

沟灌土壤侵蚀控制效应的室内模拟试验研究

雷廷武<sup>1,2</sup>, 袁普金<sup>2</sup>, 黄兴法<sup>2</sup>, Issac Shainberg<sup>3</sup>, 詹卫华<sup>2</sup>, 于健<sup>4</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所; 2 中国农业大学; 3 以色列土壤水环境科学院; 4 内蒙古水利科学研究院)

**摘 要:** 灌溉地土壤侵蚀问题已经越来越引起人们的普通关注。该文采用微型水槽的室内模拟试验, 对利用 PAM 及波涌灌溉等技术减少沟灌引起的土壤侵蚀效果进行了试验研究, 分析了在不同坡度、不同流量条件下 PAM 及灌溉间歇时间对侵蚀的影响。结果表明: PAM 可显著减少沟灌土壤侵蚀量, 地面坡度是地面灌溉土壤侵蚀最主要影响因素, 而流量及波涌灌间歇时间对它的影响较小。  
**关键词:** 土壤结构稳定剂(PAM); 波涌沟灌; 微型水槽; 土壤侵蚀  
**中图分类号:** S157. 2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 100226819(2002)0320026205

土壤侵蚀在农田灌溉中经常发生, 沟灌和畦灌尤为明显。在农业中, 近年来应用土壤结构稳定剂(Polyacrylamide 以下简称 PAM) 减少土壤侵蚀已成为国内外学者广泛关注的內容。Mitchell A R 在 1985 年首次提出用 PAM 溶液进行土壤侵蚀研究, 表明 PAM 的效果只发生在 0~ 5 cm 的表层土壤中<sup>[1]</sup>; Levy G J, Ben Hur M 和 Agassi M (1991) 在喷灌条件下研究 PAM 对土壤侵蚀、径流的产生及棉花产量的影响, 表明 PAM 是一种有效的土壤结构稳定剂, 不仅可以限制径流的产生, 减少土壤侵蚀, 更重要的是可提高棉花产量<sup>[2]</sup>。Lentz R D 和 Sojka R E (1994) 在沟灌条件下研究 PAM 对土壤侵蚀及水分入渗的影响<sup>[3]</sup>。Aase J K, Bjorneberg D L 和 Sojka R E (1998) 作了 PAM 对喷灌条件下的土壤侵蚀和径流的影响室内试验<sup>[4]</sup>等等。系列研究表明, PAM 可以提高农田土壤的导水能力和孔隙度, 提高土壤的持水能力, 减少土壤侵蚀和表层结皮现象, 减少土壤侵蚀量<sup>[1~ 7]</sup>。

波涌灌溉(Surge Flow Irrigation, 又称间歇灌溉) 是美国学者于 70 年代末提出的一种新型地面灌溉方式, 曾被称为是地面灌溉的一次“革命”<sup>[8]</sup>。与传统地面连续灌溉相比, 主要是供水的间歇性。在灌水间歇期湿润区地表易形成密实层, 以减少第二次灌水时的入渗速度, 增加行水速度, 具有提高灌水效率和灌溉质量及节水的作用。该项技术具有省水、灌水均匀、灌水效率高、投资少等优点<sup>[8~ 10]</sup>。

收稿日期: 2001203217 修订日期: 2002203201  
基金项目: 中国以色列国际合作项目(99w2002 1422); 中国科学院“百人计划”(982602); 国家自然科学基金重大项目(19832060)  
作者简介: 雷廷武, 博士, 博士生导师, 研究员, CSAE 高级会员, 教授, 北京清华东路 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083; 陕西杨凌 中国科学院、水利部水土保持研究所, 712100

1 试验材料及方法

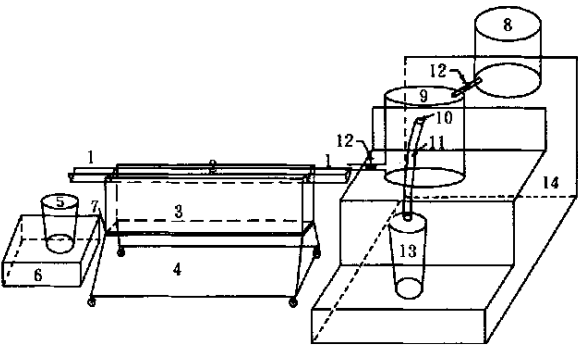
1.1 试验材料

供试土为内蒙河套地区的典型土壤——砂壤土, 土壤质地如表 1 所示。土壤干容重为 1. 4 g/cm<sup>3</sup>, 风干土含水率为 2. 18% (质量)。

