

Regulated Deficit Irrigation and Its Several Problems in Practical Use

Huanjie Cai Shaozhong Kang

*Prof., College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest Agriculture University,
Yangling, Shaanxi, P.R. China 712100*

Abstract

Regulated Deficit Irrigation (RDI) is one of the most important measures for the water-saving and high yield of crops. RDI is based on the crop and water relations. The theories of RDI were analyzed using the experiment data in Shaanxi and Gansu Province. There are several problems of RDI in practical use, which include: the uncertainty of crop-water relations, the proper growth stages and water deficit degree of RDI applied, and the requirements of RDI to irrigation system and irrigation techniques.

Key words: Regulated deficit irrigation, Water deficit, crop water relations

1. Introduction

Water shortage is a severely limiting factor affecting agricultural production in North China. However, the water use efficiency in agriculture is less than 40%. Poor management of irrigation water is one of the principal reason for the low water use efficiency (Smith, 1996). Proper water management would maximize the water use efficiency of irrigation crops.

The relationship between yield and crop water use has been investigated by many researchers (Al-kaisi et al, 1997). Information on the optimum time to apply limited amounts of water to obtain the maximum yield of high quality crops is essential for efficient use of irrigation water (Matsunake, 1992). When the same amount of water was applied at different growth stages, there was a significant difference in productive tillers (Sharma et al, 1990).

Deficit irrigation is widely used with different degrees of success. Under deficit irrigation, crops are deliberately allowed to sustain some water deficit and yield reduction (Ragab, 1995). Plant water deficits decrease leaf growth, leaf area, leaf net photosynthetic rate and translocation of assimilates. Nevertheless, there are situations in which plant water deficits can increase yield, and/or water use efficiency (Turner, 1990). In a study with five sunflower cultivars, Rawson and Turner (1982) showed that withholding water for the first 45 days until the pre-dawn leaf water potential decreased to -0.5Mpa resulted in the production of larger leaves in the upper canopy, and the seed yield was also increased in this cultivar when subjected to a early water deficit compared to the frequently irrigated plants. Plant water deficits do not necessarily reduce crop yields and that mild water deficits can in fact stimulate yields (Turner, 1990, 1997). Water stress is not always injurious. Although it reduces vegetative growth, it sometimes improves the quality of plant products (Kramer, 1983). Scheierling et al (1997) indicated that, given a certain number of irrigation, crop yields vary enormously depending on the timing of irrigation, and given the optimal timing of irrigation, the increase in crop yield from an additional irrigation event diminishes as the number of irrigation increases. This implies that the number of irrigation, and thus the amount of water applied, can be reduced over a certain range without impacting ET and crop yield significantly. In order to save irrigation water and increase water use efficiency, water-saving irrigation has been introduced to irrigation practice.

Regulated Deficit Irrigation (RDI), which is based on the crop-water relations to control

the soil water status in different crop growth stages, is one of the most important measures for the water-saving and high yield of crops. RDI has both economic and ecological benefit, especially in the areas of water shortage or with high water use cost. The experiment data in North China were used to analyze the problems of RDI in practical use.

2. Theoretical Basis of Regulated Deficit Irrigation

2.1 The relationships between crop yield and water use

Many models were developed to describe the relationship between crop yield and water use (ET). The curvilinear relationship of total ET-grain yield was widely used. Because the effect of water deficits on crop yield varied with development stages, several models have been developed to relate crop yield and water use in different stages, and Jensen's model has been most widely used. In the model, the water deficit sensitivity index (i) is used to describe the sensitivity of crop yield to water deficit in different stages. The studies showed that the index varied greatly with the sites and meteorological conditions. The water deficit sensitivity index for spring wheat obtained from the experiment data at Mingin County, Gansu Province in 1992 and 1993 were shown in Table 1. It was shown that i was different for 2 years, and the peak value may not be at the same stage. The possible reasons are the variation of meteorological factors and agricultural measures. Another main reason may be the errors in experiment. The treatments may be different and the degree of water deficit may be also different in different years. It will be difficult to use it to describe the relation between crop yield and water use accurately. In the model, it is assumed that the maximum yield is obtained at fully water supply for whole growing season. Because of the curvilinear relation of ET-grain yield, excess water supply may cause the reduction of crop yield, which means that the maximum water use is not necessarily the optimal water use. The negative values of i are same reasons as described.

