

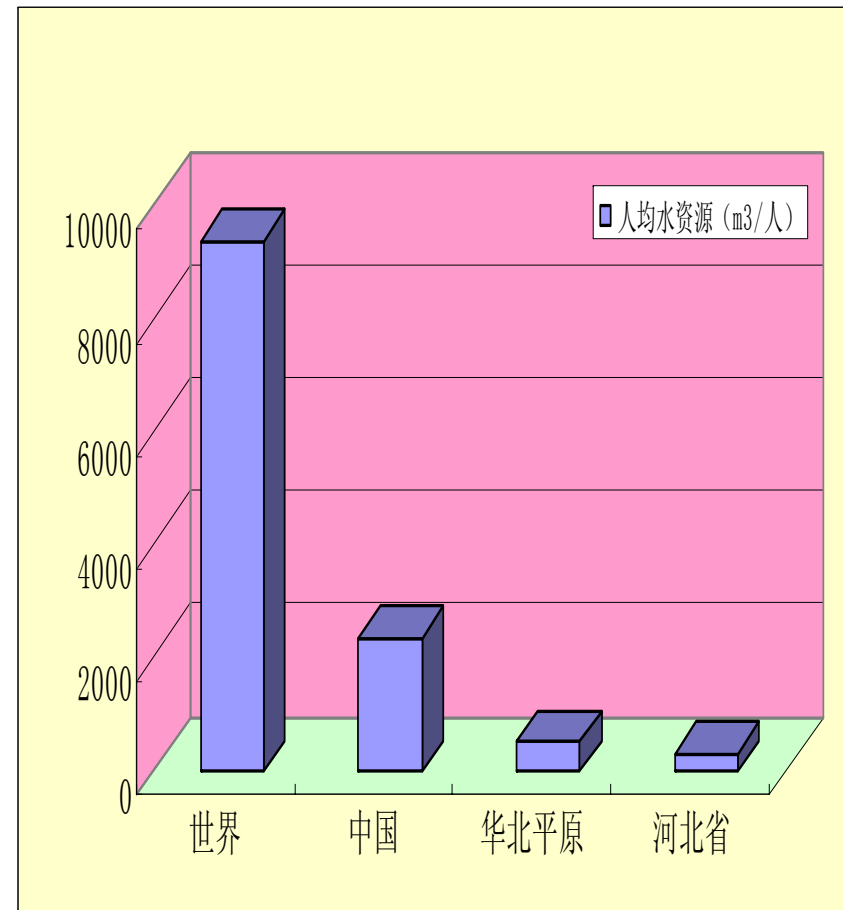
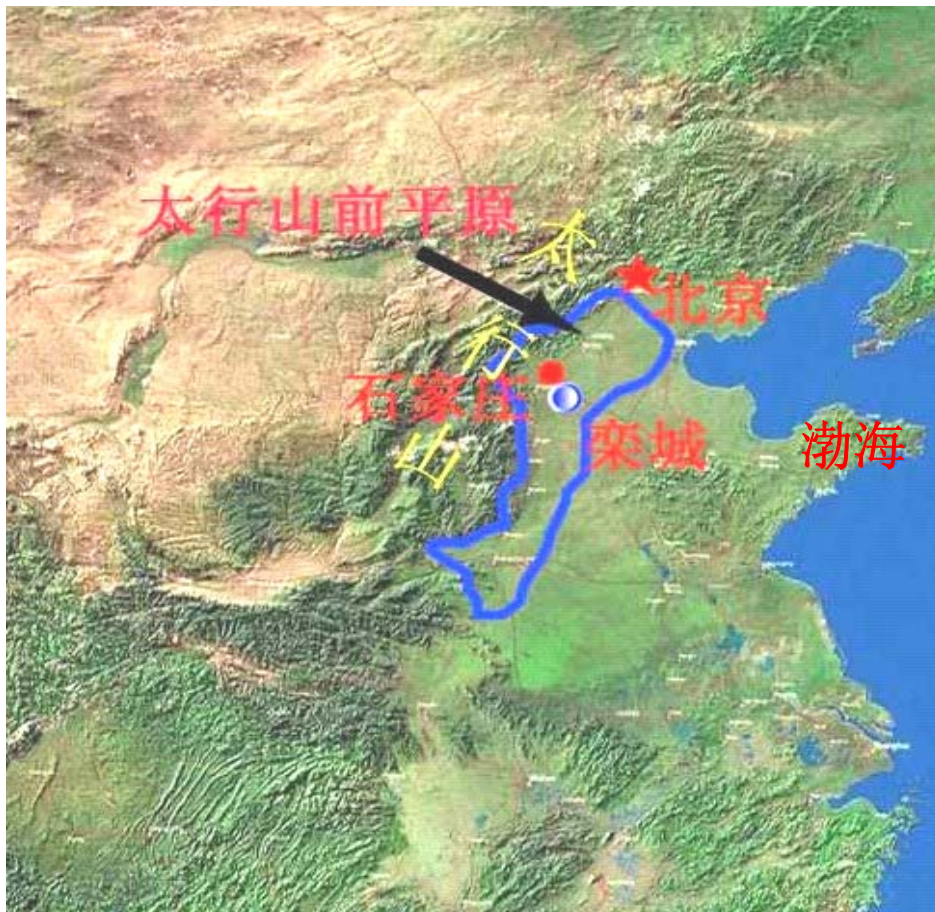
华北平原农田水分利用效率 长期观测与试验