表 1 砂壤土土壤质地成分分析  
Table 1 Particle size analysis of experimental sandy loam soil

sandy loam soil						mm
砂 粒			粉 粒		粘 粒	
粒径/mm	1~ 0. 5	0. 5~ 0. 25	0. 25~ 0. 1	0. 1~ 0. 05	0. 05~ 0. 001	< 0. 001
含量/%	0. 37	0. 72	23. 31	44. 8	17. 4	13. 4

试验用微型水槽如图 1 所示。槽身为有机玻璃板制作, 净长 100 cm, 宽 10 cm, 深 22 cm, 槽内盛装宽 4. 4 cm、深 2. 2 cm 90° 型土。两端各设一段 20 cm 长的 90° 型过渡槽, 以利于行水, 槽宽 4. 4 cm, 深 2. 2 cm。



1. “V”型过渡槽 2 “V”型土沟 3 槽体 4 基座 5 水样桶  
6 垫片 7 铰轴 8 容器 9 恒水头容器 10 泄水口  
11. 泄水管 12 流量控制阀 13 盛水容器 14 支架

图 1 室内试验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of laboratory experiment equipment

1—过渡 V 型槽, 使水流平顺地流入流出土槽;  
2—土槽入渗 V 表面; 3—槽体, 按  $1.4\text{ g}\ddot{\text{o}}\text{cm}^3$  的容重装土至水槽平齐; 4—水槽基座, 可以移动也可固定;  
5—采样桶, 收集水量和产沙量; 6—垫片; 7—铰轴, 用于调节水槽坡度; 8—供水容器; 9—恒水头容器, 用来稳定入流水头, 恒定流量; 13—盛水容器, 用来收集 9 中多余的水量。PAM 预先配好浓度, 以不同浓度进行试验。

1 2 试验设计

本研究试图对沟灌土壤侵蚀的影响因素进行定量化分析。因此选择试验因素分别为: 间歇时间(A); PAM 浓度(B); 流量(C)和坡度(D)。各因素的水平如表 2。

表 2 试验因素及水平

Table 2 Design of experiment factors and levels				
因 素		水 平		
A (间歇时间) $\ddot{\text{a}}\text{m in}$	0	5	10	15
B (PAM 浓度) $\ddot{\text{a}}\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	0	5.0	10.0	20.0
C (流量) $\ddot{\text{a}}\text{mL} \cdot \text{m in}^{-1}$	640	480	320	960
D (坡度) $\ddot{\text{o}}\%$	0.1	0.5	1.0	5.0

试验采用正交设计方案布置, 根据所选因素及因素水平选择  $\text{L}_{32}(4^9)$  正交表。详细试验方案如表 3 所示。

1 3 试验安排

试验分成连续灌水和间歇灌水两类。间歇灌水分成两个阶段, 第一阶段为间歇灌水期, 每行水 2 m in 间歇一次, 共停水 3 次, 每次停水 5 m in; 第二阶段为连续灌水阶段, 通过该阶段可以方便地比较间歇时间在以后连续灌水中的作用, 本阶段为 10 m in。连续灌水处理行水时间和间歇灌水处理的总行水时间一致均为 16 m in。各次试验前先调好流量, 打开水流的同时按下秒表, 记录入流时间, 并记录水头推至水槽末端的用时; 水流流出末端 V 槽进入水样桶时用另一秒表记录取样时间, 每个水样为 2 m in 的时间。试验记录数据有入流量、出流量和产沙量等。