Table 1. The sensitive index of crop water deficit (i) at different growth stages

Year	Sowing	tillering	jointing	booting	earing	filling	maturity	Correlation coefficient
1992	-0.216	0.334	0.324	0.030	0.161	0.079		0.848
1993	0.088	0.006	0.208	0.143	0.027	0.046		0.961

Crop yield and water use relations established from experiment data varies with the environmental conditions, and it partly reflects the effect of water deficit on crop growth and yield. The relations do not consider the beneficial effect of mild water stress on crop yield. Therefore, in fact, the optimal irrigation schedule obtained from the relations are not optimal. It is only a optimal result at certain conditions.

2.2 The beneficial effect of water deficit on crop yield

Kobata (1992) showed that the final grain size of wheat subjected water shortage varied with the rate of development of water deficits. When the rate of the water deficit was rapid, the grain yield was reduced and grain size was smaller than when the water deficit was imposed more slowly by allowing the soil to dry in a humid atmosphere. In the high yield range, dry matter maybe more responsive to increase ET than grain yield. The irrigation during early GS2 (Floral initiation to postanthesis beginning of grain growth) increase straw yields by 24% but had no effect on grain yield of wheat (Musik and Porter, 1990). The experiment results of winter wheat at Changwu County, Shaanxi Province, were shown in table 2. Evapotranspiration was calculated using soil water content of 0 - 100 cm depth. It showed that water use efficiency was the lowest in treatment 3 with well water conditions for entire growing season. The same grain yields were obtained from treatment 3 and 11, but there were big difference in the irrigation amount and WUE. It had 302mm of irrigation and 379mm of ET in treatment 11 compared with 406mm of irrigation and 471mm of ET, and WUE changed from 11.87 to 9.55 kg·hm⁻²·mm⁻¹. The excessive water use may cause the deep percolation and soil evaporation during spring time when ground cover is small. The difference for these two treatments was maintaining a moderate soil water content during initial and development stage

in treatment 11, a low water condition at the late part of growing season instead of well water condition for whole growing season in treatment 3. The high WUE and crop yield were obtained in treatment 13, which had maintained a low water content during the spring time (Figure 1) that would reduce the soil evaporation and stimulate the root growth. The soil water variation was shown in Figure 1 for three treatments with highest grain yield. It was shown that winter irrigation is necessary to gain high grain yield. The irrigation in spring may be delayed when winter irrigation was applied. Irrigation was delayed to May 11, 3 times of irrigation of 268mm was applied in treatment 13. The yield of treatment 13 was highest over all treatments. That means the mild water deficit at the beginning of jointing would be beneficial to grain yield of winter wheat.

Table 3. Water use, grain yield and water use efficiency of winter wheat in different treatment at Changwu County, Shaanxi Province

Treatment	Water use in different growth stages (mm)					Total	Grain Yield WUE	
	9/29/95-3/8/96	3/8-4/13	4/13-5/11	5/11/5/27	5/28/6/23		Kg·hm ⁻²	kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹
1	32.7	10.5	32.4	45.5	39.5	160.6	2025.10	12.606
2	64.9	27.6	58.8	80.0	84.9	316.1	3575.18	11.309
3	81.4	46.1	103.8	110.4	129.5	471.1	4500.23	9.552
4	32.0	44.4	60.6	49.6	50.6	237.1	3375.17	14.233
5	56.8	8.2	38.8	77.1	94.9	275.7	3875.19	14.054
6	84.2	17.4	102.8	48.6	80.6	333.6	4575.23	13.713
7	36.9	33.2	96.7	75.8	120.4	362.9	4250.21	11.711
8	65.0	32.1	77.8	54.4	49.3	278.6	4075.20	14.629
9	96.7	4.8	74.9	119.9	83.5	379.9	3800.00	10.003
10	34.3	13.7	36.3	89.5	88.5	262.4	3175.16	12.103
11	70.3	30.2	107.7	115.3	55.6	379.1	4500.23	11.870
12	82.1	45.2	67.3	80.9	53.2	328.8	4225.21	12.852
13	80.6	6.6	54.7	118.4	81.7	341.9	4925.25	14.405
14	62.3	44.1	62.0	53.2	97.6	319.1	4025.20	12.613
15	32.7	26.6	67.0	48.2	79.1	253.5	3700.19	14.598

3. Several Problems of Regulated Deficit Irrigation in practical Use

The effect of water deficit on crop yield and quality depends on the growth stages, degree and duration of water deficit. Because of the great difference of plant physiological characteristics, the growth stage and degree of regulated water deficit should be different for different crops.

3.1 The uncertainty of crop yield and water relations

If the relationships of crop yield and water use established using experiment data were the only one relation, the optimum irrigation schedule would be easily obtained from it using optimization models. In fact, the relationship is affected by many factors, such as meteorological conditions, irrigation methods and techniques, the treatments of irrigation experiment, soil types, agricultural measures, insect pest and plant diseases, etc. Therefore, these relations can not be used to determine the regulated deficit irrigation schedule. The schedule should be flexible, which should be regulated according to crop growth and soil water conditions.