胡春胜 张喜英 陈素英 孙宏勇

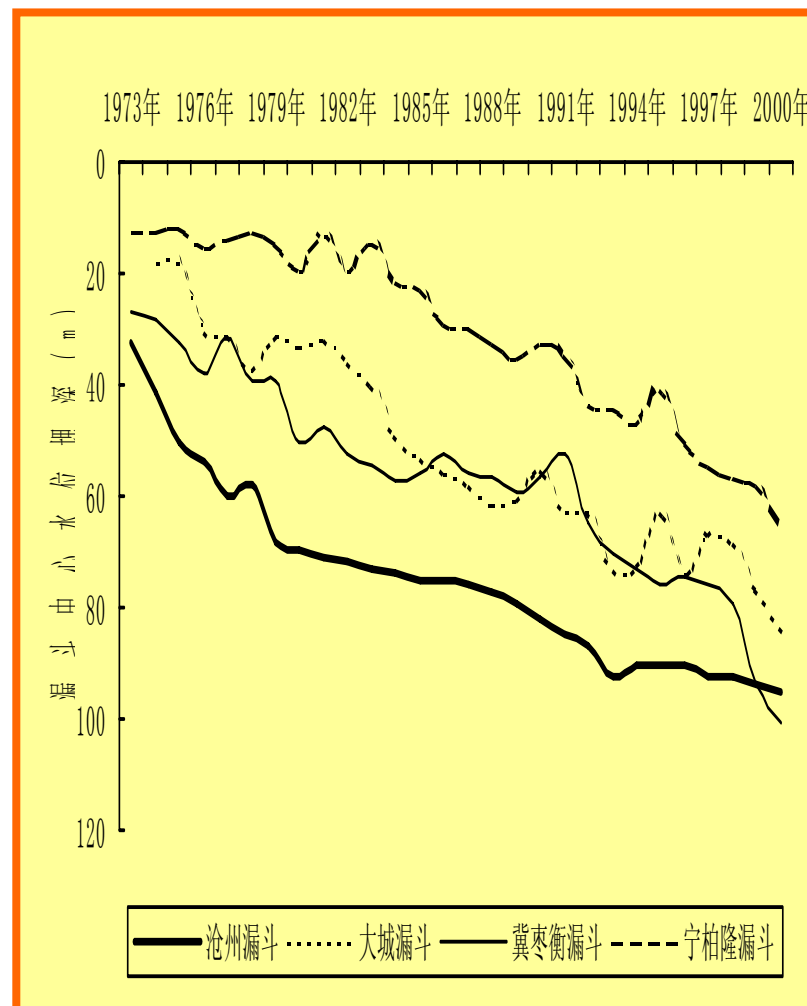
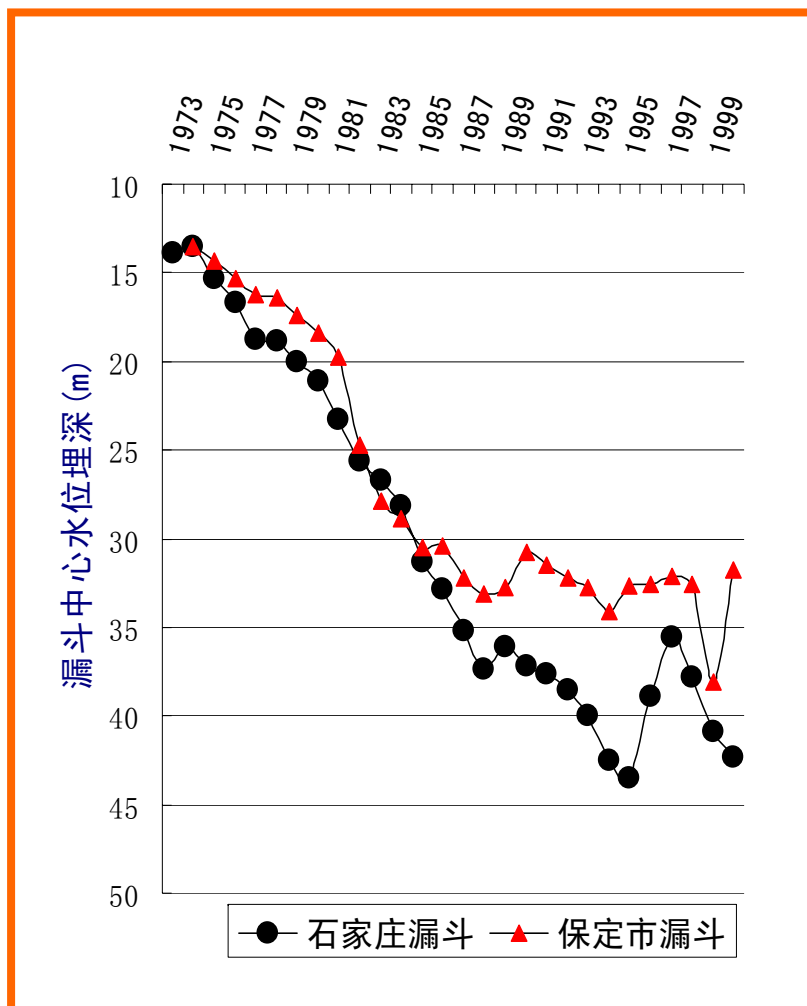
中科院遗传发育所农业资源研究中心
河北栾城农田生态系统国家野外科学观测研究站