2 结果与分析

试验中各处理的侵蚀量如表 3 中最右两列。计算结果见表 4。

表 3 详细试验方案及测量的侵蚀量

Table 3 Detailed experiment scheme and quantity of soil erosion measured											
试 验 号	因 素									考核指标	
	A (间歇时间)	B (PAM 浓度)	A $\times$ B			C (流量)	D (坡度)			侵蚀量 $\ddot{\text{O}}_{\text{g}}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	y	y <sup>2</sup>
1	1(0)	1(0)	1	1	1	1(640)	1(0.1)	1	1	0.32	0.1024
2	1(0)	2(5)	2	2	2	2(480)	2(0.5)	2	2	0.23	0.0529
3	1(0)	3(10)	3	3	3	3(320)	3(1.0)	3	3	0.05	0.0025
4	1(0)	4(20)	4	4	4	4(960)	4(5.0)	4	4	1.06	1.1236
5	2(5)	1(0)	1	2	2	3(320)	3(1.0)	4	4	0.15	0.0225
6	2(5)	2(5)	2	1	1	4(960)	4(5.0)	3	3	1.57	2.4649
7	2(5)	3(10)	3	4	4	1(640)	1(0.1)	2	2	0.04	0.0016
8	2(5)	4(20)	4	3	3	2(480)	2(0.5)	1	1	0.14	0.0196
9	3(10)	1(0)	2	3	4	1(640)	2(0.5)	3	4	0.36	0.1296
10	3(10)	2(5)	1	4	3	2(480)	1(0.1)	4	3	0.11	0.0121
11	3(10)	3(10)	4	1	2	3(320)	4(5.0)	1	2	0.25	0.0625
12	3(10)	4(20)	3	2	1	4(960)	3(1.0)	2	1	0.39	0.1521
13	4(15)	1(0)	2	4	3	3(320)	4(5.0)	2	1	1.13	1.2769
14	4(15)	2(5)	1	3	4	4(960)	3(1.0)	1	2	0.46	0.2116
15	4(15)	3(10)	4	2	1	1(640)	2(0.5)	4	3	0.17	0.0289
16	4(15)	4(20)	3	1	2	2(480)	1(0.1)	3	4	0.05	0.0025
17	1(0)	1(0)	4	1	4	2(480)	3(1.0)	2	3	0.46	0.2116
18	1(0)	2(5)	3	2	3	1(640)	4(5.0)	1	4	0.53	0.2809
19	1(0)	3(10)	2	3	2	4(320)	1(0.1)	4	1	0.12	0.0144
20	1(0)	4(20)	1	4	1	3(320)	2(0.5)	3	2	0.04	0.0016
21	2(5)	1(0)	4	2	3	4(960)	1(0.1)	3	2	0.79	0.6241
22	2(5)	2(50)	3	1	4	3(320)	2(0.5)	4	1	0.07	0.0049
23	2(5)	3(10)	2	4	1	2(480)	3(1.0)	1	4	0.06	0.0036
24	2(5)	4(20)	1	3	2	1(640)	4(5.0)	2	3	0.44	0.1936
25	3(10)	1(0)	3	3	1	2(480)	4(5.0)	4	2	3.46	11.9716
26	3(10)	2(5)	4	4	2	1(640)	3(1.0)	3	1	0.37	0.1369
27	3(10)	3(10)	1	1	3	4(960)	2(0.5)	2	4	0.44	0.1936
28	3(10)	4(20)	2	2	4	3(320)	1(0.1)	1	3	0.01	0.0001
29	4(15)	1(0)	3	4	2	4(960)	2(0.5)	1	3	1.64	2.6896
30	4(15)	2(5)	4	3	1	3(320)	1(0.1)	2	4	0	0
31	4(15)	3(10)	1	2	4	2(480)	4(5.0)	3	1	0.45	0.02025
32	4(15)	4(20)	2	1	3	1(320)	3(1.0)	4	2	0.14	0.0196

表 4 PAM 及灌溉间歇时间对侵蚀影响分析

Table 4 Effects of PAM and off2time of surge irrigation on soil erosion									
$M_1$	2 81	0 31	2 41	3 3	6 01	2 37	1 44	3 41	2 99
$M_2$	3 26	3 34	3 62	2 72	3 25	4 96	3 09	3 13	5 41
$M_3$	5 39	1 58	6 23	5 03	3 33	1 7	2 08	3 68	4 45
$M_4$	4 04	2 27	3 24	4 45	2 91	6 47	8 89	5 28	2 65
$S_j$	0 479	3 475	2 208	0 416	0 772	1 863	4 365	0 348	0 621
$m_1$	0 351	1 039				0 296	0 18		$T = 15 5$
$m_2$	0 408	0 418				0 62	0 386		$S_T = 14 707$
$m_3$	0 674	0 198				0 213	0 26		$\bar{y} = 0 4843$
$m_4$	0 505	0 284				0 809	1 111		$f_T = 31$
$a_1$	- 0 133	0 554				- 0 188	- 0 304		
$a_2$	- 0 077	- 0 067				0 136	- 0 098		
$a_3$	0 189	- 0 287				- 0 272	- 0 224		
$a_4$	0 021	- 0 201				0 324	0 627		