3.2 The proper time of regulated deficit irrigation

The sensitivity of crop to water deficit varies with growth stages. Turner (1990) showed that water deficit at early growth stage was beneficial to grain yield. The key of regulated deficit irrigation is to artificially impose water deficit at certain growth stages. For most crops, the plant is small, air temperature is low, and the intensity of water use is small at the early growing stage. That means that the development of water deficit is slow at early stage. Just as the result of Kobata (1992), slow rate of water deficit development would have little effect on crop yield. Therefore, the proper time of regulated deficit irrigation should be at the early growing stage. At the middle growing stage, because of the large canopy and active growth, the intensity of water use is high and the rate of water deficit development is fast. Water deficit would have great effect on crop yield. Regulated deficit irrigation can not be used at this period.

The experiment result with cotton at Minqin County, Gansu Province in 1991, was shown in table 3. There were 4 treatments totally. The date of first irrigation was same at bud stage for treatment 2 and 3 with 2 times of irrigation during growing season. Second irrigation of treatment 3 was delayed to the middle of boll forming stages compared with treatment 2 at the beginning of boll forming. The yield of ginned cotton of treatment 3 reduced 18% compared with treatment 2. IT also showed that the yield of ginned cotton of treatment 3 was similar to treatment 1 with only 1 time of irrigation at the beginning of boll forming stage. The reason is that plant of early irrigation of treatment 3 had a bigger canopy and higher intensity of water use. When second irrigation was delayed, plant would suffer serious water stress, which made a lot of leaves fall that we had observed during experiment and affected the yield. The irrigation of treatment 1 was delayed and plant canopy was smaller. The plant was imposed mild water stress. After irrigation it would normally grow.

Table 3. Experiment results of cotton at Minqin County, Gansu Province in 1991

Treatment	Irrigation amount (mm)			Total irrigation amount (mm)	Yield of ginned cotton(Kg·hm-2)*
	Bud	Beginning of boll forming	Middle of boll forming		
1		90		90	1222.5
2	75	90		165	1534.5
3	75		90	165	1297.5
4	75	90	75	240	1639.5

*: The yield of ginned cotton is the average of 3 replications.

3.3 Allowable water deficit degree of regulated deficit irrigation

The allowable water deficit degree should be at a proper limit. It varies with different crops, different growth stages of crops and soil texture. Meyer and Gree (1980) suggested that when soil water content of 1m soil layer decreased to 50% of available soil water, winter wheat should be irrigated. The results (figure 1) showed that when soil water content decreased to 46% of field capacity, it had no bad effect on wheat yield. The studies at Minqin County, Gansu Province with spring wheat showed that the date of first irrigation had great effect on the yield. The soil water content of 0-60cm at the jointing stage may decrease to 45% of field capacity. If first irrigation was properly delayed, it would be beneficial to crop yield (Table 4). If the first irrigation was delayed from April 27 to May 5, the yield increased. But if it was delayed to May 10, the yield reduced.

Table 4. The yield of spring wheat for different date of first irrigation at Minqin County

Year	The date of first irrigation	Days after sowing	Irrigation amount (mm)	Grain yield (Kg·hm ²)
1990	4/27	40	75	9208.5
	5/05	48	75	10000.5
	5/13	56	75	9501.0
1991	4/28	44	75	8136.0
	5/05	52	75	8356.5
	5/10	57	75	7588.5
1992	4/28	47	75	7672.5
	5/05	54	75	7867.5
	5/10	59	75	7375.5

3.4 The requirement of regulated deficit irrigation to irrigation system and techniques

In regulated deficit irrigation plant grows at water deficit condition. Good irrigation system is required to assure the application of regulated deficit irrigation, that is, irrigation water should be controlled and regulated in proper time and amount. Otherwise, the mild water deficit may develop to serious water stress, and cause great yield reduction. In order not to cause serious water stress at the part of irrigation area, a good irrigation technique and level land are needed to have high irrigation uniformity.

4. Conclusions

Regulated deficit irrigation is based on the crop and water relations. Because of the small plant and low intensity of water use, the rate of water deficit development is slow at early stage. Regulated deficit irrigation should be applied at the early stage of growing season. The allowable water deficit degree varies with plant and growth stages. The experiment results of winter wheat at Changwu County showed that there was no bad effect on grain yield if the water content decreased to 46% of field capacity at jointing stage. For spring wheat at Minqin County, if first irrigation was delayed properly, it was beneficial to crop yield. Soil water content of 0-60 cm soil layer may decrease to 45% of soil capacity before first irrigation. At the same time, good irrigation system and techniques are required to assure crops not to suffer serious water stress when regulated deficit irrigation was applied.