一、栾城站代表区域与主要生态问题

华北平原是我国重要粮食生产基地，又是我国水资源严重短缺的区域。满足**粮食安全**与**水资源**安全的双重国家战略需求，成为区域农业可持续发展的重要课题。



河北平原粮食生产是以超采地下水为代价的



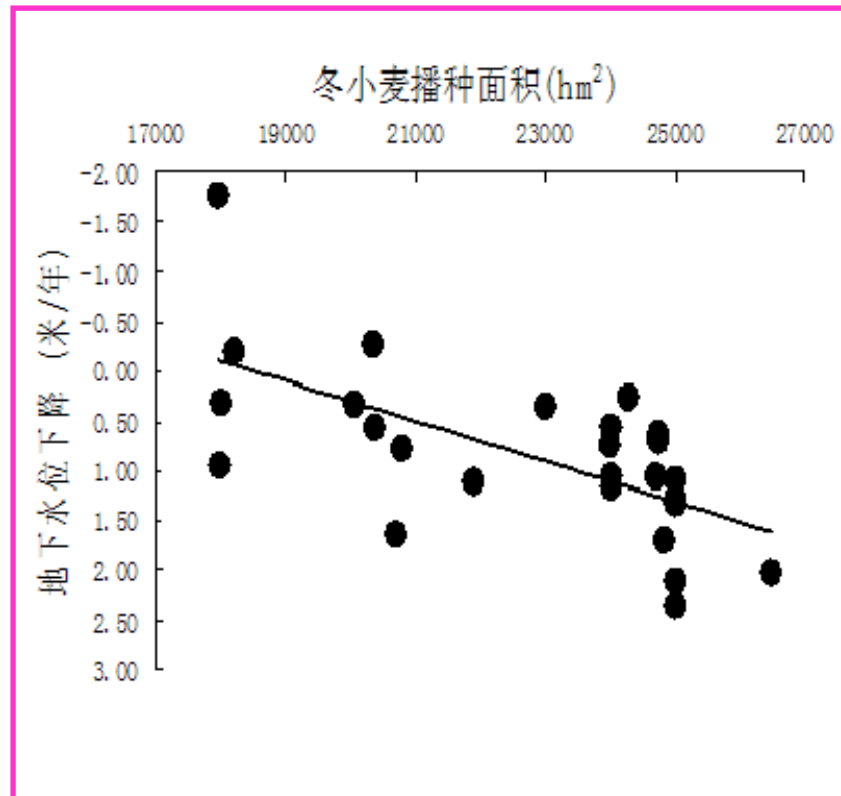


地下水超采已带来一系列的生态环境问题！！！！

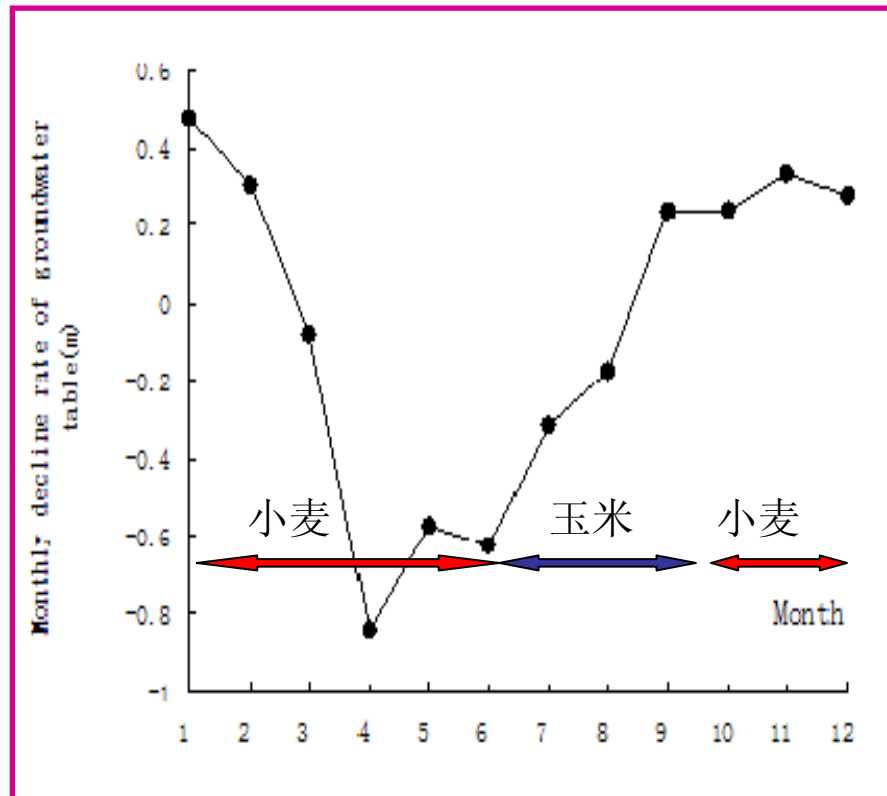
□河北平原地区今年7月出现5条地缝，最长8000米，最深10米
(<http://www.sina.com.cn> 2006年07月19日 01:41 国际在线)

□调查发现多数因地地下水超采形成
(<http://www.sina.com.cn> 2006年07月20日 08:52 国际在线)

小麦 / 玉米是华北平原的主导种植模式，也是耗水大户，根据我们的研究，地下水位下降与小麦播种面积呈显著相关关系（Hu,C. 2005）。



冬小麦播种面积与地下水位下降的关系（河北栾城）



地下水位多年月下降率（1974—2002，河北栾城）

农田用水效率方面存在问题：

- 小麦 / 玉米农田水分利用效率还有很大的提高潜力
(灌溉水利用率：60%-----2/3
作物WUE： 1.1kg/m³----1/2)
- 低成本普适性综合节水模式急待集成与示范

总体思路：

减耗—减少土壤无效蒸发
增效—调亏灌溉、高水效品种、提高WUE
控采—减少灌溉次数与灌溉量

SPAC水分
传输系统

品种遗
传特性

水量
平衡

减少水分损失途径

节水措施

ET(蒸散)

