



**018530 - SWITCH**

**Sustainable Water Management in the City of the Future**

Integrated Project  
Global Change and Ecosystems

**Deliverable 5.2.3 - Annex B2**

# **A Handbook on Beijing's Rainwater Harvesting Technology of Greenhouse Agriculture (in Chinese)**

Due date of deliverable:  
Actual submission date:

Start date of project: 1 February 2006

Duration: 63 months

Organisation name and lead contractor for this deliverable: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research (Jianming Cai and Wenhua)

Revision [final]

<b>Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2006-2011)</b>		
<b>Dissemination Level</b>		
<b>PU</b>	Public	X
<b>PP</b>	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
<b>RE</b>	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services)	
<b>CO</b>	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	



**5.2.3 B: On technological and organizational innovations in Wastewater Reuse, and related guidelines Lima**  
*Work package 5.2*

The aim of work package 5.2 is to contribute to a paradigm shift in wastewater management and sanitation towards a recycling-oriented closed loop approach. The work package is being implemented in three cities; Accra, Beijing and Lima, and includes the identification and integration of appropriate productive re-use of urban freshwater, storm and waste-water for agriculture into the policy and planning frameworks of these cities.

The deliverables of the work package follow a sequence of implementation. Based on a situation and stakeholder review (del. 5.2.1), working groups are formed, meet and are linked to the Learning alliances (del. 5.2.2), they receive training in multi-stakeholder action planning (del. 5.2.3 A), and are involved in, and informed on, specific research by consultants, MSc and PhD or action research linked to the demonstrations, (all under del. 5.2.4). Information has been disseminated in publications, magazines and newsletters (del. 5.2.5), and guidelines and related training material has been developed (del 5.2.3 B and C). The leading institutes here are ETC (WP coordinator), IWMI (Accra), IGSNRR (Beijing) and IPES (Lima), other institutions involved were WUR, IRC and NRI- GUEL.

**As part of deliverable 5.2.3, this is the On technological and organizational innovations in Wastewater Reuse, and related guidelines Lima**

Contributing products included in this document are:

**5.2.3 Beijing**

5.2.3 BB: A Handbook on Beijing's Rainwater Harvesting Technology of Greenhouse Agriculture (in Chinese, is being translated).



A Handbook on Beijing's Rainwater  
Harvesting  
Technology of Greenhouse Agriculture

北京市设施农业  
雨水集蓄利用用户操作手册

Authors : Jianming Cai and Wenhua

Ji

编著：蔡建明，季文华

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research)

# Contents

Preface.....	I
Introduction.....	III
1. Summarization.....	1
1.1 Significance of RWH in Beijing.....	1
1.2 The objective.....	2
1.3 Range of application.....	3
1.4 Fundamental principles.....	3
2. Professional terms in the book.....	5
3. Introduction to technical components of RWH system.....	9
3.1 Indirect pumped system of closed storage pool.....	9
3.2 Direct pumped system of closed storage pool.....	10
3.3 Indirect pumped system of open storage pool.....	10
3.4 Direct pumped system of open storage pool.....	11
4. Interception of sewage.....	17
4.1 Source control of pollution.....	17
4.2 Interception system.....	18
5. Rainwater reuse.....	20
5.1 Rainwater reuse.....	20
5.2 technologies of water transfer.....	20
5.3 Water-saving irrigation system.....	23
5.4 Institutions for rainwater harvesting and reuse.....	24
6. Multifunctions of storage pool.....	25
6.1 Storage function.....	25
6.2 Production function.....	25
6.3 Integrated function.....	26
7. How to evaluate the optimization size of storage pool.....	27

7.1	Maximum of water harvesting efficiency .....	27
7.2	Meeting the need of irrigation.....	28
7.3	Minimum of investment.....	28
7.4	Maximun of benefits .....	29
8.	Construction and equipments installation .....	33
8.1	Installation of water guidance and storage parts .....	33
8.2	Installation of irrigation system.....	34
8.3	Installation of other subordinates .....	35
9.	System's maintainance and management.....	36
9.1	How to maintain storage pool .....	36
9.2	How to maintain deposit pool .....	38
9.3	Management of film of greenhouse .....	39
9.4	Maintainance of others .....	40
10.	Machenism of participation, cooperation and management.....	41
10.1	The main priciples.....	41
10.2	How to participate in planning and design.....	42
10.3	Training and learning .....	43
10.4	Policies for managing projects .....	45
11.	Case introduction.....	49
11.1	A demonstration in Huairou district of Beijing.....	49
	References .....	57

# 目 录

Preface.....	I
前 言.....	II
Introduction.....	III
1. 概述.....	1
1.1 雨水集蓄利用的意义.....	1
1.2 编制目的.....	2
1.3 本手册适用范围.....	3
1.4 设施农业雨水集蓄利用基本原则.....	3
2. 设施农业雨水集蓄利用专业术语.....	5
3. 设施农业雨水集蓄利用技术体系.....	9
3.1 封闭集雨窖间接泵送系统.....	9
3.2 封闭集雨窖直接泵送系统.....	10
3.3 开敞室内集雨窖间接泵送系统.....	10

3.4 开敞室内集雨窖直接泵送系统.....	11
4. 雨水截污与处理.....	17
4.1 控制源头污染.....	17
4.2 雨水截污装置.....	18
5. 雨水回用.....	20
5.1 集蓄雨水的用途.....	20
5.2 取水输水技术.....	20
5.3 节水灌溉系统.....	23
5.4 雨水集蓄灌溉制度.....	24
6. 集雨窖功能拓展.....	25
6.1 集雨窖蓄水功能.....	25
6.2 集雨窖生产功能.....	25
6.3 集雨窖综合利用.....	26
7. 集雨窖规模优化.....	27
7.1 集雨效率最大原则.....	27

7.2 满足周年灌溉用水原则 .....	28
7.3 集雨成本最低原则 .....	28
7.4 效益最大原则 .....	29
8. 施工与设备安装 .....	33
8.1 集流与蓄水工程施工 .....	33
8.2 灌溉设备安装 .....	34
8.3 其它设备安装 .....	35
9. 设施维护与管理 .....	36
9.1 集雨窖的维护 .....	36
9.2 蓄水池的维护 .....	38
9.3 温室膜面维护管理 .....	39
9.4 集流槽及沉淀池的维护管理 .....	40
10. 参与、合作与管理机制 .....	41
10.1 参与、合作的主要原则 .....	41
10.2 参与工程规划与设计 .....	42



10.3 培训与学习 .....	43
10.4 工程管理政策 .....	45
11.案例介绍 .....	49
11.1 怀柔区北房镇雨水集蓄利用示范点 .....	49
参考文献 .....	57

## **Preface**

Beijing is a water scarcity city. Comparing with other industries, agriculture's development is more restricted by water shortage. On the basis of field investigation and case analysis on RWH systems of recent years, this Handbook represents specifically most kinds of RWH systems in Beijing district and focuses on types, technical features, applicable range, advantages and weakness of systems. It also builds principles for building and using RWH systems and raises some key problems which should be avoided. The size of storage pool is especially important to improve water harvesting efficiency and lower total investment. Thus an optimization principle is developed to help deciding an appropriate size. All these could provide valuable technical references for up-scaling RWH system in Beijing.

This Handbook also discusses mechanism of participation, cooperative and management of RWH technology. Case study could help us better understanding the whole process and positive effects of RWH. It could be references for planning, building and running RWH system. It is expected that this handbook could be a useful inventory of RWH technology nationwide and worldwide in general and be a useful tool for urban producers to develop their own RWH system in particular.

## 前言

北京市是一个水资源十分短缺的城市。相对于其他行业而言，农业发展受水资源有限性的制约尤为明显。本文在对北京市近几年设施农业雨水集蓄利用实地调研和案例分析基础之上，就北京地区设施农业雨水集蓄利用系统进行了详细的阐述，包括系统的类型、特点、适用范围、优缺点以及在建造、使用过程中应遵循的原则和需要避免的各种关键问题，尤其是通过蓄水池流量模拟建立了蓄水池建造规模的优化原理，为今后北京地区雨水集蓄利用系统的推广提供了技术参考。

在此基础上，本文进一步探讨了参与、合作与管理机制，以便为农业雨水集蓄利用技术的推广提供更为广阔的平台。通过案例介绍和分析，展现了运用该技术的整个过程以及能够达到的良好效果。

本文可作为规划、建造、运行使用雨水集蓄利用系统的参考资料。文内所收集的各种雨水集蓄利用系统基本涵盖了北京市现有的各种类型。在此，期望本文能够为北京市雨水利用事业的发展添砖加瓦。

## **Introduction**

Agriculture is a big water consumer in Beijing according to the proportion in the city. Although the proportion is declining due to a series of reasons, for example, rainwater reduction, farmland decrease and water-saving technologies. It's still accounting to about 35% in 2010. The key issue faces with now is water shortage to agriculture. On one hand, above 80% of irrigation water source is from groundwater. On the other hand, groundwater table declines about 1 meter year by year. Thus rainwater harvesting (RWH) could be a sustainable way in the future.

As a high benefit investment, greenhouse agriculture (GA) has developed quickly in China, also in Beijing. But GA could consume more water than traditional agriculture. As sustainable water use way, RWH draws attentions of Beijing local government. What we have done in the book is to summarize and share the experiences and lessons of RWH industry in Beijing also worldwide. The handbook could be used as training material for farmers who want to use rainwater. And I truly believe that people will realize the value of rainwater and participate in RWH.

# 1. 概述

北京市中心位于北纬 39°，东经 116°。北京全市土地面积 16,410 km<sup>2</sup>。其中平原面积 6,338 km<sup>2</sup>，占 38.6%，山区面积 10,072 km<sup>2</sup>，占 61.4%。北京的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，春、秋短促。年平均气温 10~12℃，年平均降雨量不到 600 mm，降水年际、季节分配很不均匀，全年降水 75%以上集中在夏季，7、8 月常有暴雨。

北京是祖国的首都，是全国政治、经济文化中心。全市共划分为 16 个区 2 个县。2007 年，北京市实现地区生产总值 9,353 亿元，占当年全国国内生产总值的 3.75%。截至 2007 年末，全市常住人口 1,633 万人，其中户籍人口 1,213 万人，居住半年以上的外来人口 420 万人。

## 1.1 雨水集蓄利用的意义

随着北京市社会经济的快速发展，城市规模不断扩大，人民生活水平逐年提高，城市用水量也不断增长。然而，北京市天然水资源有限，目前人均占有水资源量不足 300m<sup>3</sup>，为全国平均水平的 1/8，世界平均水平的 1/30。加之受到近几年降雨量偏少、城市污水处理和再生利用滞后以及上游来水量锐减等因素的影响，北京市水资源短缺的形势更加严峻。为了实现北京的可持续发展，必须采取有效的措施，广泛地开源、节流、挖掘水资源潜力，努力实现北京市长期的水资源供需平衡。

由于长期过度开发利用水资源，尤其是地下水资源，北京市水资源长期处于亏损状态。具体表现在地表水水体干涸并受到了不同程度的污染，地下水水位持续下降，水质衰退。这不仅威胁着北京市水资源的可持续利用，而且造成了生态环境的严重破坏。

目前，北京市农业灌溉主要依赖地下水资源。但随着北京市平原区地下水水位的持续快速下降，农用机井报废速度加快，农业生产水资源短缺问题凸显。农业用水成本的攀升影响了北京市农业的可持续发展，阻碍了新农村建设进程的顺利推进。雨水资源的集蓄利用可增强利用本地水资源的能力，节约大量的优质水资源，有利于缓解北京市水资源短缺的现状，有助于解决农业用水短缺和用水成本偏高的问题。