Water shortage is a main limiting factor for agricultural production in arid and semiarid areas of China. The application of regulated deficit irrigation can increase crop yield and water use efficiency. The proper time and allowable water deficit degree should be further studied before it is widely used, because the mild water deficit that is beneficial to crop growth will quickly develop to serious water stress in the field.

References

- 1 Al-kaisi, M.M., A. Berrada and M. Stack, 1997, Evaluation of irrigation scheduling program and spring wheat yield response in Southwestern Colorado, *Agricultural Water Management*, 34:137-148.
2. Kobata T., J.A. Palta, and N.C. Turner, 1992, Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat, *Crop Science*, 32(5):1238-1242.
3. Kramer, P.J., 1983. *Water Relations of Plants*, Academic Press.
4. Liang, Y., H. Cai, S. Kang, X. Hu, 1998, The response and adjustment of crops to soil water stress on Loess Plateau, In "Kang, S., Liang, Y., Cai, H (editors), *Water-soil-crop relation and its optimum regulation in arid and semiarid areas*", China Agriculture Press, Beijing: 37-66.
5. Matsunaka, 1992, Optimum irrigation period for production in spring wheat, *Soil Sci. Plant Nutri.*, 38(2):269-279.
6. Meyer, W.S., Gree, G.C., 1980, Water use by wheat and plant indicators of available soil water, *Agron. J.*, 72:253-256.
7. Musik, J.T., K.B. Porter, 1990, Wheat, In " B.A. Steward and D.R. Nielson (Editors), *Irrigation of Agricultural Crops*, American Society of Agronomy, Inc, Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc", 597-638.
8. Ragab, R., 1996, Constraints an applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions, in "Irrigation scheduling: From Theory to Practice", Proceedings ICID/FAO Workshop, Sept. 1995, Rome, Water Report, No.8, FAO, Rome, 149-165
9. Rawson, H.M. and Turner, N.C., 1982, Irrigation timing and relationship between leaf area and yield in sunflowers, *Irrigation Science*, 4:167-175.
10. Scheierling S.M., G.E. Gardon, R.A. Young, 1997, Impact of irrigation timing on simulated water-crop production functions, *Irrigation Science*, 18(1):23-31.
11. Sharma, D.K., A. Kumar, K.N.Singh, 1990, Effect of irrigation scheduling on growth, yield and evapotranspiration of wheat in sodic soils, *Agricultural Water Management*, 18:267-276.
12. Smith, M., 1996, Summary report, conclusion and recommendations, in "Irrigation scheduling: From Theory to Practice", Proceedings ICID/FAO Workshop, Sept. 1995, Rome, Water Report, No.8, FAO, Rome, 1-18
13. Turner, N.C., 1990, Plant wter relations and irrigation management, *Agric. Water Manage.*, 17:59-73.
14. Turner, N.C., 1997, Further progress in crop water relations, *Advances in Agronomy*, 58:293-338.

부족조절관개와 실용상의 문제점

Regulated Deficit Irrigation and Its Several Problems in Practical Use

Huanjie Cai, Shaozhong Hang

중국 북서농업대학교 수리건축공학대학,

요약

부족(또는 적자)조절관개는 용수절약 및 작물수량 증수를 위한 주요 방법 중의 하나이다. 부족조절관개는 작물과 물의 관계에 근거를 두고 있다. 부족조절관개의 이론은 Shaanxi 및 Gansu 성에서의 실험자료를 이용하여 분석되었다. 부족조절관개에서의 실용상 문제점은 ; 작물-물관계의 불확실성, 부족조절관개에서의 적정 생육기와 물부족의 정도, 관개조직과 기술에 대한 부족조절관개의 필요조건 등이다.

1. 서언

물 부족은 중국의 북부지역에서 농업생산을 좌우하는 주요 제한 요소이다. 그렇지만 농업에서의 물 이용효율은 40% 이하이다. 관개용수의 물관리가 잘 되고 있지 않는 것이 이용효율을 낮추는 이유이다. 물관리가 잘 되면 관개작물에 대한 물 이용효율을 높일 수 있다.

작물수량과 물 이용간의 관계에 대해서는 많은 연구가 있었다. 최대 작물수량을 얻기 위하여 제한된 양의 물을 최적시기에 공급하는 것에 대해 아는 것이 관개용수의 효율적 이용을 위하여 중요하다. 같은 양의 물이라도 관개하는 시기에 따라 유효분얼의 수가 달라진다.