大气

蒸腾

蒸发

降水

灌溉

土壤含水量

下渗量

地下水

$R_{叶}$

$R_{茎}$

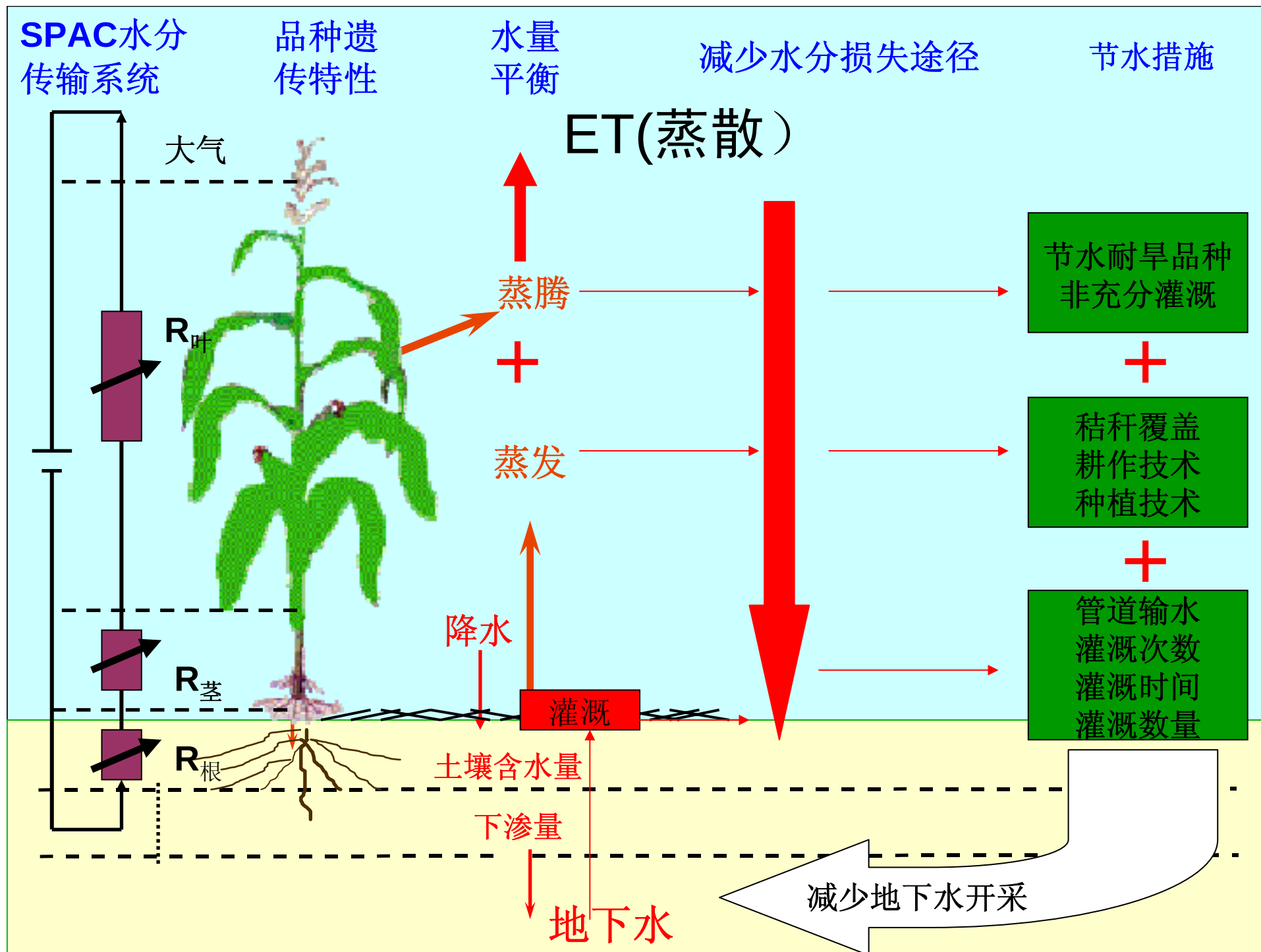
$R_{根}$

节水耐旱品种
非充分灌溉

秸秆覆盖
耕作技术
种植技术

管道输水
灌溉次数
灌溉时间
灌溉数量

减少地下水开采



围绕提高农田水分效率，重点研究方向是基于水量平衡与SPAC系统传输理论，探索调亏灌溉的理论与技术，主要包括：

1. 农田蒸散发过程及规律
2. 地面覆盖及灌溉制度对农田蒸散结构与水量平衡的影响
3. 非充分灌溉下作物生理生态响应与调控机理
4. 高水效品种遗传差异与分子设计
5. 指导非充分灌溉的优化灌溉指标体系与灌溉制度

二、农田水分长期试验与观测系统

作物水分关系试验区

大田灌溉制度试验
(1982—)