总之，雨水集蓄利用立足于开发自有水资源满足用水需求增长，是实现城市水资源可持续利用的有效途径。发展雨水集蓄与利用，可提高城市的供水安全性和可靠性，降低对外部水源的依赖程度，是增强资源自立和自主的重要战略措施。

## 1.2 编制目的

设施农业雨水集蓄利用工程是微小型水利工程，与城市传统的大型给排水工程相比，具有其特殊性：需要根据特定的需水要求设置集、蓄、输、配水系统，需要分析雨水集蓄利用系统的多功能性、应用的经济可行性和雨水利用的安全性等。在设施农业雨水集蓄利用方面，我国至今还没有相关的设计手册和操作指南。本手册在总结了北京市及全国各地设施农业雨水

集蓄利用的实践经验及参考国外相关设计手册的基础上，结合北京市设施农业雨水集蓄利用的对象、目的、水质及水量的要求，提出了一套经济合理、技术完善、具有可操作性的设施农业雨水集蓄利用工程设计、运行和维护的指导手册。本手册可用以指导北京市设施农业雨水集蓄利用工程的规划、选址、设计、建设和运行管理，并为国内其他城市的雨水集蓄利用工作的开展提供参考。

### **1.3 本手册适用范围**

现代农业雨水集蓄利用技术已在我国经过了几十年的实践和研究，雨水集蓄利用的技术和类型十分丰富。但我国幅员辽阔，因此，各种雨水集蓄利用技术存在明显的地域差异。本手册中设施农业雨水集蓄利用技术的适用区域：多年平均降雨量400mm以上、地下水水位偏低（一般应在5m以下）且设施农业较发达的平原区。

### **1.4 设施农业雨水集蓄利用基本原则**

（1）设施农业雨水集蓄利用工程应规划选择在缺乏地表水或地下水或开采利用困难，多年平均降雨量400mm以上的设施农业区兴建。

（2）设施农业雨水集蓄利用工程规划应首先了解规划区的水利设施状况、自然经济条件，并结合当地的经济发展和水资源综合管理规划，力求做到因地制宜、合理布局。

(3) 工程的规模、数量和类型应根据规划区的水循环、补给与排泄条件、当地农作物的灌溉制度等资料来确定。

(4) 设施农业雨水集蓄利用工程应尽量集中连片，发挥规模经济效应，避免重复建设。

(5) 蓄水工程的选址要具备集水容易、引蓄方便的条件，按照稍少占耕地、安全可靠、来水充足、水质符合要求、经济合理的原则进行。

(6) 工程选址应符合特定的地质条件。应避开滑坡体、高边坡、泥石流危害地段和交通通道。宜选在坚实土层或完整的基岩之上；不能建在地下水出露的地方，以免地下水水压对集雨窖造成破坏。



## 2. 设施农业雨水集蓄利用专业术语

### 1. 设施农业

人类运用现代科学技术、现代物质装备、现代管理方法，将完全顺从和适应自然造化的传统农业生产过程，改造为能够逐步摆脱或完全摆脱自然束缚的一种现代农业生产方式。设施农业具有经济效益高，作物生产周期短，需水量大等特点。在北京地区，设施农业一般是以塑料薄膜、玻璃、PVC 等透明光滑材料作为屋面形成的具有隔离条件的生产用地。具有充分采光、防寒保温能力。

### 2. 设施农业雨水集蓄利用

设施农业雨水集蓄利用是通过修建集雨槽、沉淀池、蓄水池等设施将降落在温室、大棚等的棚膜表面上的雨水收集存储起来，再将雨水通过微灌施肥系统高效利用于设施农业生产或景观优化等的一种微型水利工程。蓄水装置一般都进行防渗处理，容积一般为 50-1000m<sup>3</sup>。设施农业雨水集蓄利用工程主要为设施农业提供补灌用水，同时结合现代都市型农业的发展特点，适当的发挥工程的多功能性。设施农业雨水集蓄利用工程由集流工程、蓄水工程、供水及灌溉设施等部分组成。

### 3. 降雨量

降雨量是指降雨的绝对量，即降雨深度，常以 mm 计。在分析降雨量时，通常用单位时间表示，如

年平均降雨量：指多年观测所得的各年降雨量的平均值。

月平均降雨量：指多年观测所得的各月降雨量的平均值。

年最大日降雨量：指多年观测所得的一年中降雨量最大一日的绝对值。

#### 4. 集流面

指雨水降落并参与汇集雨水的各种表面,本书中特指设施农业的覆盖面(图 2-1)。集流面的面积一般按照垂直方向的投影面计量(见图 1)。

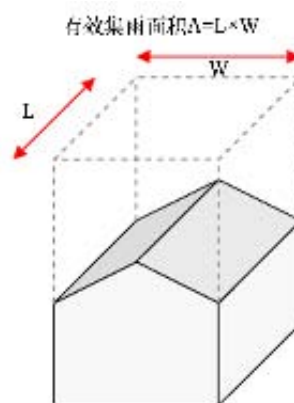


图 1 集流面面积

#### 5. 径流与径流系数

径流是降落在集流面上的雨水扣除滞留、下渗、蒸发等损失后所形成的流动雨水。径流系数指雨水在集流面上形成的径流量与降雨量之比；径流系数为介于 0-1 之间的无量纲参数。

#### 6. 集流槽

集流槽是把集流面上汇集的雨水导入到集雨窖的一种凹形槽,其构造可以是砖砌、水泥浇筑或一条上覆塑料膜的沟(图 2-2)。

#### 7. 沉淀池

沉淀池是连接集流槽和集雨窖的小水池(图 2-3),起着对雨水过滤净化的作用。

#### 8. 集雨窖

集雨窖是用来储存雨水以备后用的方形或圆形水窖,一般采用封闭埋藏式。集雨窖是整个集雨利用系统的关键,其合理容积大小需要根据降雨量、集雨量和用水量来优化确定。北京

地区降雨年内分布极不均匀的规律决定了集雨窖的雨水收集效率存在显著的季节差异性。因此，集雨窖的设计既要考虑雨水存储功能，还需要根据当地的降雨特点发挥其在干季的多功能作用。为此，可将集雨窖分成蓄水室(图 2-5)和工作室(图 2-6)，并通过连接孔(图 2-7)将两室相连接。蓄水室的主功能是存储调蓄雨水，工作室的主功能是开展农业生产，兼顾蓄水室溢流雨水的收集和利用。集雨窖规模优化将在后续章节中详细讨论。

### 9. 蓄水池

蓄水池是连接集雨窖和微灌施肥系统的枢纽装置(图 2-10)，建于设施农业内部。蓄水池可起到雨水二次净化的作用，并利用高度位差，实现重力自流补充灌溉系统需水。

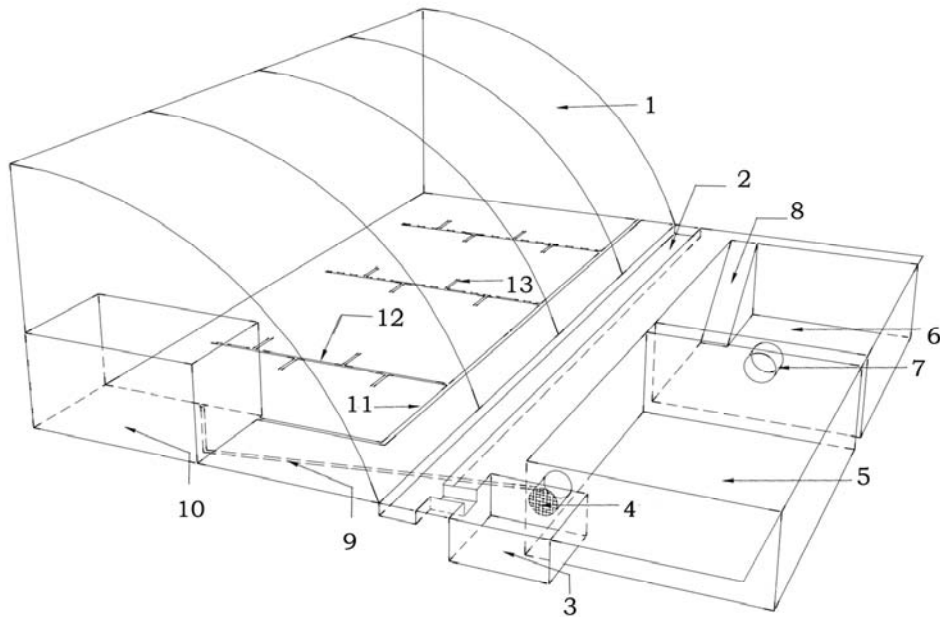


图 2 典型设施农业雨水集蓄利用系统构造图

#### 10. 微灌施肥技术

微灌施肥技术是一种通过重力滴灌系统运送肥料，使作物在吸收水分的同时吸收养分的施肥技术。其特征是将滴灌专用肥溶于蓄水池，通过重力滴灌运送到作物根际。

### 3. 设施农业雨水集蓄利用技术体系

根据设施农业雨水集蓄利用中雨水的存储方式和泵送方式不同，可将其分为 4 类：

#### 3.1 封闭集雨窖间接泵送系统

将封闭的集雨窖建于温室或大棚外侧地下，窖内雨水通过水泵送入蓄水池，雨水重力自流供给农业生产用水（图 3）。其优点在于集雨窖的雨水蒸发损失小，无需考虑水泵是否与灌溉系统相匹配的问题，雨水在蓄水池内经过二次沉淀后所含的杂质少，不易造成微灌系统的堵塞等；其缺点在于封闭式集雨窖造价高昂，蓄水池可能会占用一定的农业生产空间，蓄水池的出水水压可能无法满足灌溉需求而需要安装额外的增压装置。

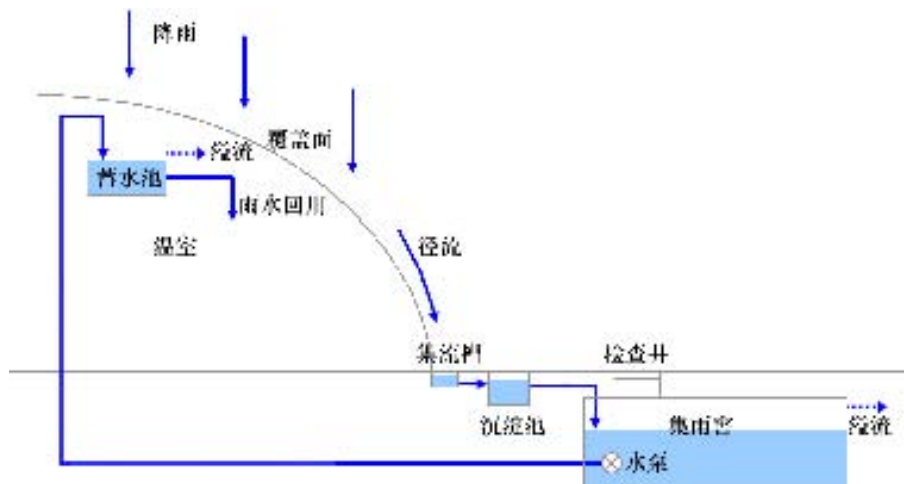


图3 封闭集雨窖间接泵送系统

### 3.2 封闭集雨窖直接泵送系统

将封闭的集雨窖建于温室或大棚外侧地下，窖内雨水通过水泵抽取直接供给农业生产用水（图4）。其优点在于收集雨水的蒸发损失小，能节约温室内的农业生产空间。但是这一系统对过滤系统和水泵的要求较高，一般需要在水泵进水口安装过滤装置，否则容易造成水泵或灌溉系统的损坏，从而导致系统供水失效。