부족관개는 그 성공의 정도가 다양하다. 부족관개하에서는 작물이 어느 정도 물부족에 견디고 작물수량이 감소되는 것을 일부러 허용한다. 작물이 물부족에 직면하면 잎의 성장이 줄고 따라서 잎의 면적, 잎의 광합성률 그리고 동화물의 이동이 감소한다. 그렇지만 식물의 물부족이 작물수량을 증가시키고 물 이용효율을 높이는 경우가 있다. 해바라기로 실험한 경우 처음 45일 동안 새벽 전의 잎의 수분압력이 -0.5Mpa 로 감소되도록 물의 공급을 억제한바 해바라기 위쪽 부분에서 잎의 크기가 커졌고 씨의 수량도 자주 관개를 한 경우에 비하여 더 증가하였다. 작물체에 대한 물부족이 반드시 작물수량을 감소시키는 것이 아니며 약간의 물부족이 작물수량을 증가시킬 수 있다는 것이 확인되었다. 따라서 물부족이 꼭 해로운 것만은 아니다. 물부족이 작물의 잎의 성장에는 장애가 되지만 생산물의 질을 높이는 경우도 있다. 관개 횟수가 정해진 경우 작물수량은 관개시기에 따라 크게 달라지며, 적정관개시기가 정해진 경우 추가관개에 따른 작물수량의 증가는 관개횟수가 많아짐에 따라 작아진다. 이것은 관개횟수 그라고 물사용량을 어느 범위 안에서 작물수량에 큰 영향을 주지 않고 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 관개용수를 절약하고 물사용효율을 증가시키기 위하여 물절약관개가 관개방법으로 도입 이용되고 있다.

부족조절관개는 작물의 성장단계별로 토양수분상태를 조절하는 작물-물관계에 기초를 두고 있으며, 용수절약과 작물수량 증가를 동시에 기대할 수 있는 좋은 방법이다. 부족조절관개는 물부족 지역이나 용수의 가격이 높은 지역에서 경제적 및 환경적으로 유익한 관개방법이다. 중

국의 북부지방에서 실험한 자료를 이용하여 부족조절관계의 실용상 문제점을 분석하였다.

2. 부족조절관계의 이론적 기초

2.1 작물수량과 물사용과의 관계

작물수량과 물사용(증발산량)의 관계에 대해 많은 연구가 있었다. 전체 증발산량-작물수량 관계 곡선이 널리 사용되고 있다. 작물수량에 대한 물부족의 영향은 성장단계에 따라 달라지므로 성장단계별로 작물수량과 물사용의 관계를 정립하기 위한 몇 개의 모델이 개발되었고 Jensen의 모델이 가장 널리 사용되고 있다. 이 모델에서는 물부족 민감도 지수 (i)를 사용하여 각 성장단계별로 물부족에 대한 작물수량의 민감도를 나타낸다. 연구결과 민감도 지수는 장소와 기상조건에 따라 크게 달라지는 것을 확인하였다. 중국의 Gansu성 Minqin군에서 1992-1993년에 봄밀에 대해 구한 물부족 민감도 지수는 표 1과 같다. 2년간 민감도 지수의 값이 다르고 최대치도 같은 성장단계에 있지 않았다. 기상인자가 다르고 농사방법이 다른 것을 이유로 들 수 있고 또 실험상의 오차도 이유가 될 것이다. 해가 달라지면 처리방법이 달라지고 물부족 정도도 달라질 수 있다. 따라서 작물수량과 물사용간의 관계를 정확히 설명하는데 이것을 이용하기는 어려울 것이다. 이 모델에서는 최대작물수량이 전체 성장기간 동안 충분한 물을 공급하였을 때 생긴다고 가정하였다. 물사용과 작물수량 관계가 곡선이기 때문에 과도한 물의 공급은 작물수량을 감소시킬 수 있고, 이것은 최대용수 사용이 반드시 최적용수 사용이라고 할 수 없다는 것을 의미한다. 이 때문에 i 의 (-) 값이 생기게 된다.

표 1. 성장기별 물부족 민감도 지수

연도	분얼기	Jointing	수잉기	출수기	등숙기	성숙기 (Maturity)	상관계수
1992	-0.216	0.334	0.324	0.030	0.161	0.079	0.848
1993	0.088	0.006	0.208	0.143	0.027	0.046	0.961

실험자료로부터 구한 작물수량과 물 사용 관계는 환경조건에 따라 달라지며 이것은 작물의 성장과 수량에 대한 수분부족의 영향을 부분적으로 나타낸다. 이 관계는 작물수량에 대해 약간의 수분부족이 유리하다는 것을 고려하지 않고 있다. 그러므로 이 관계로부터 구한 최적관계 곡선은 실제로 최적이지 아니고 어느 조건에서의 최적결과를 나타낼 뿐이다.