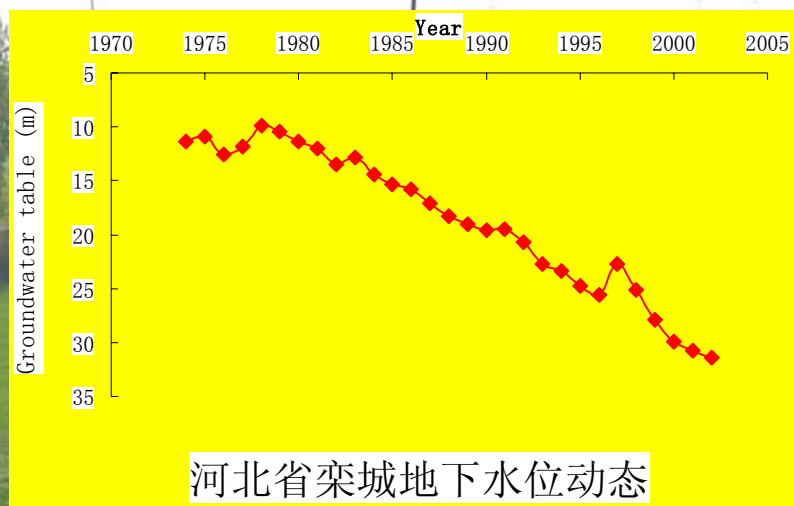
16个FAO标准的
水分池控制试验
(1995—)

大型蒸渗仪
(1995—)

测坑试验区
(1987—)

土壤水观测井
(1985—)





地下水位观测井（1974—）

气象场

(1) 大田灌溉制度试验设计(1982-)

冬小麦	灌水时期		越冬前- ---	---返青---	--拔节-孕穗--	---扬花-----	-灌浆
	T0	不灌水					
	T1	灌1水			√		
	T2	灌2水	√		√		
	T2a	灌2水		√	√		
	T3	灌3水	√		√		√
	T3a	灌3水		√	√		√
	T4	灌4水	√		√	√	√
	T5	灌5水	√	√	√	√	√

冬小麦

(2) 水分池水分控制试验设计 (1995—)