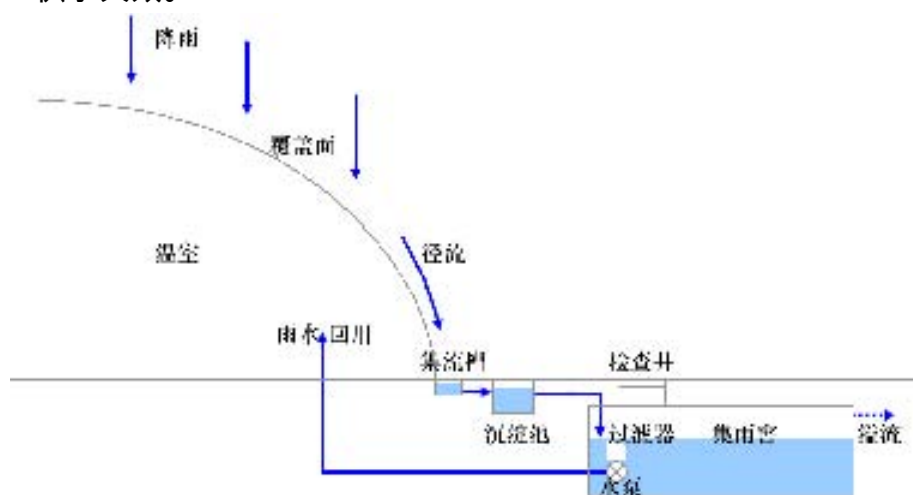


图4 封闭集雨窖直接泵送系统

### 3.3 开敞室内集雨窖间接泵送系统

将开敞的集雨窖建于温室或大棚以内，窖内雨水通过水泵先送入蓄水池，雨水在重力作用下自流供给农业生产用水（图5）。该系统的优点是能减少集雨窖的建造成本，对水泵的要求不高，蓄水池的使用有利于提高雨水水质；其缺点是开敞集雨

窖对人身安全具有一定的危险性，尽管集雨窖仍在封闭的室内，但雨水蒸发损失要稍高于封闭集雨窖。集雨窖和蓄水池的建造会挤占农业生产空间，蓄水池出水可能水压不足，则需要配备额外的增压装置。

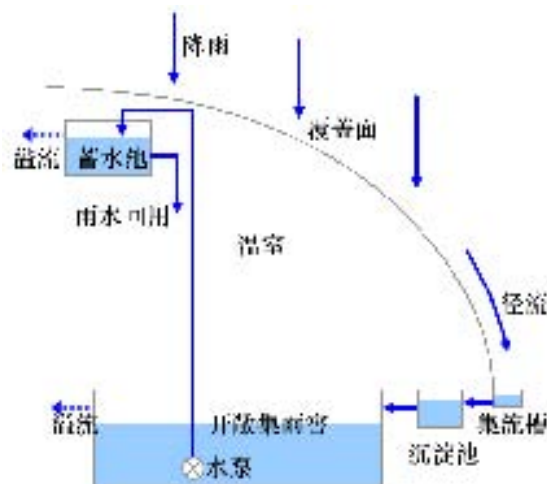


图5 开敞室内集雨窖间接泵送系统

### 3.4 开敞室内集雨窖直接泵送系统

将开敞的集雨窖建于温室或大棚以内，池内雨水经水泵直接供给农业生产用水（图6）。该系统的优点是集雨窖的建造成本低，不使用蓄水池可节约室内空间；其缺点是集雨窖对人身具有一定的危险性，雨水蒸发损失较大，水泵的配置和维护要求高，集雨窖会占用农业生产用地等。

另外，在北京市设施农业雨水集蓄利用系统的推广示范实践过程中，也存在开敞室外集雨窖雨水集蓄利用系统这一类型，但该类型具有较高的人身危险性，而且雨水直接暴露在阳光下，

集雨窖内容易滋生各种水藻影响了水质，从而导致水泵或灌溉系统经常堵塞。另外，开敞室外集雨窖的抗冻能力低，极易在冬季寒冷条件下遭到破坏。因此，本书对这一系统将不再进行介绍。

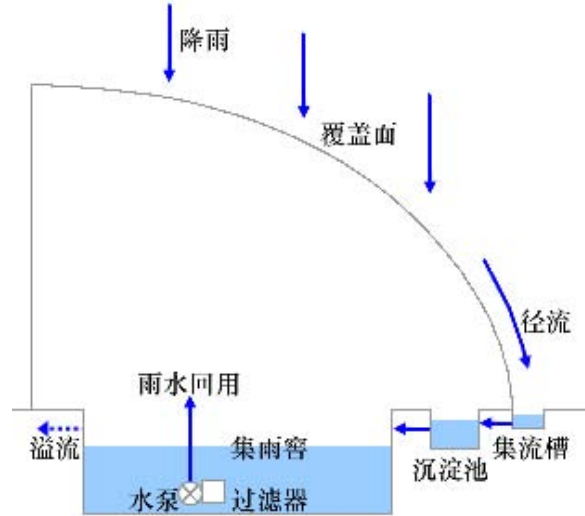


图6 开敞室内集雨窖直接泵送系统

根据设施农业雨水集蓄利用系统服务对象的数量，还可以将雨水集蓄利用系统分为一对一和一对多系统。一对一系统是指收集的雨水存储于一个集雨窖内并供给一个温室或大棚的农业生产用水；一对多系统是指收集的雨水存储于一个集雨窖内并提供给多个温室或大棚的农业生产用水。

一对一系统集雨窖的容积相对较小，其优点是集雨窖的建造空间可灵活安排，雨水收集集流槽和回用管路短，雨水收集利用的效率相对较高；

一对多系统集雨窖的容积一般较大，蓄水能力强，可灵活



安排农业用水。集雨窖建造可获得规模经济效应，即集雨窖越大，单位容积的建造成本会随之下降。而且，集雨窖的占地面积较大，可根据实际需要合理设计集雨窖的功能，即在实现蓄水功能外，还可以发挥农业生产功能，增加用户的收入。但是，随着集雨窖规模增大，集流槽和回用管路将变长，可能会影响到雨水收集效率和雨水回用的便捷性。

设施农业雨水集蓄利用系统一般包括以下组成要素：

- 集流面
- 集流槽
- 沉淀池
- 过滤装置
- 集雨窖
- 水泵
- 电源开关
- 蓄水池
- 回用管路
- 灌溉系统
- 溢流处理系统

由于雨水的水质较高，设施农业雨水集蓄利用系统一般不接入污水处理系统，溢流的雨水一般通过坑井或者自然洼地就近渗透进入地下蓄水层或自然蒸发。

**集流面。**设施农业雨水集蓄利用系统的集流面一般为塑料薄膜或者玻璃，具有良好的导水性，径流系数一般都很高。设施农业生产具有一定的周期性，每年需要定期打开覆盖面以满

足特定的农业生产需求（例如充分利用光照、杀灭土壤中的有害细菌或降低室内的温度等）。因此，集流面一般都可保持较高的清洁程度，有利于雨水的收集、处理和利用。

**集流槽。**设施农业的集流面大多都直接与地面相连接，因此需要建造开敞集流槽对雨水进行汇流和导流。集流槽长度一般与温室或大棚的长度等同，其宽度和深度根据当地的降雨特征和集流面面积的大小合理确定，在北京地区可按照宽 20cm，深 30cm 进行建造。集流槽应当有一定的坡度以利于雨水快速汇入集雨窖。总之，集流槽的建造标准应尽量保证在暴雨发生情况下不发生溢流。

**沉淀池。**由于设施农业雨水集蓄利用系统的集流槽建于地面，且为开敞式，雨水中较易携带泥沙和各种类型的杂质。因此，在雨水进入集雨窖前，须经过沉淀池进行初次沉淀，去除雨水中夹杂的固体杂质。其特征是出水口高于底部，在入水口设置栅栏，出水口覆盖过滤网，去除雨水中漂浮的杂质。沉淀池大小可根据来水速度和集流槽的清洁程度设置，北京地区可按照  $0.15\text{m}^3/\text{亩}$  建设。

**集雨窖。**设施农业雨水集蓄利用系统集雨窖用于暂时存储雨水以便日后农业生产用水所需。集雨窖的容积大小影响整个系统的集雨效率、投资成本和效益，集雨窖的设计应当十分慎重。

对于室外封闭集雨窖，为了不因集雨窖的修建而占用耕地面积，可在其顶部覆盖一定厚度的土壤层（在北京覆盖的土壤层厚度一般为 50cm），覆盖的土壤层还起着冬季保温的作用。

但这样提高了对集雨窖承重能力的要求。在具备条件的大型农场或农业园区，可以在每年的干季利用大型封闭地下集雨窖从事农业生产活动，例如蘑菇、韭黄等喜阴作物的生产，也可以将其用于物质的储存和保鲜，但必须设置便于进出的通道；对于室内开敞集雨窖，可在集雨窖上部开展空中农业生产，达到既能收集雨水又能不减少生产空间的目的。另外，大型开敞集雨窖还可以开展水产养殖活动，丰富农业生产内容，增加农民收入。

**水泵。**水泵是设施农业雨水集蓄利用系统中必须配备的装置。对于间接泵送系统而言，由于室内蓄水池具有二次沉淀的作用，因此水泵入水口一般无需配备过滤装置就可以达到灌溉系统的用水要求，但蓄水池内可能需要加设增压装置以满足供水水压要求。对于直接泵送系统而言，水泵直接与灌溉系统相连接，因此要求水泵的出水水质较高以防止灌溉系统堵塞，这样，水泵前一般都需要安装较为精细的过滤系统。

**蓄水池。**蓄水池用于间接泵送系统中，具有雨水清洁和沉淀的作用。蓄水池大小可根据设施农业用水规律确定，一般蓄水池的容纳的雨水应至少满足一次灌溉的用水需求。由于设施农业的面积一般较大，输水距离较远，蓄水池出水口距离地面应至少超过 1.5m，否则可能导致输水压力不足，这时就必须配备额外的增压装置。

**灌溉系统。**农业灌溉的类型很多，包括传统的淹灌和漫灌，以及喷灌、滴灌、膜下灌和地下渗灌等节水灌溉方式。北京市对设施农业灌溉提出了必须配备节水灌溉装置的要求。在实践

中，滴灌应用较为广泛。滴灌系统由水源工程、首部控制枢纽、输配水管网和灌水器（滴头）四部分组成。应用滴灌省水、省力、节能、增产的效果明显。但滴灌过程中由于物理、化学因素等，容易引起灌水器堵塞；而且滴灌只湿润部分土壤，加之作物的根系有向水性，可能限制根系的发展；当在含盐量高的土壤上进行滴灌或是利用咸水滴灌时，引起盐分积累的可能性较大。在露地条件下，可以通过降水淋洗盐分，在大棚条件下，可以通过沟灌与滴灌的结合使用解决盐分积累问题

**溢流处理。**设施农业雨水集蓄利用系统一般不接入污水处理系统，溢流的雨水一般通过坑井或者自然洼地就近渗透进入地下蓄水层或自然蒸发。

## 4. 雨水截污与处理

由于设施农业灌溉系统对水质的要求较高，因而需要通过各种雨水截污和处理措施提高雨水水质。

### 4.1 控制源头污染

源头污染控制是一种成本低，效率高的非点源污染控制策略（车伍等，2006）。因此，对设施农业雨水集蓄利用系统也应首先从源头入手，通过采取一些简单易行的措施，可以大大改善收集雨水的水质和提高后续处理系统的效果。源头控制应该包括以下一些方面：

#### 1. 加强环境管理

在设施农业雨水集蓄利用系统中，收集的雨水除来自人工集流面以外，还可能来自设施农业周边的细小水流。因此，应重视田间的环境管理，尽量减少各种垃圾和材料的堆放，改善雨水径流的水质。