2.2 작물수량에 대한 물부족의 효과

Kobata(1992)는 물부족에 따른 밀알의 최종 크기가 물부족 발생속도에 따라 변하는 것을 확인하였다. 물부족의 발생속도가 빠르면 느린 경우보다 낱알수량이 감소하고 알의 크기도 작아졌다. 높은 작물수량의 범위에서는 건물(乾物)의 양이 낱알수량보다 물사용량에 의해 좌우될

것이다. 개화초기부터 낱알의 성장이 시작하는 postanthesis까지의 관개는 낱의 생산량을 24%나 증가시키지만 밀의 낱알수량에는 별 영향을 미치지 않는다. 중국 Shaanxi성의 Changwu군에서 겨울 밀로 실험한 결과는 표 2와 같다.

표 2. Shaanxi성의 Changwu군에서 겨울 밀로 실험한 처리별 물사용량과 낱알수량

처리별	성장기별 물사용량(mm)					Total	낱알수량 kg/hm ²	물사용효율 kg/hm ² / mm
	95.9.29~9 6.3.8	3.8-4.13	4.13-5.11	5.11-5.27	5.28-6.23			
1	32.7	10.5	32.4	45.5	39.5	160.9	2,025.10	12.606
2	64.9	27.6	58.8	80.0	84.9	316.1	3,575.18	11.309
3	81.4	46.1	103.8	110.4	129.5	471.1	4,500.23	9.552
4	32.0	44.4	60.6	49.6	50.6	237.1	3,375.17	14.233
5	56.8	8.2	38.8	77.1	94.9	275.7	3,875.19	14.054
6	84.2	17.4	102.8	48.6	80.6	333.6	4,575.23	13.713
7	36.9	33.2	96.7	75.8	120.4	362.9	4,250.21	11.711
8	65.0	32.1	77.8	54.4	49.3	278.6	4,075.20	14.629
9	96.7	4.8	74.9	119.9	83.5	379.9	3,800.00	10.003
10	34.3	13.7	36.3	89.5	88.5	262.4	3,175.16	12.103
11	70.3	30.2	107.7	115.3	55.6	379.1	4,500.23	11.870
12	82.1	45.2	67.3	80.9	53.2	328.8	4,225.21	12.852
13	80.6	6.6	54.7	118.4	81.7	341.9	4,925.25	14.405
14	62.3	44.1	62.0	53.2	97.6	319.1	4,025.20	12.613
15	32.7	26.6	67.0	48.2	79.1	253.5	3,700.19	14.598

증발산은 0~100cm 깊이의 토양함수량을 가지고 계산하였다. 물사용효율은 3번 처리구에서 가장 낮았는데 이 처리구는 전 생육기간 동안 물공급 조건이 좋았다. 낱알수량은 3번과 11번 처리구에서 같았지만 관개수량과 물사용효율은 크게 달랐다. 11번 처리구에서는 관개량이 302mm, 증발산량이 379.1mm이며 3번 처리구에서는 관개량이 406mm, 증발산량이 471.1mm인데 물사용효율은 11.87kg/hm²/mm에서 9.55kg/hm²/mm로 변했다. 과도한 관개는 심층침투를 일으키고 봄철에 아직 지면이 작물의 잎으로 덮이지 않을 때 토양면 증발을 많이 한다. 두 처리구 사이의 차이는 3번 처리구에서 전체 성장기간 동안 좋은 수분상태를 유지해 준 것에 대해, 11번 처리구의 경우 초기 및 성장단계에서 적정토양수분함량을 유지해주고, 성장 후기에는 낮은 수분상태로 한 것이다. 13번 처리구에서는 높은 물사용효율과 최대의 작물수량을 얻었는데 이 경우는 토양면 증발을 줄이고 뿌리성장을 촉진하기 위하여 봄철 동안 낮은 수분상태를 유지하였다. 낱알수량이 높은 4개 처리구에 대한 토양수분 변화상태를 그림 1에 도시하였다.

이것을 보면 높은 낱알수량을 얻기 위하여 겨울관개가 필요함을 알 수 있다. 겨울관개를 하면 봄철관개를 늦출 수도 있다. 13번 처리구에서는 5월 11일까지 관개를 연기하였고 268mm를 3회에 걸쳐 관개하였다. 13번 처리구의 낱알수량은 최고치였는데 이는 Jointing기 초기에 약한 물부족이 있는 것이 겨울밀의 낱알수량에 유리한 것을 의미하는 것이다.