表中: $M_{ij}$ 表示正交表中第*j*列数码(水平号)为*i*的各试验结果的总和; $m_{ij}$ 表示正交表中第*j*列数码(水平号)为*i*的各试验结果的均值; $S_j = \frac{r_j}{n} \sum_{i=1}^n M_{ij}^2 - \frac{1}{n} T^2$ 为正交表中第*j*列因素的离差平方和; $T = \sum_{j=1}^n y_j$ 为试验数据总和; $S_T = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{1}{n} T^2$ 表示试验结果总离差平方和; $f_T = n - 1$ 表示其自由度; $S_{\text{剩余}} = S_{\text{误}} + S_{\text{空}} = S_T - S_{\text{非空}}$ ;  $a_{ij} = m_{ij} - \bar{y}$ 表示第*j*列上的*i*水平的效应。*n*为试验次数,*r<sub>j</sub>*为第*j*列的水平数。对试验数据进行方差分析见表 5。

从表 5 可看出,影响土壤侵蚀最重要的因素是坡度(因素*D*)及 PAM 的浓度(因素*B*),而间歇时间(因素*A*)的影响非常小,在所选的流量范围内流量(因素*C*)的影响也不十分明显。下面就 PAM 及坡度分别分析对沟灌土壤侵蚀的影响。

表 5 各因素对侵蚀影响的方差分析

Table 5 Variance analysis of multiple factors experiment					
方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	临界值
<i>A</i>	0 479	3	0 160	0 743	$F_{0.95}(3, 13) = 3 41$
<i>B</i>	3 475	3	1 158	5 386 <sup>3 3</sup>	$F_{0.99}(3, 13) = 5 74$
<i>A</i> × <i>B</i>	2 208	9	0 245	1 141	$F_{0.95}(9, 13) = 2 71$
<i>C</i>	1 863	3	0 621	2 888 <sup>3</sup>	$F_{0.99}(9, 13) = 4 19$
<i>D</i>	4 365	3	1 455	6 767 <sup>3 3</sup>	
剩余	2 316	10	0 232		

注:3 —*F* 检验显著; 3 3 —*F* 检验非常显著。

2 1 PAM 对土壤侵蚀的影响

试验中,有 PAM 处理的水流流速快,侧渗现象不明显,行水过程中除了刚开的土沟上第一次行水时冲走部分土颗粒外,从第二次取样时已经基本没有土颗粒产生,而没有 PAM 的处理则一直都存在着土壤颗粒搬运的现象。对收集的不同坡度、不同 PAM 浓度下整个行水期的水样含沙量进行统计分析,并汇成柱状图如图 2 所示。

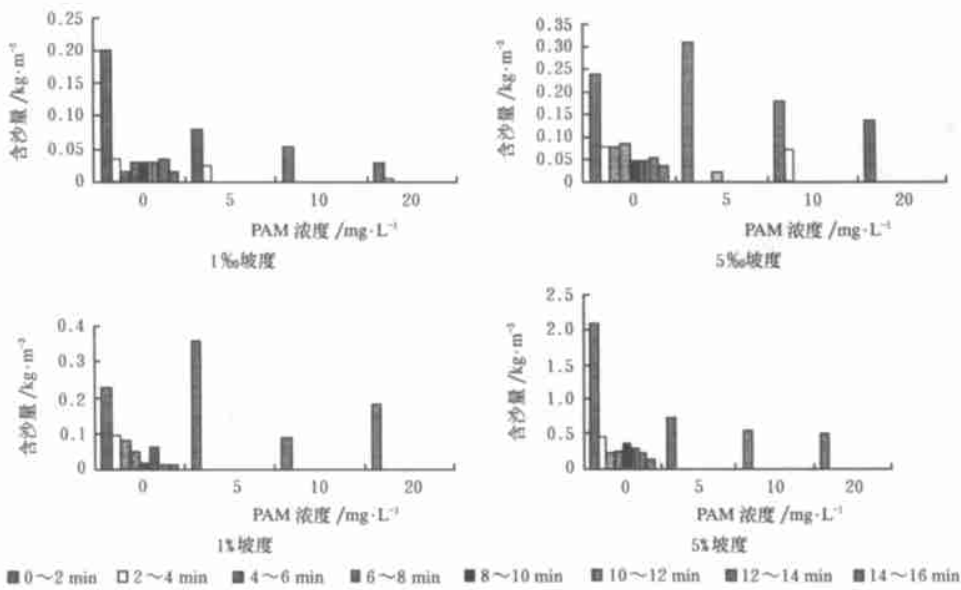


图 2 整个行水期内各坡度在不同 PAM 浓度下的产沙情况图

Fig 2 Sediment yield under different PAM concentrations and slopes during whole passage