#### 2. 及时清洁集流面、集流槽

在设施农业雨水集蓄利用系统中，集流面、集流槽的清洁程度对收集雨水的水质会产生明显的影响。应根据当地的降雨特点对集流面、集流槽进行清洁。北京地区应选择在4、5月份夏季降雨来临前对集流面和集流槽进行清理，能够较大程度的改善雨水水质。

#### 3. 定期清理集雨窖

应在雨季来临前对集雨窖进行一次清理，以提高存储雨水的水质。对于开敞式集雨窖，应尽量避免阳光直射造成藻类的大量繁殖滋生，否则不仅将影响到雨水的水质，还易造成后续过滤系统和灌溉系统失灵，增加了后续维护工作量。

## 4.2 雨水截污装置

为提高雨水水质，一般需设置沉淀池、过滤网和过滤器等配套设施，保证雨水的清洁。

### 1. 沉淀池

沉淀池主要用于减少径流中的泥沙含量，一般建于离集雨窖 1-2m 处，沉淀池的具体规格依径流特征而定。

沉淀池是根据水流从进入沉淀池开始，所携带的设计标准粒径以上的泥沙，流到出口时正好沉到池底来设计的（顾斌杰等，2001）。根据现有经验，池深 0.6-0.8m、长宽比 2 : 1 比较适宜。在北京地区，占地 1 亩集流面所配置的沉淀池的长度可取值 0.6m，沉淀池的长度需随着集流面面积的增加而适当增加。

此外，在泥沙含量较大时，可在沉淀池内用单砖垒砌斜墙，这样可延长水在池内的流动时间，有利于泥沙下沉。

沉淀池的池底需要有一定的坡度并预留出排沙孔。沉淀池的进水口、出水口、溢流口的相对高程通常为：进水口底高于池底 0.1-0.15m、出水口底高于进水口底 0.1m，溢水口底低于沉淀池顶 0.1m。

### 2. 过滤网

在沉淀池和集雨窖入水口处均应设置过滤网，以拦截汇流

中的大体积杂物，如枯枝残叶、杂草和其他较大的漂浮物。过滤网构造简单，可在铁板或薄钢板及其他板材上直接呈梅花状打孔，如图 7 所示。亦可直接采用筛网制成，如图 8 所示。但无论采取何种形式，其孔径必须满足一定的要求，一般不大于  $20\text{mm}\times 20\text{mm}$ 。

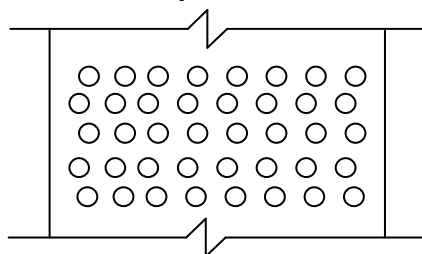


图 7 梅花状过滤网示意图

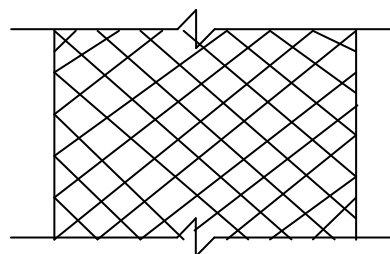


图 8 过滤筛网示意图

### 3. 过滤器

在设施农业雨水集蓄利用间接泵送系统中，雨水经蓄水池二次沉淀后，出水水质一般可满足灌溉系统的要求，无需加设过滤器进行过滤。但直接泵送系统的雨水通常含有粒径较大的杂质，可能会堵塞滴灌系统中的灌水器（滴头），一般需根据具体情况在水泵入水口或出水口处加设过滤器。过滤器的型号很多，用户可根据灌溉系统用水需求购买适合的过滤器。

## 5. 雨水回用

### 5.1 集蓄雨水的用途

设施农业雨水集蓄利用系统收集的雨水主要用于农业补灌，在水源较丰富的地区，也可以将雨水用于景观美化、水产养殖用水。但收集的雨水未经过消毒处理，不宜用于人畜饮用水目的。

### 5.2 取水输水技术

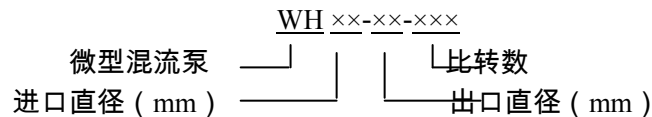
在多数情况下，设施农业雨水集蓄利用系统都需要依赖各种机泵和管道来完成取水输水工作。

#### (一) 水泵选择

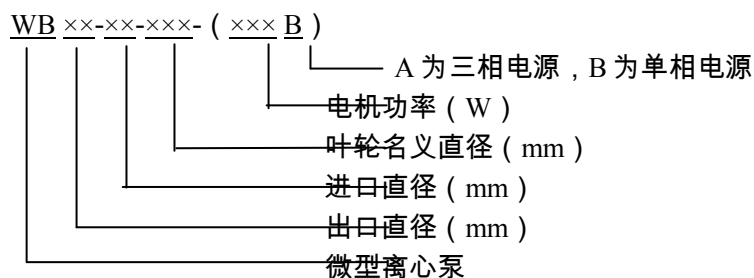
水泵的选型主要由系统所需要的流量和扬程确定。流量根据灌溉面积、灌溉定额、灌水周期及灌水历时等确定，扬程则根据系统的管网布置、供水流量、系统工作压力等来确定。

根据需要的流量和扬程可选择合适的水泵。雨水集蓄利用一般为小水源或微型水源，以下列出部分水泵的产品型号及性能，供选型时参考。

1. 微型水泵。主要有微型离心泵和微型混流泵，其泵型意义如下图：







引自顾斌杰等，2001

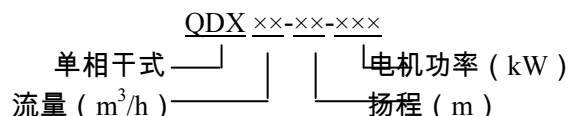
部分微型水泵的主要技术参数见表 1。

**表 1 微型泵主要技术参数**

型 号	流 量 ( m <sup>3</sup> /h )	扬 程 ( m )	效 率 ( % )	配用功率 ( W )	吸上高度 ( m )
WB40-40-80 ( 180B )	4.0	6.0	56	180	7.0
WB40-40-70 ( 250B )	10.0	4.0	62	250	5.5
WB40-40-80 ( 250B )	6.0	6.0	64	250	6.5
WB40-40-90 ( 250B )	4.0	10.0	58	250	6.5
WB40-40-95 ( 370B )	6.0	10.0	64	370	6.5
WB40-40-105 ( 550A )	8.0	12.0	65	550	6.0
WB40-40-100 ( 750A )	12.0	10.0	70	750	7.5
WB40-40-120 ( 1100A )	12.0	16.0	64	1100	7.0
WH-50-40-350	12.5	2.5	60	180	
WH-50-40-250	12.5	3.0	60	250	
WH-65-50-500	25.0	2.5	64	370	
WH-65-50-350	25.0	3.5	64	550	
WH-65-50-250	25.0	5.0	64	750	
WH-65-50-180	25.0	8.0	64	1100	

引自顾斌杰等，2001

2. 单相潜水泵。单相潜水泵分为干式泵 ( QDX 型 ) 和湿式泵 ( QDS 型 ) 两种，干式泵装有自动保护装置，能确保电机安全运行。单相潜水泵的使用条件为电泵潜入水下深度 0.5-5.0m；水温不超过 40℃；水中所含固体杂质的体积比不超过 0.1%，粘度不大于 0.2mm，PH 值 6.5-8.0；电源为 50Hz、220V 单相交流电源。使用范围为流量 1.5-25m<sup>3</sup>/h，扬程 3-30m，电机功率 0.18-0.75kW。其泵型符号意义如下：



### (二) 输水管道

为避免雨水的浪费，最好选用各类管道来输送收集的雨水。管道的品种、规格、型号多种多样，可根据实际情况和经济实力选择配套。集雨节灌常用的管道包括：

1. 塑料软管和消防涂塑软管：具有质量轻、易搬运、价格低、接头少、适应性强等优点，但易老化、不耐磨、寿命短。
2. 硬塑料管：具有水力性能好、耐腐蚀、安装施工容易、使用年限长等优点，但价格较高，抗老化性能较差，一般需埋入冻土层深度以下使用。
3. 铝管或铝合金管：具有水力性能好、质量轻、易搬运、耐腐蚀、连接方便、寿命长等优点，但价格高、抗冲击力差、怕砸、怕摔、不耐强碱性腐蚀。
4. 混凝土管：寿命长、接头密封性好、输水能力稳定，但质量大、运输不便、耐冲击性差、价格高。
5. 铸铁管或钢管：工作压力大、韧性强、不易断裂、管件

齐全、铺设简易、安装施工容易，但价格高、质量大、运输不便、材料来源困难、易腐蚀。

### 5.3 节水灌溉系统

利用雨水灌溉时，应符合以下原则和要求：

1. 利用集蓄雨水进行灌溉时应采用节水灌溉方法。对旱作农田可采用点灌、注水灌、坐水种、膜上穴灌、地膜沟灌、滴灌、微喷灌、小型移动式喷灌等，尽可能不使用漫灌方法。

2. 点灌、注水灌和坐水种可人工进行，有条件的地方也可采用开沟、播种、坐水、覆膜一次完成的坐水播种机。

3. 集雨滴灌工程设计应符合下列要求：

(1) 应符合 SL103—95《微灌工程技术规范》的要求，宜采用定型设计。

(2) 有地形条件的地方，宜采用自压滴灌。

(3) 大田集雨滴灌宜采用移动或半固定布置形式，果树及大棚的滴灌可采用固定布置形式。

(4) 地滤设备应采用目网式过滤器。有条件的地方可选用文丘里式或压差式化肥农药注入设备，严禁将化肥农药加入到水源工程中。

(5) 滴头的选择应考虑土壤、作物、气象等因素，应选择经过法定机构检测合格的产品。对砂质土壤宜选用流量不小于 3L/h 的滴头，对粘性土壤宜选用流量不大于 2L/h 的滴头。

4. 微喷灌工程应符合下列要求：

(1) 微喷灌工程应符合 SL103—95《微灌工程技术规范》的要求，设备应选用经过法定检测机构检测合格的产品。

(2) 微喷灌宜用于经济价值较高的作物，一般宜采用固定或半固定式布置。

(3) 微喷头的选择应考虑土壤、作物和气候等因素，宜采用折射式或旋转式微喷头。

#### **5.4 雨水集蓄灌溉制度**

1. 应采用非充分灌溉方法，以提高灌溉水生产率为目标。根据当地降雨和作物需水规律，分析确定影响作物生长关键缺水期及需要补充的灌溉水量，进行关键期补水灌溉的灌溉制度设计。

2. 宜采用雨季加大灌溉用水量原则，以提高集雨窖的集雨效率。应尽量避免将农田休耕期安排在雨季，扩大雨季雨水利用的时间范围，可将收集的雨水用于设施农业周边的农田或经济果林灌溉。

## 6. 集雨窖功能拓展

从投资和功能上看，集雨窖都是雨水集蓄利用系统的关键建筑物。在国内现有的雨水集蓄利用系统中，集雨窖一般只有蓄水这一单项功能，这种设计与中国大部分地区年内降雨分配方式并不协调。就北京地区而言，多年夏季 6-9 月份降雨量可占年降雨量 75%以上，集雨窖在雨季外的其它月份无法起到收集雨水的作用。为此，需要发挥集雨窖的多功能性，提高集雨窖的利用效率。