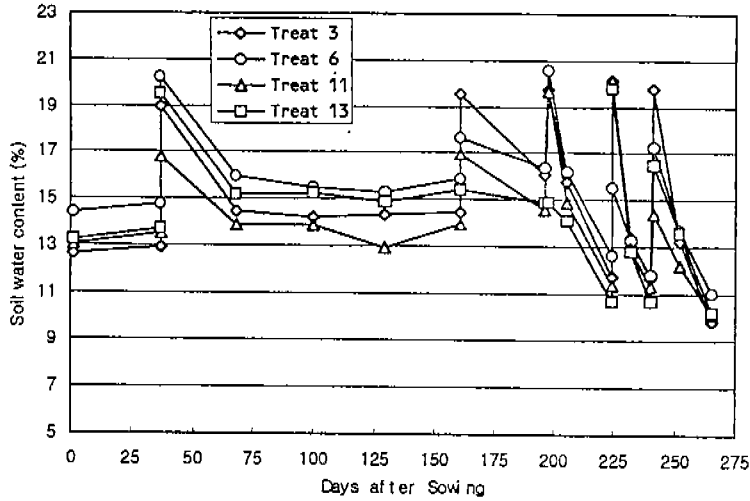


그림 1. 토양수분의 변화(Shaanxi성, Cangwu군, 1995/96 기간)

3. 부족조절관개의 실용상 문제점

작물수량과 품질에 대한 물부족의 효과는 성장기와 물부족의 정도 및 기간에 따라 다르다. 식물의 생리학적 특성이 서로 다르기 때문에 성장기와 물부족 조절의 정도는 작물별로 달라야 한다.

3.1 작물수량과 물 관계의 불확실성

실험자료를 사용하여 얻은 작물수량과 물사용간의 관계가 오직 하나의 관계라면 최적화 모델을 사용하여 쉽게 최적관계계획을 세울 수 있을 것이다. 그러나 실제로는 이 관계가 기상조건, 관개방법 및 기술, 관개실험 처리, 토양의 종류, 경작방법, 방제, 구충 등 여러 가지 요소들에 의해 영향을 받는다. 그러므로 이들 관계는 부족조절관개 계획을 세우는데 사용할 수 없다. 이 계획은 유동적인 것이어야 하고 따라서 작물의 성장과 토양수분 상태에 따라 조정되지 않으면 안 된다.

3.2 부족조절관개의 적정 시기

물부족에 대한 작물의 반응은 성장단계별로 다르다. Turner(1990)는 초기 성장단계에서의 물부족이 난알수량에 도움이 된다고 하였다. 부족조절관개의 핵심은 어느 성장단계에서 인위적으로 물부족이 생기게 하는 것이다. 대부분의 작물들은 초기 성장단계에 키가 작고 기온이 낮으며 물사용 강도가 크지 않다. 이는 초기단계에서 물부족 발생 속도가 느리다는 것을 의미한다. 이렇게 느리게 물부족이 생기면 작물수량에 미치는 영향이 크지 않다. 그러므로 부족조절관개의 적정시기는 초기 성장단계이어야 한다. 중기 상장단계에서는 작물의 잎이 발달하고 성장이

빠르며 물 사용 강도가 크고 물부족 발생속도가 빠르다. 이 기간에는 물부족이 작물수량에 큰 영향을 미치므로 부족조절관개를 시행하지 않아야 한다.

중국 Gansu성 Minqin군에서 1991년 면화로 실험한 결과는 표3과 같다. 4개의 처리구로 실험을 하였는데 2번과 3번 처리구에서 발아기의 첫 번째 관개는 같은 날에 하였고 성장기간 중에는 2번의 관개를 하였다. 3번 처리구의 두 번째 관개는 꼬투리 형성기의 중간에 하였고 2번 처리구의 것은 꼬투리 형성기의 초기에 하였는데, 3번 처리구의 씨를 뺀 면화의 수량은 2번 처리구에 비해 18%가 감소하였다. 더구나 3번 처리구의 씨를 뺀 면화수량은 꼬투리 형성기의 초기에 한번만 관개를 한 1번 처리구의 수량과 비슷하였다. 이것은 3번 처리구의 발아기 관개가 목화의 잎을 번성하게 하여 물 사용 강도를 높인 것이 이유라고 할 수 있다. 두 번째 관개가 지연될 때 식물은 심각한 물부족에 직면하고 이 때문에 잎이 떨어지는 것을 실험 중에 확인하였으며 이로 인해 작물수량이 감소하였다. 1번 처리구의 경우 처음부터 관개가 늦어져서 목화의 잎이 무성하지 못했고 따라서 심각한 물부족에 이르지 않았으며 꼬투리 형성기 초기에 관개를 한 후에는 정상적인 성장을 하게 된 것이다.

