proceedings of emerging technologies for sustainable land use and water management [C]. Lausanne (switzerland): EPFL, 1999. 311~323
- [9] Zhang Wei, Si Tusong, Jin Qianyu, et al. Study on regulation indexes of water-saving irrigation-drainage technique for paddy rice [A]. Xu Zhifang. Proceedings of international symposium on water saving irrigation for paddy rice [C]. Beijing, CNCID, 1999. 118~123
- [10] 国家科委社会发展科技司, 水利部科技教育司, 农业部科技教育司, 等. 农业节水技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992
- [11] Cui Y L, Li H Y, Yu F. Optimum model of water and nitrogen management for paddy rice [A]. Proceeding of first Asian regional conference on agriculture, water and environment [C]. Seoul, Korea, KCID, 2001. C1~10
- [12] 茆智, 张明柱, 李远华, 等. 水稻水分生长函数几稻田非充分灌溉原理研究[R]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1995
- [13] 何顺之. 灌溉对生态环境的影响[J]. 农田水利与小水电, 1993, (10): 44~48
- [14] Mao Zhi. Environment impact of watre-saving irrigation for rice [A]. M Smith. Irrigation scheduling: from theory to practice [C]. Rome: FAO water reports No. 8, 1996. 141~145
- [15] 张业芳. 推广水稻节水灌溉技术对病虫害影响的调查 [A]. 沈逸先. 广西自治区水稻节水灌溉技术研讨会论文集 [C], 广西玉林市, 1993. 28~35

## Water Saving Irrigation for Rice and Its Effect on Environment

Mao Zhi

(College of Hydraulic and Hydro-Power Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[Abstract] Rice is one of the most important food crops contributing about 40% of the total food grain production in China. Out of about 110 million hectares of area sown food crops, 28% is covered by rice. Since 1980s, the shortage of water resources has become an important problem for agricultural production in rice planing areas and many water saving regimes for rice have been tested, advanced, applied and spread in different regions of China. In this paper, based on the results of experiment and the experience of spread of these new irrigation regimes, the following four main kinds of water saving irrigation regimes in China have been classified viz. (1) combining shallow water depth with "wetting" and "dry" (SWD), (2) alternate wetting and drying (AWD), (3) semi-dry cultivation (SDC) and (4) rainwater storage (RS). The standards of field water control and potential of saving water, increasing rice yield and water productivity of these regimes are introduced and explained. The selection and attention points of application for the four regimes are presented and the causes of sustainable saving water and increase in water productivity and the environmental impacts by adopting these regimes are analyzed and discussed.

[Key words] rice; water saving irrigation; irrigation regime; potential of water-saving; enviromental impact