### 6.1 集雨窖蓄水功能

调蓄雨水是集雨窖最初的设计功能。集雨窖调蓄作用的大小既与当地的降雨量大小有关，又与集雨窖的规模及农业灌溉用水量有关。根据用水需求，集雨窖集蓄雨水有两个不同目标：一是满足全年灌溉用水，二是仅作为补灌或灌溉替代用水。在极干旱缺水地区，集雨窖一般要实现第一个目标。但北京地区虽然缺乏地表水，但大部分平原地区仍有较充足的地下水可使用。因此，集雨窖的目标应是替代优质地下水而非满足全年灌溉用水需求，这与我国许多干旱缺水地区的雨水集蓄利用的目的并不相同。

### 6.2 集雨窖生产功能

北京市设施农业雨水集蓄利用的实践经验表明，集雨窖从

当年 10 月份到次年 5 月份间基本处于无蓄水或蓄水不足的状态。鉴于此，对集雨窖进行合理设计开发其生产功能具备现实条件。

对于封闭式集雨窖，可将其分成蓄水室和工作室(见图 2-5、6)，并通过上部连接孔连通两室。在雨季，蓄水室蓄水空间不足，则雨水经蓄水室溢流进入工作室。此时，应将水泵置入工作室，优先使用工作室内存水。雨季过后，工作室内存水基本被用完，则可将水泵移置入蓄水室，而工作室则用于农业生产。集雨窖工作室具有温度、湿度稳定，无阳光照射的特点，特别适合种植多种耐阴经济作物，例如各种菌类、韭黄、芽菜等。用户可根据自身具备的种、养殖经验，充分利用集雨窖工作室，实现增产增收。

### 6.3 集雨窖综合利用

对于室内开敞式集雨窖，同样可根据 6.2 中所述实现集雨窖的生产功能，但用户需根据生产条件的变化对种植作物的选择做出相应改变。此外，开敞集雨窖上部留有充足的空间可资利用，可开展葡萄等藤蔓作物的种植，也可以开展空中无土栽培项目。开敞式集雨窖还可以用于水生动植物养殖，同时起到景观美化和水质净化的效果。总之，通过综合利用室内开敞式集雨窖，不仅能够实现集雨蓄水的目的，还可以实现增产、增收，促进都市农业旅游发展的目的。

## 7. 集雨窖规模优化

在确定设施农业雨水集蓄利用系统的集流面后，如何确定集雨窖的容积大小是系统设计中的难点。如果从提高集雨效率出发，则集雨窖容积越大越好；从减少系统建设的投资出发，则集雨窖容积应尽可能小。因此，集雨窖规模的确定需从雨水集蓄利用系统的功能上进行深入分析。

集雨窖规模优化的原则主要包括：

### 7.1 集雨效率最大原则

按照集雨效率最大原则，雨水集蓄利用系统尽可能收集所有雨水径流，集雨窖不发生溢流现象。此时，集雨窖的大小可根据当地多年单日最大降雨量或单月最大降雨量来计算。例如，北京地区 1984 年单日最大降雨量为 156mm（1978 年-2008 年单日最大），假定集流面面积为  $2000\text{m}^2$ （约相当于 3 亩地的面积），按照径流系数 0.9 计算，则集雨窖规模为： $0.156 \times 2000 \times 0.9\text{m}^3$ ，即  $280\text{m}^3$ 。又例如，北京地区 1994 年 7 月份单月降雨量为 386mm（1978-2008 年单月最大），则对应的集雨窖规模为： $0.386 \times 2000 \times 0.9\text{m}^3$ ，即  $695\text{m}^3$ 。按照此原则设计的集雨窖规模一般都偏大或者严重偏大，年收集的雨水量多于灌溉需水量。在实践中该原则极少被采用。

## 7.2 满足周年灌溉用水原则

在雨水作为唯一水源的地区，雨水集蓄利用系统的设计应尽可能满足全年的灌溉用水，否则会导致作物缺水而减产甚至绝收。此时，集雨窖大小需根据年用水量和集雨能力进行设计。灌溉用水量与当地的灌溉制度紧密联系，灌溉用水量越大，则对应的集雨窖容积越大。集雨窖的集雨能力由多种因素共同作用所决定，这些因素包括降雨量及其年内分布、灌溉制度、集流面面积、径流系数以及集雨窖的大小等。国内外有许多方法用于计算集雨窖的集雨能力及集雨窖满足灌溉用水的容积大小。根据北京市农业技术推广站 2006 年-2008 年的试验研究结果，对于设施农业雨水集蓄利用系统，当集雨窖容积为  $100\text{m}^3$ /亩左右时，可基本满足设施农业全年灌溉用水所需。

## 7.3 集雨成本最低原则

作为一种新的水资源开发利用技术，雨水集蓄利用技术能否得到大范围推广关键在于雨水收集利用的成本。集雨成本可用收集利用单位雨水量的资金投入量表示，单位元/ $\text{m}^3$ 。集雨成本越低，则用户对该技术的接受意愿越强。雨水集蓄利用的成本包括初期投资、运行成本和维护成本 3 部分。其中，初期投资占总投资的绝大部分，而集雨窖的投资一般又可占初期投资的 80%以上。北京设施农业雨水集蓄利用的试验研究表明，随着集雨窖容积的增大，集雨成本先减小，后增加。当集雨窖容积为  $30\text{m}^3$ /亩时，集雨成本为 1-1.5 元/ $\text{m}^3$ 。随着集雨窖容积增加，



雨水收集的成本也随之增加，当集雨窖容积为  $100\text{m}^3/\text{亩}$  时，集雨成本上升为约  $3\text{元}/\text{m}^3$ 。因此，按照集雨成本最低原则，集雨窖的容积应设计为  $30\text{-}50\text{m}^3/\text{亩}$  较为适宜。

#### 7.4 效益最大原则

设施农业雨水集蓄利用系统效益最大化有两层含义：一是全社会角度的效益最大化；二是用户（农户）角度的效益最大化。用户从集蓄利用雨水中所获得的收益是十分有限的，这是因为：其一、雨水集蓄利用系统的建造成本很高，根据北京市 2006 年、2007 年的实际建设情况，容积  $50\text{m}^3$  集雨窖的建造成本就达 2 万元左右；其二、北京农业灌溉用水至今仍是免费的，即农民无需交纳水资源费，而仅支付农用机井管理费和抽水电费。雨水集蓄利用所节约的费用与高昂的建设投资相比，显然是很微小的。因此，设施农业雨水集蓄利用技术的推广一靠引援，即增加政府的资金补贴；二靠增潜，即发挥集雨窖的多功能作用。

科学评价设施农业雨水集蓄利用的成本和效益需建立在准确评价系统收集利用雨水的效率之上。鉴于此，本手册引入 YBS 取水模式（Chu 等人，1997，1999；Liaw & Tsai，2004；Mitchell，2007）用于模拟计算集雨窖的水流量过程，从而确定不同集雨窖规模对应的集雨利用效率。

YBS（yield before spillage）取水模式是假定先取水后溢流的集雨窖水量变化模式。在 YBS 取水模式中，先确定集雨窖水流量变化的步距，即特定的时间段，一般为 1 小时、1 天、1 星

期或者 1 月等。一个步距内流量、水量变化的先后顺序为：上一步距末期集雨窖内水存量-流入窖内水量-需水量-实际取水量-集雨窖溢流量-本步距末期集雨窖内水存量。其运算公式如下：

$$Y_t = \min \begin{cases} D_t \\ S_{t-1} + Q_t \end{cases} \quad (1)$$

$$S_t = \min \begin{cases} S_{t-1} + Q_t - Y_t \\ V \end{cases} \quad (2)$$

式中  $Y_t$  为集雨窖取水量 ( $m^3$ )， $S_t$  表示  $t$  时集雨窖水量 ( $m^3$ )， $Q_t$  为  $t$  时流入集雨窖的水量 ( $m^3$ )， $D_t$  表示  $t$  时流出集雨窖的水量 ( $m^3$ )， $V$  表示集雨窖的有效容积 ( $m^3$ )。

在 YBS 取水模式运算中  $t$  时取水量等于  $t$  时需水量以及  $t-1$  时末期集雨窖水存量和  $t$  时的流入量加和之间的最小值。如果在取水后，集雨窖内水量仍超过其有效容积，则多余的水量通过溢流排出集雨窖。YBS 取水模式流程可参见下图。

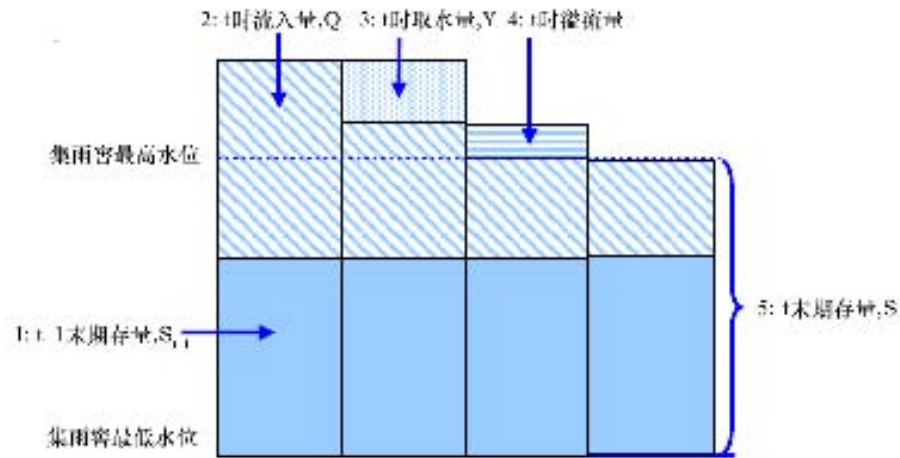


图9 YBS取水模式图

以 YBS 取水模式为计算方法，假定 1 亩温室对应的集雨窖容积分别为 30m<sup>3</sup>、50m<sup>3</sup>、80m<sup>3</sup>、100m<sup>3</sup> 和 120m<sup>3</sup>，利用北京市气象站 1989 年-2008 年的日降雨量数据以及北京地区典型温室作物（黄瓜和番茄）的灌溉规律对各规模集雨窖的雨水收集、存储和利用过程进行逐日模拟，模拟结果见表 1。

表 1 1989 年-2008 年设施农业雨水集蓄利用系统水流量模拟结果

类型	集雨窖容积 ( m <sup>3</sup> )	雨水利用量 ( m <sup>3</sup> )	年均集用量 ( m <sup>3</sup> )	收集效率 ( % )	替代效率 ( % )
1	30	3589	179	60.49	71.21
2	50	3981	199	67.10	78.99
3	80	4441	222	74.85	88.12
4	100	4637	232	78.16	92.00
5	120	4733	237	79.77	93.91

从上表可以看出，设施农业雨水集蓄利用系统的雨水集用量并不是随着集雨窖容积的增大按比例增加。实际上，集雨窖容积越大，单位容积的集用雨量越小，并且呈现快速递减趋势。可见，在无需满足周年灌溉用水需求时，集雨窖容积小则相对越经济。当然，当集雨窖容积为 100m<sup>3</sup>/亩以上时，雨水替代地下水的比例达到 90%以上，可基本实现满足温室作物种植周年灌溉用水需求，这一结论与 7.2 中的实际观测结果十分吻合。

在集雨窖水流量过程模拟计算结果基础之上，对北京设施农业雨水集蓄利用工程的成本效益做进一步研究，结果表明：在北京严重缺水的现状下，雨水集蓄利用的社会效益极为显著。而用户效益由政府资助额及集雨窖的功能开发强度决定。在政府提供初期投资 70%左右的资助额，且集雨窖用于农业生产时，