从图 2 可以看出, 不论坡度大小, 在无 PAM 的处理中, 整个行水期内始终都存在着土壤侵蚀现象, 而在有 PAM 的处理中, 即便 PAM 的浓度很小(5 mg/L)也可以防止这种现象的产生。试验显示, 不同坡度、不同浓度下 PAM 对第一次行水期后的土壤侵蚀的减少效果较为显著, 经过第一次行水期后的灌水中水样基本不含泥沙。

对 PAM 浓度下各处理的总含沙量进行统计分析如图 3 所示。可以清楚地看出, 有 PAM 的处理, 不论浓度多大, 都比没有 PAM 的处理中的含沙量少得多。

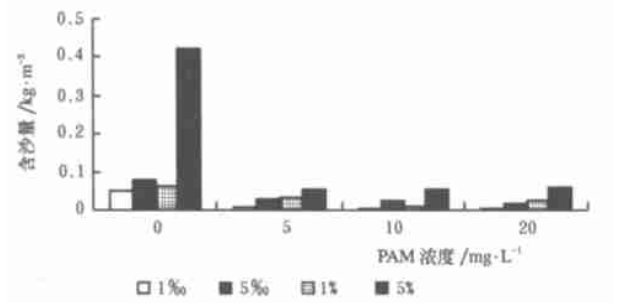


图 3 各处理总含沙量情况图

Fig 3 Total sediment yield under different treatments

2.2 坡度对土壤侵蚀的影响

对试验中不同坡度下各浓度的 PAM 所引起的总含沙量的变化分析并汇成如图 4 所示。可看出, PAM 能大大减少土壤侵蚀作用。PAM 处理的含沙量只有无 PAM 处理的 10%~53.8%。随着 PAM 浓度的增大, 相同坡度条件下总含沙量呈减少趋势, 但当浓度增至 20 mg/L 时 1% 的坡度呈现递增趋势。当坡度较大即为试验中的 5% 时, 随着浓度的增大, 总含沙量变化不太明显, 说明 PAM 对大坡度下土壤侵蚀效果不太显著。纵观全部结果, PAM 减少侵蚀的最好效果不是在最大浓度 20 mg/L, 而是在较小浓度 10 mg/L 时。10 mg/L PAM 的效应为

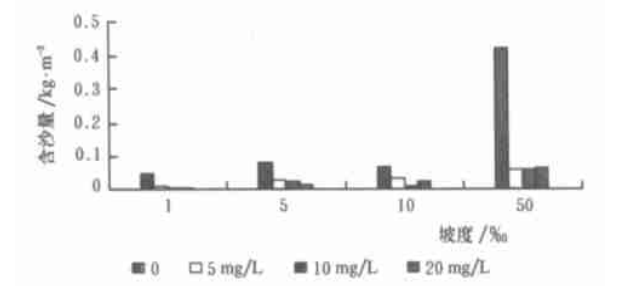


图 4 不同坡度下的产沙量情况

Fig 4 Sediment yield under treatments of different slopes

- 0.287。而 20 mg/L PAM 的效应为- 0.201, 效果略小于 10 mg/L 时的 PAM。

3 结 论

通过本试验研究, 基本可以得出如下结论

- 1) PAM 可以大大地减少内蒙古河套灌区典型土壤(沙壤土)的土壤流失量, 因此对减少地面灌溉土壤侵蚀有很大的作用。
- 2) 坡度是地面灌溉中影响侵蚀最为显著的因素, 在坡度增大时, 产沙量将显著增大。
- 3) 在所选流量范围内流量对沟灌条件下的产沙量影响并不十分显著, 因此可以认为流量在不冲沙流速内对土壤侵蚀现象可以不作考虑。
- 4) 波涌灌溉(间歇时间)对土壤侵蚀的影响比较小, 而主要作用在于提高灌水效率。

[参 考 文 献]

[1] Mitchell A R. Polyacrylamide application in irrigation water to increase infiltration[J]. Soil Science, 1986, 141(5).

[2] Levy G J, Ben-Hur M, Agassi M. The effect of polyacrylamide on runoff, erosion, and cotton yield from fields irrigated with moving sprinkler systems[J]. Irrigation Science, 1991, (12).