处理	越冬期	返青期	拔节期	抽穗期	灌浆期
A	1.0	—	0.8	0.8	0.8
B	1.0	0.8	—	0.8	0.8
C	1.0	0.8	0.8	0.8	—
D	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
E	1.0	—	—	—	—

表中数字表示灌溉时使土壤含水量达到田间持水量的比例



(3) 秸秆覆盖试验设计

CK	☀多	☀ CK	少
多	☀少	☀多	CK
CK	☀ CK	☀少	多
少	☀多	☀ CK	CK
CK	☀少	☀多	少

少覆盖：400斤/亩，多覆盖：800斤/亩。

耕作覆盖试验区



农田蒸散与土壤蒸发的测定仪器

大型蒸渗仪

原状土柱深2.5m,
面积3m²,重14吨,
精度0.06mm

大型称重式
蒸渗仪

中子管

1995年开始蒸散、蒸发联合观测

小型土壤蒸发器



➤ 主要测定项目及方法

- 1. 蒸散量的测定：

大型蒸渗仪

- 2. 棵间土壤蒸发测定

$$Ea = \alpha(W_i - W_{i+1}) \Delta t$$

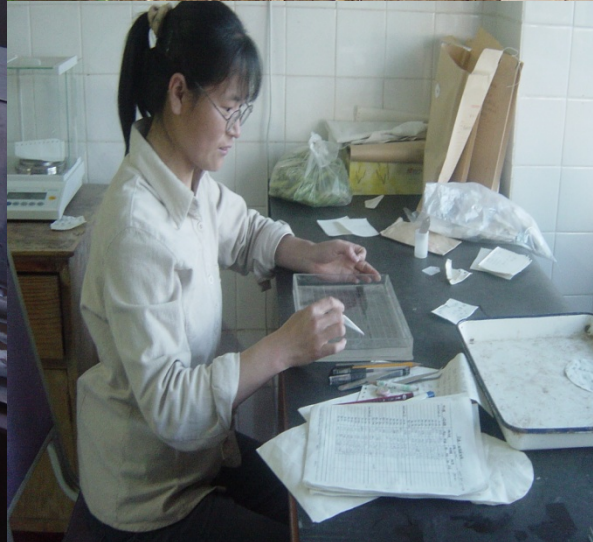
- 3. 土壤含水量测定

中子仪；TDR



$\alpha = 0.105 \text{ mm}$; $\alpha = 0.2754 \text{ mm}$





Washed root samples

Separating roots from dead and other debris and measuring the root length

作物水分生理生态性状测定



光合仪



叶绿素仪



冠层温度



叶水势仪



中子仪



冠层结构

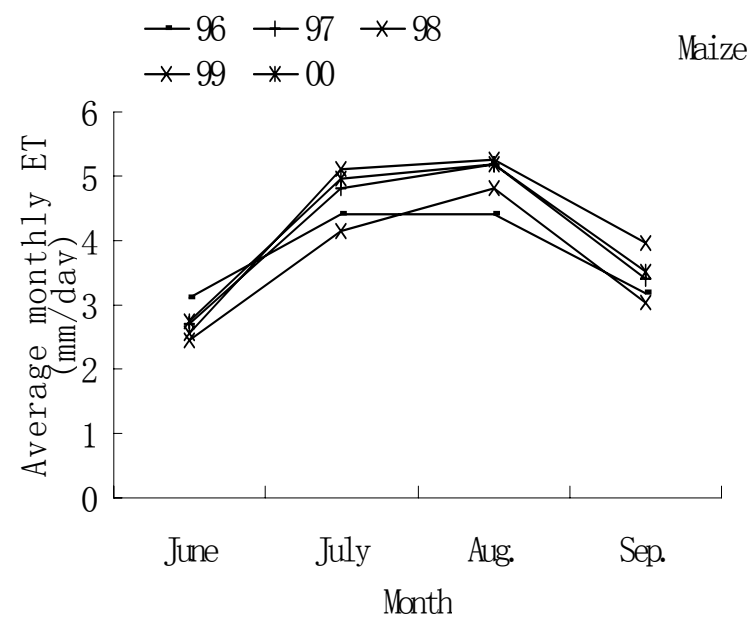
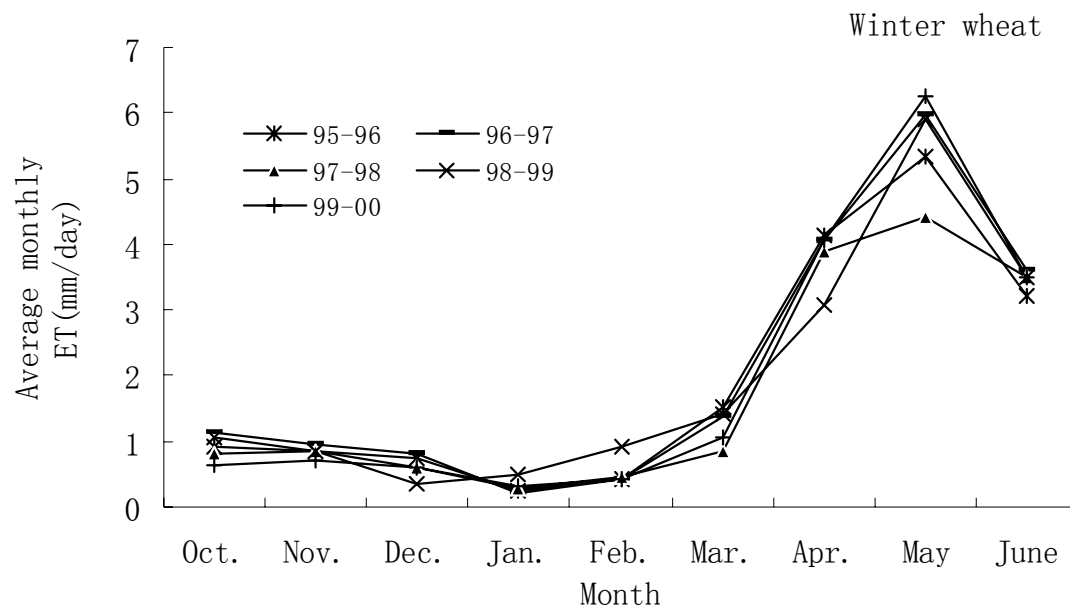
三、主要研究成果