集雨窖规模为  $100\text{m}^3/\text{亩}$  的用户效益显著；在政府提供初期投资 50% 左右的资助额，且集雨窖用于农业生产时，集雨窖规模下降为  $30\text{m}^3/\text{亩}$  时的用户效益显著。

综上所述，集雨窖规模的优化是设施农业雨水集蓄利用系统设计的核心部分，其设计原则需根据特定建设目的来确定。就北京地区而言，集雨窖规模优化应根据具体情况和需求，依据 7.2、7.3 和 7.4 所述原则进行。

## 8. 施工与设备安装

### 8.1 集流与蓄水工程施工

(一) 使用的建筑材料应符合下列要求

1. 水泥应符合 SDJ207-82 《水工混凝土施工规范》的规定，采用检测合格的产品。水泥标号不宜高于 425 号。
2. 砂料应质地坚硬、清洁、级配良好，宜采用中砂，含泥量应小于 3%。
3. 粗骨料应质地坚硬，不得采用软弱、风化骨料；粒径应符合《水工混凝土施工规范》的规定，含泥量不大于 1%。
4. 砌筑集雨窖使用的石料应坚硬完整，不得使用风化或软弱岩石；砌筑时应将石料上的泥土、杂物洗刷干净。
5. 搅和用水应符合《水工混凝土施工规范》中的相关规定。

(二) 集雨窖挖掘应符合下列要求

1. 基础应置于完整、均匀的地基上。集雨窖开挖时如发现基土裂缝宽度大于 0.5cm 且为通缝，应另选工程地址。不宜在地基条件不均匀或地下水水位高的地方以及破碎基岩上建蓄水工程。
2. 集雨窖开挖中随时注意土基或岩石有无变形，及时支护，防止塌方。雨天施工应搭建遮雨棚，基坑周围应设排水沟。
3. 集雨窖土方开挖宜从中心向四周扩大，当基土干密度低于  $1.5\text{t/m}^3$  时，开挖直径应比设计尺寸小 6-8cm，预留部

分土应击实砸平。

4. 基岩开挖后如发现有裂缝，应用混凝土或水泥砂浆灌填。开挖采用爆破作业时，应采取打浅孔、弱爆破的方法。

### (三) 集雨窖建设需注意下列事项

1. 预留检测井，设置便于出入的单直梯，检测井需加盖。
2. 集雨窖封顶应低于地表 50cm，集雨窖上部覆盖 50cm 的土层，以防止集雨窖冬季冻裂。

### (四) 其它注意事项

1. 集流槽底部应尽量平滑，且留有一定的坡度，以加快雨水径流速度。温室膜面底部应预留一定的宽度，以便与集流槽相连接，避免膜面与集流槽之间出现缝隙。
2. 沉淀池出水口（进入集雨窖）底部应与进水口（与集流槽相连接）底部相平齐或略低，以便起到应有的沉淀泥沙效果。
3. 蓄水池底部距地面的高度应至少大于 1m，随着温室长度发生变化，蓄水池距地面的高度应相应变化，当温室长度超过 50m 时，蓄水池距地面高度至少 1.5m 以上；蓄水池的出水口应高于蓄水池底部 20-30cm，以避免池内沉淀物进入灌溉管道。

## 8.2 灌溉设备安装

1. 滴灌、微喷灌和小型移动式喷灌机的施工安装应符合 SL103-95 的要求。
2. 管网施工安装应符合下列要求：

- (1) 按设计规定开挖管槽槽底，应当整平清除杂物；
- (2) 铺设聚乙烯半软管时不得扭折或随地拖拉。管道安装宜由首部枢纽起沿主、干管槽向下游逐根连接，可采用加温套接或专用套管承插连接。移动式的干、支管线路应平顺地铺在地表垄中；
- (3) 管网安装后应经冲洗试压后方可回填管槽。

### 8.3 其它设备安装

1. 控制装备。较大面积的灌溉系统一般都采用分区轮灌。采用手动控制时，每一轮灌区均应安装球阀、闸阀等阀门。若采用自动控制，每一轮灌区均应安装一个或几个电池阀，电池阀由灌溉控制器控制，并能根据实际灌溉要求随时修改，以满足不同作物种类和不同生长期的需水要求；
2. 过滤装置。为防止系统堵塞，灌溉水必须经过净化处理。过滤装置主要由沙砾式、离心式、网式和叠片式过滤器组成。沙砾过滤器和离心式过滤器用于大中型系统的初级过滤；筛网过滤器在水质良好时用于末级过滤。当水质不良时可接在沙砾过滤器或离心式过滤器之后作为末级过滤器使用，一般选在 120 目以上的规格。

## 9. 设施维护与管理

### 9.1 集雨窖的维护

#### 1. 集雨窖正常运行的基本要求

- (1) 在正常降雨年份，保证正常蓄水，发挥节水灌溉效益；
- (2) 蓄水后渗漏量小。即夏秋季蓄满水后，到第二年春夏灌溉时，蓄水位下降不超过 0.6m；
- (3) 集雨窖内淤积泥沙厚度不超过 0.5m；
- (4) 集雨窖完好无损，防渗层无脱落现象。

#### 2. 集雨窖管护工作的主要内容

- (1) 适时蓄水。下雨前要及时覆盖温室膜面，整修清理集流槽、沉淀池，清除拦污栅前的杂物，疏通进水管，以便顺利的将雨水引入集雨窖。当集雨窖蓄水至上限时要及时关闭进水口，防止超蓄造成集雨窖坍塌；
- (2) 检查维修工程设施。要定期对集雨窖进行检查维修，保持集雨窖完好无损。蓄水期间要定期观测水位变化情况，并做好记录。发现水位非正常下降时，分析原因，以便采取维修加固措施；
- (3) 保持窖内湿润。集雨窖建成后，先灌入一定数量的水，起到保养集雨窖的作用。具有防渗功能的集雨窖，窖内必须留存一定数量的水，保持窖内湿润，防止干裂而造成防渗材料脱落；



(4) 做好清淤工作。每年蓄水前要检查窖内淤积情况，当淤积轻微时（淤深小于 0.3m）可不必清淤，当淤积大于 0.3m 时要及时清淤，否则将影响蓄水容积和雨水水质。清淤方法可因地制宜，可采用污水泵抽泥或人工窖内掏泥等方式；

(5) 建立集雨窖归户管理的管护制度，贯彻谁建、谁管、谁修、谁有的原则。

### 3. 检查渗漏的方法

(1) 窖内观察。当集雨窖蓄水后水位下降很快，说明集雨窖的防渗质量存在严重问题，应下窖仔细检查窖底和窖壁各部位，是否有裂缝、洞穴发生，标出位置并分析渗漏原因。如窖内蓄水全部漏完，说明窖底渗漏；如窖内仍有少量存水，那主要是窖壁渗漏；

(2) 蓄水观测。雨季集雨窖蓄满水后，每天应定时观测窖内水位，做好记录，从水位下降速度中找出渗漏原因和防渗问题。

### 4. 处理渗漏的主要措施

(1) 窖底渗漏。多为基础处理不当、地基选择欠妥或防渗处理达不到设计标准。一般表现为孔洞渗漏或地基产生了裂缝。此种情况必须翻拆，将窖底混凝土拆除，加固夯实基础，再按设计要求对窖底进行混凝土浇筑和防渗处理。若是底部混凝土浇筑不密实，配合比不当，表面成为砂面，产生整体慢性渗漏，这要进行加固处理，然后进行防渗处理，同时要注意处理好窖底、窖壁整体结合的防渗工作；

(2) 窖壁渗漏。窖壁渗漏的主要原因包括窖体四周土质不密实或有树根、陷洞等，或是防渗处理没有按照设计要求施工，防渗材料使用不当或防渗层的厚度不足等。处理窖壁渗漏的措施有：一是密实窖体四周的土质；二是将窖壁用清水刷洗，清除泥土后用 1:2.5 的水泥砂浆墁壁一层，厚度 1.5cm，最后用水泥防渗浆刷面 3 次，并注意洒水养护；

(3) 出水管渗漏。多是出水管与窖壁结合部位渗漏，主要是止水环布设欠妥或施工处理不细致。止水环应布设在窖内井水管首部，管外壁紧套二道橡胶垫圈，出水管四周用碎石混凝土浇筑，窖壁在进行墁壁和防渗处理。出水管的末端要用砌砖修建，防止管道摇晃，避免出水管与窖体之间产生裂隙。

## 9.2 蓄水池的维护

### 1. 蓄水池正常运行的基本要求

- (1) 小型农用蓄水池既具有蓄水功能，又具有二次清洁雨水及满足重力滴灌的功能；
- (2) 在正常平水年，池内要蓄满水，保证节水灌溉需要；
- (3) 池内蓄水后，渗漏损失小，封闭式蓄水池和集雨窖蓄水要求基本相同；
- (4) 池内泥砂淤积轻微，当年淤积厚度不超过 0.3m；
- (5) 池体完好无损，池底距离地面至少 1m 以上。

### 2. 蓄水池管护工作

(1) 适时蓄水。蓄水池应蓄灌结合，多次交替，充分发挥蓄水与节水灌溉相结合的作用；

(2) 检查维修工程设施。要定期检查维修工程设施，蓄水前要对池体进行全面检查，蓄水期要定期观测水位变化情况，作好记录。开敞式蓄水池没有保温防冻设施，冬季尽量不蓄水，秋灌后要及时排除池内积水，防止冬季池体冻胀破裂。封闭式蓄水池除进行正常的检查维修外，还要对池顶保温防冻铺盖和池外墙填土厚度进行检查维护；

(3) 及时清淤。开敞式蓄水池可结合灌溉排泥，池底滞留泥沙用人工清理。封闭式蓄水池清淤难度较大，除利用出水管引水冲沙外，只能人工从检查口提吊，一般应保证一年清淤一次。

### 9.3 温室膜面维护管理

在温室膜面雨水集蓄利用系统中，温室膜面主要用于雨水的汇流，应采取各种措施提高膜面的径流效率。

(1) 维护膜面的完整，根据膜面的完好程度进行更换，一般1-2年更换一次；

(2) 降雨前应及时关闭温室通风口，做好温室膜面和集流槽的无缝连接，提高径流效率；

(3) 冬季要做好温室膜面的保温措施，降雪后应及时清扫，也可撤下膜面保存，避免膜面受冻胀裂。

## 9.4 集流槽及沉淀池的维护管理

1. 集流槽的导流效率对雨水的收集效率起着至关重要的影响。应在雨季前做好集流槽的疏通工作。雨水集流过程一般携带较多的泥沙，平时的农业生产过程中也很容易将泥沙堆积于集流槽中。因此，集流槽的清理工作必须及时到位，否则将严重影响雨水径流，降低雨水收集的效率。由于集流槽是开敞式的，较容易在冬季雨雪后被冻裂，应做好集流槽的冬季保暖工作，延长集流槽的使用寿命。

2. 与集流槽一样，沉淀池一般也是开敞式结构。对沉淀池的管护工作主要包括：

- (1) 每次引蓄雨水前及时清除池内淤泥，以便再次发挥沉沙作用；
- (2) 冬季封冻前排除池内积水，使沉淀池免遭冻害；
- (3) 及时维修池体，保证沉淀池完好；
- (4) 定期检查过滤网的完好程度，发现过滤网破损应及时更换。

## 10.参与、合作与管理机制

作为一项新的水资源开发利用技术，北京设施农业雨水集蓄利用目前处于初期的试验和示范阶段。但是，北京严重缺水的现状和设施农业快速发展的形势都使这一新技术越来越得到各方的重视。水资源管理部门从深度挖掘本地水资源角度出发，参与到设施农业雨水集蓄利用的工程建设当中；农业部门从提高农业水资源的利用效率角度，将设施农业雨水集蓄利用与节水灌溉系统相结合，以减少地下水的开采；普通农户和各类型的农业园区为了减少因地下水持续下降而日益增长的水费支出，积极参与到新技术的应用当中。