[3] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 1926~ 1932

[4] Aase J K, Bjorneberg D L, Sojka R E. Sprinkler irrigation runoff and erosion control with polyacrylamide——laboratory tests[J]. Soil Sci Soc Am J, 1998, 62

[5] Trout T J, Sojka R E, Lentz R D. Polyacrylamide effect on furrow erosion and infiltration[J]. Trans of the ASAE, 1995, 38(3): 761~ 766

[6] Zhang X C, Miller W P. Polyacrylamide effect on infiltration and erosion in furrows[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996(60).

[7] Zhang X C, Miller W P, Nearing M A, et al. Effects of surface treatment on surface sealing, runoff, and interrill erosion[J]. Trans of the ASAE, 1998, 41(4): 989~ 994

[8] Forrest T I, Terence H P, Harold R D. Infiltration under surge irrigation[J]. Trans of the ASAE, 1985, 28(2): 517~ 521.

[9] 孙西欢, 王文焰. 波涌沟灌节水机理与效果的试验分析[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 53~ 57.

[10] 王立正, 刘国富, 张可保. 波涌灌在引黄灌区的节水效果及其影响因素[J]. 灌溉排水, 1997, 16(4): 75~ 79

## Laboratory Simulated Experiments on Control Over Furrow-Irrigation Induced Soil Erosion

Lei Tingwu<sup>1,2</sup>, Yuan Pujin<sup>2</sup>, Huang Xingfa<sup>2</sup>, Isaac Shamberg<sup>3</sup>, Zhan Weihua<sup>2</sup>, Yu Jian<sup>4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China;

2. China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Institute of Soil and Water Environment Science, ARO, Israel;

4. Inner Mongolian Institute of Water Resources Research, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Soil erosion in irrigated land is becoming a more and more interested problem to people in the world. Simulated laboratory experiments with mini2flume were conducted to study the influences on furrow irrigation induced soil erosion of typical soil from Hetao Irrigation Scheme, Inner Mongolia. From the mini2flume experimental data, the impacts of PAM and interruption time on reduction of soil erosion under influences of slope grade and inflow rate were quantitatively analyzed. The results show that PAM can reduce soil erosion in irrigated land greatly, and the land slope is the most important factor to soil erosion in surface irrigated land. While the flow rate of irrigation water into furrow and off2time of surge irrigation are not very effective factors on it.

**Key words:** polyacrylamide (PAM); surge irrigation; mini2flume; soil erosion

## 中国实用型现代高科技田间 节水高效环保灌溉技术体系与示范的研究通过课题鉴定

由中国农业大学曾德超院士主持的中澳国际合作项目ACIAR9447“利用现代灌溉和果树管理技术提高中国北方果树生产率和水的有效利用的示范研究”经过6年多的努力,于2001年11月15日通过农业部的课题鉴定,结论是:该技术成果达到国内领先水平。其成果简要如下:

开发和示范了适合中国条件的一套属于现代高科技范畴,以根区土壤水分实时监测与收支平衡为特点的果园与大田田间灌溉制度制定技术;以及为实现所制定田间灌溉制度,按时按量按部位精确灌水所需的一些技术。从而实质上构成一种中国实用型现代高科技田间节水高效环保灌溉技术体系。经过4个具有代表性的华北生产果园的示范与培训,出版了技术指南和光盘。

研究表明,按科学制定的田间灌溉制度灌水,不论是畦灌、沟灌、软管灌、喷灌或是微灌,都比不

上按田间科学制定的灌溉制度灌水,在较大幅度上(36.6%~43.5%)节水、高效,避免过度灌溉而渗漏污染等。仪表设备的亩投资只及喷、微灌等高科技设备的2%~5%。

初步估算,要在2030年我国人口达零增长之前,及时将灌溉总面积发展达9亿亩,而总灌溉用水量仍保持1996年4000亿 $m^3$ 的水平,将灌溉效率从0.45提高到0.65,作物水利用系数从1.1 $kg\ddot{a}m^{-3}$ 提高到1.5~1.6 $kg\ddot{a}m^{-3}$ ,则须比目前每年节约500亿 $m^3$ 。如在发展畦灌、沟灌、喷灌、管道输水、微灌以及渠道衬砌等节水灌溉工程的同时,推广科学田间灌制制定技术及整个灌溉技术体系,则总设备投资将大幅度减少。从而为我国农业灌溉实现节水高效环保任务提供一个可供选择的技术解决方案。

(中国农业大学土机植实验室)