1. 小麦 / 玉米蒸散发规律

根据多年大型蒸渗仪观测结果，华北典型农田冬小麦夏玉米一年两作农田实际蒸散量**870 mm**左右。

Seasons	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	Mean
Winter wheat	461.8	479.2	401.2	459.7	463.0	453.0
Summer maize	434.2	448.9	396.4	431.8	406.0	423.5

2000—2005年平均结果



Average monthly ET rate (mm/day)

平均冬小麦和夏玉米作物系数

$K_c = ET/ET_0$ K_c is crop coefficient, ET is evapotranspiration and ET_0 is reference evapotranspiration calculated by Penmen equation

Wheat

Month	10	11	12	1	2	3	4	5	6(1-10)	Whole period
ET_0 (mm/d)	2.0	1.1	0.7	0.7	1.3	2.1	3.1	3.8	4.6	487 (mm)
ET_c (mm/d)	1.2	0.9	0.6	0.3	0.5	1.2	3.8	5.4	3.3	453 (mm)
K_c	0.6	0.82	0.86	0.43	0.38	0.57	1.23	1.42	0.72	0.93

Maize

Month	6(11-30)	7	8	9(1-20)	Whole period
ET_0 (mm/day)	5.1	3.8	3.4	3.0	386 (mm)
ET_c (mm/day)	3.0	4.7	4.7	3.5	422 (mm)
K_c	0.59	1.24	1.38	1.17	1.1

根据大型Lysimeter 和小型土壤蒸发器联合测定结果，冬小麦和夏玉米生长期间棵间非生产性蒸发占蒸散的比例在1/3左右，一年中大约有250mm左右的水量是无效耗水。这一部分水是节水潜力所在。