然而，要使雨水集蓄利用技术从示范向大范围推广，目前还存在不小的困难，集中表现在：1.参与各方缺乏合作与交流；2.未建立统一规范的技术标准；3.新技术应用者缺乏必要的信息、资金等；4.工程及资金的监督管理缺失；5.宣传工作不到位，长效的利益协调机制没有建立等。鉴于此，必须以地方政府部门为主导，建立雨水集蓄利用利益群体之间的参与、合作与管理机制，促进设施农业雨水集蓄利用技术的推广。

### 10.1 参与、合作的主要原则

(1) 广泛性：应汇集各方力量共同致力于设施农业雨水集蓄利用技术的研发和推广：包括加快科研单位的科研成果转化，广泛建立试验和示范基地扩大宣传力度，特别要注重发挥农民和

各种农民组织的作用，在新技术的研发、试验、规划和推广的各个阶段都应当将他们纳入到参与与合作的过程中；

(2) 政府部门主导性。雨水集蓄利用是外部性很强的一项应用性技术，技术实施者往往无法从中获得非常良好的直接收益，但技术的应用却可以带来显著的社会效益和环境效益。对于这样一种外部性很强的公益性技术的推广，政府部门应当起到主导作用，通过各种措施和手段扶持新技术的推广应用；

(3) 多方共赢性。获利是参与各方合作的经济基础。雨水集蓄利用技术的应用可产生微观和宏观层面的效益，应当做好两个层面之间的利益协调，使社会、技术开发者和技术应用者都能从中获得收益；

(4) 透明性。在参与的各方中，政府部门往往掌握着较多的资源和信息，而用户则一般都处于较为不利的位置。这种状况会影响到合作的成效。因此，应做好信息资料的透明工作，这些资料对于所有参与者来说，应当明确和便于理解。

## 10.2 参与工程规划与设计

设施农业雨水集蓄利用工程的规划与设计应当基于对应用者（农户）需求的了解。工程的实施应当解决农业灌溉的缺水问题，还可以为农户增加收益。当前，北京设施农业雨水集蓄利用工程的规划与设计一般都由政府相关部门独立完成，缺乏与用户和其他参与者之间的协作与交流。这种模式可能引起很多问题，例如工程规模问题、工程选址问题、工程成本问题和工程质量问题等。因此，应确保参与各方参与到规划与设计过

程中：雨水集蓄利用者提出对工程的要求和可能遇到的各种问题，研究机构通过研发和引入新技术来尽可能满足用户提出的各种要求，政府部门根据这些信息，借助专业的规划和施工单位的力量完成工程的规划和设计。通过这样的合作，才能调动参与各方的积极主动性，解决工程实施中可能遇到的各种问题，逐步形成适合当地特点的设施农业雨水集蓄利用集成新技术。

### 10.3 培训与学习

尽管雨水集蓄利用技术是一项简单易行的技术，但在规划、设计、施工、运行和维护等各个环节都需要用户具备一定的技术水平才能顺利的开展。用户缺乏对设施农业雨水集蓄利用技术的认知可能会引起以下问题：

1. 在工程规划过程中，可能会出现选址不当、工程规模设置不合理和与现有灌溉系统不配套的问题，从而影响到工程的质量、成本以及后期的运行和维护管理，问题严重时可能会导致工程无法正常投入使用而被遗弃。例如北京通州区某基地 2006 年建立的一个设施农业膜面集雨利用工程，由于集雨窖建设质量低下，渗漏水严重，工程建成后从没有真正投入使用过；
2. 在工程建设过程中，农户需了解如何减少工程建设的成本，提高工程建设的质量，合理安排工程建设的时间等。要做好这些事项，农户需要经过专业的培训才能得以实现；
3. 在工程运行和维护过程中，如处理不当，工程的集雨利用效率会降低，或者由于运行维护费用过高使用户不得不放

弃继续收集利用雨水。因此，在工程建成后的使用寿命期内（一般预期寿命期为 25 年-35 年），如何提高运行效率，降低运行维护成本是需要着重了解的内容。

针对用户对雨水集蓄利用技术的认知缺失可能引发的各种问题，开展农户/用户的专业化培训和学习是十分必要的过程，培训和学习的目的包括：一是提高设施农业雨水集蓄利用系统的雨水集蓄利用效率，有效降低雨水利用的成本；二是增强雨水利用的安全性，避免雨水利用可能导致的各种风险；三是扩大设施农业雨水集蓄利用的影响力，体现设施农业雨水集蓄利用技术的优越性。

### **培训对象**

设施农业雨水集蓄利用用户和潜在用户。潜在用户的甄别应建立在对当地水资源情况和农业用水情况的了解基础之上，例如地表水、地下水缺乏或者地下水水位下降十分迅速的地区应作为重点潜在区；

### **培训形式**

采取基础知识课程培训和用户相互交流相结合的方式进行。可建立专门的设施农业雨水集蓄利用田间学校，农民/用户通过在田间的相互学习和交流，总结经验教训，并邀请各方专业技术人员共同解决具体实施过程中遇到的各种问题。

### **时间安排**

农户/用户的培训学习活动应定期的开展，应有针对性的安



排在雨季前、雨季中和雨季后，冬半年可减少或取消培训和学习活动。需注意避开在农忙时节开展活动。

### **学习记录**

用户/农户培训学习活动应做好对过程的记录，以便最终能够整理成册，作为今后学习的经验和教材，为进一步推广设施农业雨水集蓄利用技术打下良好的基础。

## **10.4 工程管理政策**

设施农业雨水集蓄利用并非一家一户能够单独完成好的，这一技术的推广应用在很大程度上有赖于当地政府的积极协助。北京自 2005 年以来的实践经验表明，规范设施农业雨水集蓄利用的管理，落实相关政策措施对顺利推进农业雨水集蓄利用事业至关重要，主要包括以下内容：

1. 加强雨水集蓄利用的科学研究，注重研究成果与实践相结合，避免雨水集蓄利用工程建设的盲目性。一方面，北京市大力开展雨水集蓄利用示范工程的建设，另一方面，雨水集蓄利用工作的开展又缺乏理论依据和指导方法。致使许多工程建而不用，成为形象工程。因此，必须加强雨水集蓄利用的科学研究，加强国际交流与合作，切实解决技术推广中面临的关键性问题。例如工程选址问题、工程设计问题、雨水水质问题和工程规模问题等；

2. 适时制定设施农业雨水集蓄利用工程建设管理办法和资金使用管理办法。随着北京市设施农业雨水集蓄利用工程的

逐步推进，将从最初的示范、试验阶段过渡到全面实施阶段，此时，需及时的制定相关管理办法，确保雨水集蓄利用工程的建设质量，管好用好国家补助资金；

3. 加强雨水利用信息平台 and 网站建设，提供用户根据具体情况设计最优雨水利用模式的平台。在当今计算机网络高度发达的社会，应当充分利用网络的力量向用户提供各种与雨水利用相关的信息。通过该平台，用户可模拟集蓄利用雨水的潜力和效益，从而合理选择设施农业雨水集蓄利用模式；

4. 大力推动雨水集蓄利用产业化发展，建立相关产品的市场化标准，通过减免税收等优惠政策鼓励产品的研发和生产。当前，北京市雨水集蓄利用相关产品还十分匮乏，也缺乏统一的标准和价格，使用户在购买、安装和维护过程中均遇到较多的困难。作为一项环保产业，雨水集蓄利用产业应具有十分广阔的市场前景；

5. 加强雨水集蓄利用的宣传力度，通过电视、报纸、网站等各种新闻媒介推广雨水集蓄利用新技术，通过广泛建立雨水集蓄利用示范点展示新技术。为了强化雨水集蓄利用示范工程的示范和教育作用，应特别注重雨水利用示范点的选址标准：一是注重示范工程的宣传效果，应尽量将工程建在人群来往频繁的示范点，例如大型的农业园区；二是注重示范工程的实际效果，应尽量将工程建在水资源较为短缺的区位。

6. 加强政府扶持力度，确保雨水利用多方共赢。在集蓄利用雨水缺乏利益驱动力的情形下，政府资金扶持是必不可少的。资金扶持的力度应根据区位条件不同而有所差别，但至少要有确

保用户集蓄利用雨水能有利可图；

7. 合理制定农业用水水费，提高农业用水效率。北京市农业用水效率低和农民无需支付水资源费之间存在矛盾。制定农民可承受的水资源费标准和提供政府资金支持双管齐下，可有效调动农民集蓄利用雨水的积极性；

8. 尽快制定雨水水质标准，建立水质评价体系。目前，北京市农民对收集的雨水是否适合灌溉仍存在一些争议，甚至出现雨水集而不用的现象。究其原因是缺乏权威公认的雨水水质标准。因此，必须尽快制定出台相关的水质标准，规范雨水收集、存储、处理和利用全过程；

9. 适时提供农业生产技术支持，增加农民收入。对于设施农业雨水集蓄利用系统而言，集雨窖的多功能利用能有效提高农民的收入。因此，政府应该提供相关的技术支持开发利用集雨窖的地下空间，增加农民收入，提高整体效益；

10. 提高天气预报服务水准，及时向用户提供降雨信息。对设施农业雨水集蓄利用系统而言，收集雨水和农业生产之间存在一定的矛盾。尤其在夏季高温多雨季节，因作物生长需求，需揭开膜面以控制设施内的温度。在缺乏及时、准确天气信息的情形下，往往会导致膜面没有被及时覆盖，雨水无法收集的现象发生。准确的天气信息对于雨水的收集十分重要；

11. 合理制定农业耕作和灌溉制度，加大雨季的雨水利用量。设施农业耕作制度的安排决定着灌溉用水量，而灌溉用水规律又影响着雨水集蓄利用系统的集雨利用效率。尤其是在夏季高温多雨季节，农业用水需求量越大，则雨水集蓄利用系统

的雨水收集利用效率越高。因此，科学合理制定设施农业耕作制度对于提高雨水集蓄利用效率十分重要。

## 11.案例介绍

### 11.1 怀柔区北房镇雨水集蓄利用示范点

为探求水务管理上的“示范性推广”机制，2006 年联合国教科文组织水教育研究所 ( UNESCO-IHE ) 发起了 SWITCH 项目。在北京，SWITCH 项目选择怀柔果蔬合作社作为合作伙伴，并联合北京市农业技术推广站共同投资建立一个设施农业雨水集蓄利用示范点，研究农业集雨利用的效率、效益及其推广机制。

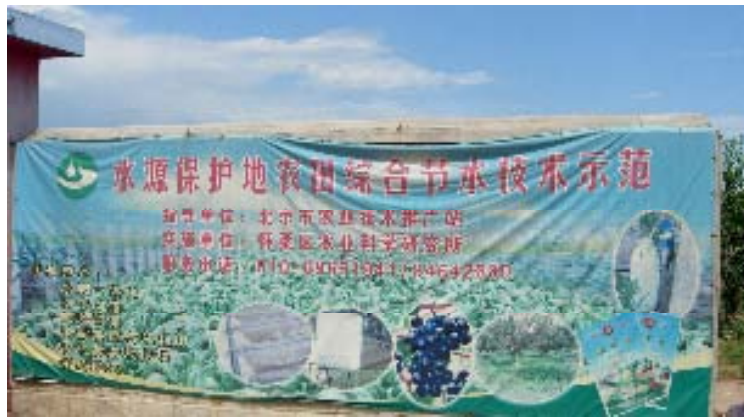


图 10 北京市怀柔果蔬生产合作社

#### **示范点概况**

设施农业雨水集蓄利用示范点位于北京市怀柔区北房镇安各庄村，示范点农业园区用地共 1.67 hm<sup>2</sup>，由农户独立承包经营。园区包括 5 个温室，每个温室长 80m，宽 8m，占地面积 640m<sup>2</sup>。