표 3. Gansu성 Minqin군에서의 1991년 면화 실험결과

처리별	관개량(mm)				씨를 뺀 면화수량 (kg/hm ²)
	발아기	꼬투리 형성 초기	꼬투리 형성 중기	합계	
1		90		90	1,222.5
2	75	90		165	1,534.5
3	75		90	165	1,297.5
4	75	90	75	240	1,639.5

주) 씨를 뺀 면화수량은 3반복의 평균치임

3.3 부족조절관개의 허용 물부족 정도

허용 물부족 정도는 적정한계 안에 있어야 한다. 그 것은 작물의 종류, 작물의 성장단계 그리고 토질에 따라 달라진다. Meyer 와 Gree(1980)는 1m 깊이의 토층에서 토양수분 함량이 가용 토양수의 50%로 감소하면 겨울 밀에 대해 관개하여야 한다고 주장하였다. 토양함수량이 포장용수량의 46%로 감소해도 밀의 수량에 나쁜 영향이 없다는 결과도 있었다. Gansu성 Minqin군에서 봄밀로 실험한 바에 의하면 첫 번째 관개일자가 밀 수량에 큰 영향을 끼쳤다. Jointing 단계에서 0~60cm의 토층의 토양수분 함량은 포장용수량의 45%까지 낮아질 수도 있다. 만약 첫 번째 관개가 적절히 지연되면 표 4에서 보는바와 같이 작물수량에 도움이 된다. 첫 번째 관개가 4월 27일에서 5월 5일로 지연되면 작물수량은 증가되었으나 5월 10일까지 지연되면 감소되었다.

표 4. Gansu성 Minqin군에서 첫 번째 관개일자에 따른 봄밀의 수량

연도	관개일자	파종 후 일수	관개량(mm)	남 알 수 량 (kg/hm ²)
1990	4/27	40	75	9,208.5
	5/05	48	75	10,000.5
	5/13	56	75	9,501.0
1991	4/28	44	75	8,136.0
	5/05	52	75	8,356.5
	5/10	57	75	7,588.5
1992	4/28	47	75	7,672.5
	5/05	54	75	7,867.5
	5/10	59	75	7,375.5

3.4 부족조절관개의 관개조직 및 기술에 대한 필요조건

부족조절관개에서는 작물이 물부족 상태에서 성장한다. 부족조절관개를 잘 하려면 관개조직이 잘 되어 있어야 한다. 즉, 관개용수가 적기에 적량으로 조절될 수 있어야 한다. 그렇지 못하면 약한 물부족도 심한 수분부족 장애를 주며 작물수량을 크게 감소시킬 수 있다. 관개지역의 일부에 심각한 수분 부족 장애를 주지 않기 위하여는 좋은 관개기술과 평탄한 농지로 관개의 균등도를 높이는 것이 필요하다.

4. 결론

부족조절관개는 작물과 물의 관계에 근거를 두고 있다. 작물의 초기 생육단계에서는 식물체의 크기가 작고 물 사용강도가 낮아 물부족 발생속도가 느리다. 따라서 부족조절관개는 작물재배기간의 초기 단계에서 사용하여야 한다. 허용 물부족 정도는 작물의 종류와 성장단계에 따라 다르다. Changwu군에서의 겨울밀 재배실험에 따르면 Jointing 단계에서 토양함수량이 포장용수량의 46%로 감소해도 낱알수량에 나쁜 영향이 없었다. Minqin군에서는 첫 번째 관개가 적절히 지연되면 그 것이 작물수량에 유리하였다. 첫 번째 관개까지 0~60cm 깊이의 토층에서 토양수분함량이 가용토양수분의 45%가 되어도 괜찮았다. 동시에 부족조절관개를 할 때에는 작물이 심각한 수분부족에 직면하지 않도록 하기 위하여 좋은 관개조직과 기술이 필요하다.

물부족은 중국의 건조 및 반건조 지역에서 농업생산을 좌우하는 주요 제한 요소이다. 부족조절관개를 시행하면 작물수량을 늘이고 물사용 효율을 높일 수 있다. 적정 관개시기와 허용 물부족 정도는 작물 성장에 유익한 약한 물부족이 포장에서 급속하게 심각한 물부족으로 바뀔 수 있기 때문에 부족조절관개가 널리 사용되기 전에 더 연구되어야 한다.