2007 年以前，农业园区主要专业种植葡萄，获得了显著的效益。2007 年后，农业园区主经过培训学习，掌握了蘑菇种植技术，逐步从葡萄种植向蘑菇生产转变，以获得更佳的农业生产收益。目前，该园区除了自己生产蘑菇以外，还为其它农户提供蘑菇菌种和蘑菇生产技术指导，取得了不错的成效。

### **模式改进**

北京已建的设施农业雨水集蓄利用系统存在多种类型( 详见本手册 3. 设施农业雨水集蓄利用技术体系)。但从功能上来看，大部分只注重集雨窖的雨水集蓄功能，而并没有开发集雨窖的其它功能。究其原因：一是当地政府( 工程资助方) 与农民( 用户) 之间缺乏必要的交流；二是集雨窖多功能作用的实现既有赖于农民具备特定的生产技术，有可能增加系统建设的初期投资，从而阻碍了集雨窖多功能作用的实现。

怀柔区示范点雨水集蓄利用系统对普通模式( 只具备集蓄水功能) 进行了改进，联合 5 个温室收集雨水并存储于 1 个地下集雨窖，并将地下集雨窖分隔成 4 个室。每室容积  $125\text{ m}^3$ ( 长 10 m，宽 5 m，高 2.5 m)，其中与沉淀池相连接的室作为“常年蓄水室”，另外 3 个室作为“工作室”，亦或是“备用蓄水室”。因规模效应，与单温室单窖模式相比较，新型雨水集蓄利用系统集雨窖单位蓄水容积的建造成本低；地下集雨窖 4 个室在雨季可全部用于收集存储雨水，进入干季，常年蓄水室存储雨水以备来年春旱时灌溉所需。而工作室则在无蓄水的情况下用于农业生产，充分发挥雨水集蓄利用系统的多功能性。

## 示范点水文地质条件

示范点可用水资源包括地下水和雨水。近几年，怀柔区的地下水水位快速下降，从2000年的不到10 m下降到2007年超过20 m。另据农户反映，目前示范点周边地下水水位已经接近40 m，使得农业使用地下水的成本急剧增加。

因此，通过各种人工措施将雨水收集利用，既可以降低农业用水成本，又有益于减缓当地地下水水位的下降。根据2008年4—9月示范点附近一自然降雨观测站的数据：2008年4—9月共降雨22次，降雨量总计583 mm，略高于怀柔区多年平均降雨量约10%。其中7、8月份各有5次降雨，8月份降雨量最大，达到151 mm（图3）。全年降雨强度最大的一次发生在8月10日，单日降雨量为56.5 mm。当年4-9月份以外的其它月份降雨量不到全年降雨量的10%。这种降雨年内分布极不均匀的特点表明，如不能对雨水进行有效的收集存储，雨季的大部分降雨将会以蒸发或以无效径流的方式流失。

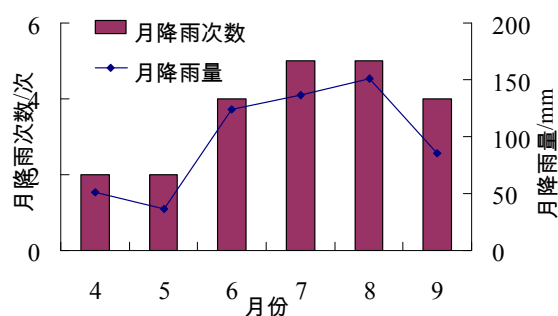


图 11 2008 年 4—9 月示范点周边降雨情况

示范点所在地的土壤为潮土或褐潮土，母质为潮白河近代冲

积物，土壤组合为砂土、面砂土。受潮白河冲积母质影响土壤中碳酸钙含量较低（多为 1.5—2.0%），养分含量较高，有机质 0.8—1.3%，粘性土可达 1.5%（文献，北京自然地理，p240-250）。

### 工程规划与建设

#### 1. 水量平衡分析

水量平衡分析主要以温室内灌溉用水为主，兼顾温室外农业用水。园区开展的主要农业活动见表 2。从表中可知，2008 年园区 5 座温室共用水约 790m<sup>3</sup>，温室外用水 260m<sup>3</sup>，农业生产年用水总计 1050m<sup>3</sup>。

2008 年后，该园区的种植结构又发生了变化。取消了原有的葡萄种植，将蘑菇种植面积扩大为 3 个温室。这样，园区年农业用水量出现了明显的增加，由 2008 年的 1050m<sup>3</sup> 增加至 2009 年的 1430m<sup>3</sup>。

表 2 2008 年示范点园区农业生产活动及用水

作物种类	面积( m <sup>2</sup> )	时间	灌溉方式	地点	用水量( m <sup>3</sup> )
葡萄	1280	4-10 月	漫灌	温室内	220
梨	1280	4-9 月	漫灌	温室外	180
西红柿	640	4-7 月	滴灌	温室内	150
白菜	640	7-11 月	滴灌	温室内	120
蘑菇	640	4-12 月	喷灌	温室内	300
蘑菇制种		4-12 月	其它	温室外	80

#### 2. 工程建设

示范点雨水集蓄利用工程建设开始于 2007 年年末，2008 年年初雨季前完成。工程共挖土方 882m<sup>3</sup>，外运土 763m<sup>3</sup>，回填土 115m<sup>3</sup>。集雨窖采用砖砌、钢筋混凝土结构，集雨窖底部和窖壁



进行了防渗处理。集雨窖建有检查井，留有坡道入口，以便充分利用地下空间。为便于开展蘑菇制种工作，集雨窖顶部全部采用水泥浇筑抹平，作为蘑菇制种生产空间。集流槽共 5 条，每条长 100m，总计 500m，采用砖砌、抹水泥完成。沉淀池长 1.5m，宽 1m，深 0.6m，进水口与集流槽相连接，出水口通过 3 条直径为 0.5m 的水泥管道与集雨窖相连接。室内蓄水池为 PVC 材料的圆形桶，容积为 2m<sup>2</sup>，桶底距离地面 1m，置于温室中部。图 1 为集雨窖建造过程中，图 2 为集流槽，图 3 为沉淀池，图 4 为集雨窖检查井。



图 1 集雨窖建造中



图 2 集流槽



图 3 沉淀池

图 4 集雨窖检查井

### 工程运行与维护

**集雨窖使用情况。**根据农户 2008 年、2009 年对集雨窖集蓄利用雨水的记录表明，集雨窖渗漏损失微小，基本上可以忽略不计。在雨水收集过程中，集雨窖常年蓄水室在两年内均出现了溢流现象（雨水从常年蓄水室溢流进入工作室），分别发生在 2008 年的 8 月 10 日、2009 年的 8 月 1 日和 8 月 10 日，但集雨窖整体 4 个室未发生溢流。从雨水收集利用来看，2008 年、2009 年集雨窖常年蓄水室收集的雨水量分别为  $1233\text{m}^3$  和  $1290\text{m}^3$ ，收集的雨水基本上能够满足园区温室农业生产灌溉用水的需求。雨水无法满足灌溉需求的情况包括：一是蘑菇制种对水质的要求较高，必须使用地下水；二是北京的降雨过于集中，当年 10 月份到次年 4 月份之间降雨量十分有限。因此，在 4 月份的春播季节，窖内所存的雨水经过漫长的冬季已经基本上蒸发殆尽，造成该段时间基本无水可用，只能依靠地下水进行补充。

**水泵运行情况。**置于集雨窖内的水泵抽取雨水进行直接灌溉或抽送雨水进入温室内蓄水池进行间接灌溉。水泵两年内运行状态良好。据园区农户估计，抽取  $1\text{m}^3$  雨水的耗电量约为  $0.2\text{kWh}$ （度）。根据雨水利用量可计算出两年水泵抽水耗电量分别为： $990*0.2\text{kWh}$  和  $1290*0.2\text{kWh}$ ，即 198 度和 258 度。园区用电电价为  $1.2$  元/ $\text{kWh}$ ，则两年抽水电费支出分别为 238 元和 310 元。

**系统维护。**系统维护工作主要包括温室膜面的更换，集流槽、沉淀池、集雨窖和蓄水池的清洁，水泵的维修和置换等。其中温

室膜面更换一般为 2 年一次；水泵两年内使用状况良好，未进行维修和置换；集流槽、沉淀池每年清理两次，集雨窖每年清理一次，蓄水池两年内未进行清淤工作。以一个成年劳动力计算，集流槽和沉淀池清淤工作需要 3 天完成，则每年用于这两项工作的劳动时间折合为 6 个工作日。集雨窖清理一次大约需要两个工作日。因此，每年用于系统维护清理的劳动时间支出至少为 8 个工作日。

*面临的问题。*示范点农业园区雨水集蓄利用系统建成使用以来，主要面临着以下一些问题：

1. 系统清理工作不及时，温室膜面覆盖存在不到位现象，影响了雨水收集的效率；
2. 系统集雨利用所节约的费用有限（主要是节约了电费），而系统使用明显增加了运行维护的费用，用户角度的经济效果不佳，影响了用户利用雨水的积极性；
3. 系统建成后，运行维护工作由农户独立承担，地方政府后续投入不足，导致农户无力解决出现的各种新问题；
4. 农户未对系统运行过程进行详细的记录，无法对系统的优劣作出准确的判断，例如集雨窖是否存在质量问题？集雨窖的容积是否合理？雨水利用能否节约电费？如果能，能节约多少电费？哪些措施可以提高集雨利用的效率等；
5. 对系统的观测时间只有两年，还不足以评判系统性能的优劣，一些可能会遇到的问题还没有完全显现，例如降雨的年际变化对系统集雨效率的影响，系统可使用的寿命等。

### **雨水收集利用效率**

根据对 2008 年、2009 年示范点农业园区的降雨观测数据，雨水收集量和用水量记录，汇总形成示范点雨水收集利用表（表 3）

表 3 示范点雨水收集利用表

年份	降雨量	雨水收集量	雨水利用量
2008	583	1233	970
2009	524.5	1290	1290
总用水量	雨水收集效率	雨水利用效率	替代地下水比例
1050	66.1	78.7	92.4
1430	76.9	100.0	90.2

从上表可以看出，雨水收集利用可替代地下水比例达 90%以上，年收集雨水可基本满足年农业用水需求。可见，通过适当的改进雨水收集利用系统，例如适当增加集雨窖面积或进一步提高雨水收集效率。该模式的雨水收集利用系统可完全替代地下水，从而实现节约地下水，减少用水成本的目的。在解决北京市农业用水短缺问题上具有较高的推广价值。

## 参考文献

- Chu S.C., Liaw C.H., Huang S.K., Tsai Y.L., Kuo J.J.. The study for influencing factors of urban rainwater catchment system capacity[A]. Proc. of 9<sup>th</sup> International Rainwater Catchment Systems Conference, Petrolina, Brazil, 1999.
- Chu S.C., Liaw C.H., Tsai Y.L., Chen J.C., Chen J.T., Lee S.C.. Planning strategy study for roof rainwater catchment systems[A]. Proc. of 8<sup>th</sup> International Conference on Rainwater Catchment Systems, Tehran, Iran, 1997.
- Liaw C., Tsai Y.. Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(4):901-912.
- Mitchell V.G.. How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behaviour modeling[J]. Journal of Hydrological Processes, 2007.