蒸发占蒸散比例随生育期的变化

Wheat

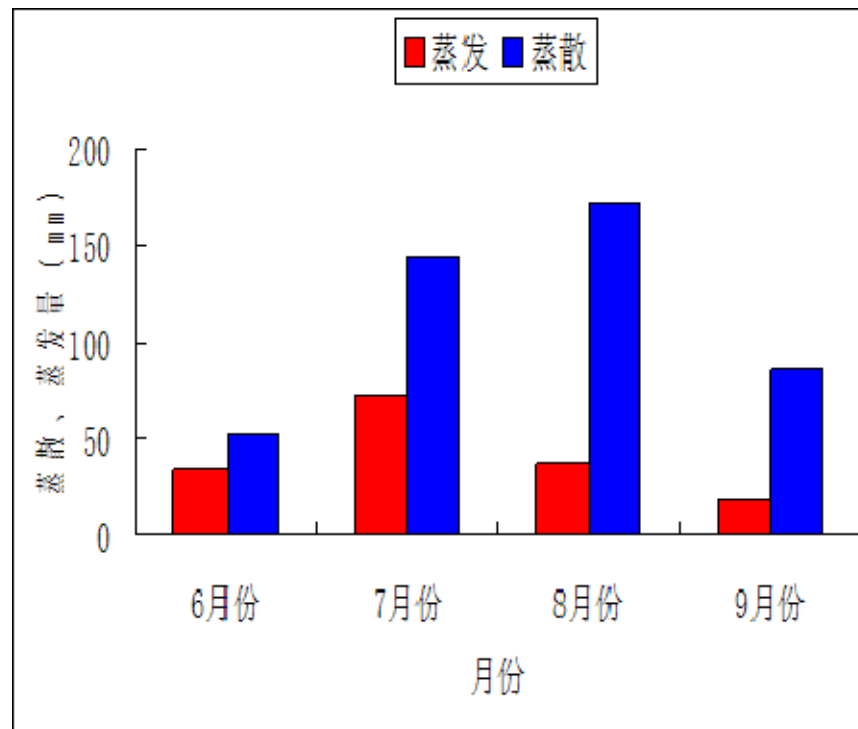
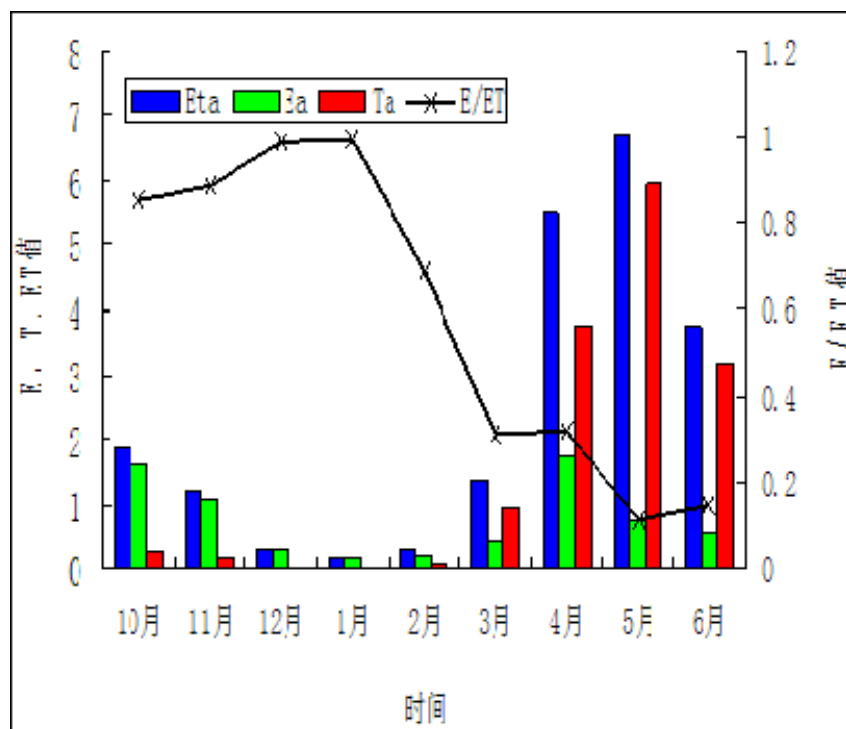
Month	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	Total
ET (mm)	59.2	36.9	19.5	8.2	8.1	28.3	104.8	163.5	33.3	461.8
E/ET (%)	51.2	63.6	41.7	3.1	35.2	69.0	73.1	82.5	81.7	70.3
T/ET (%)	48.8	36.4	58.3	96.9	64.8	31.0	26.9	17.5	18.3	29.7

Maize

138mm

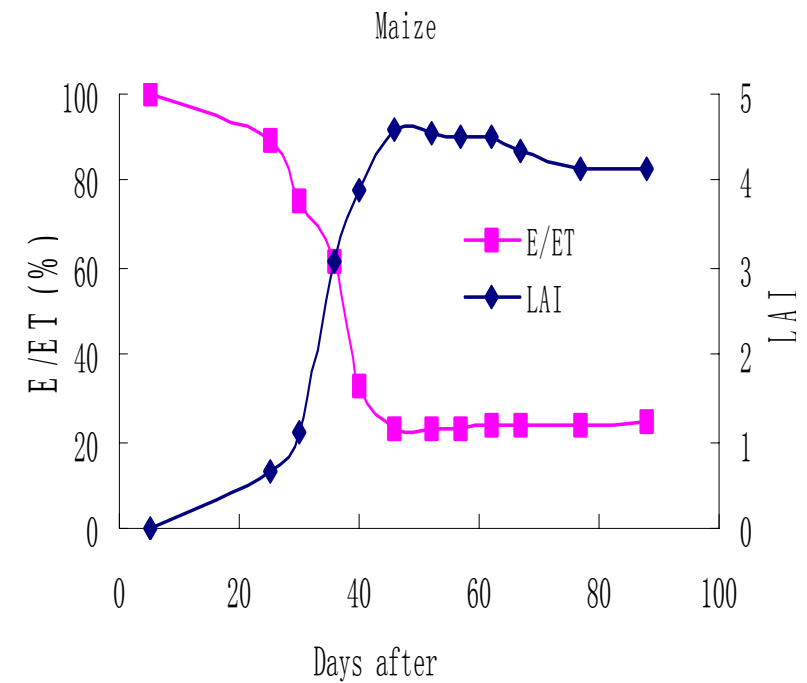
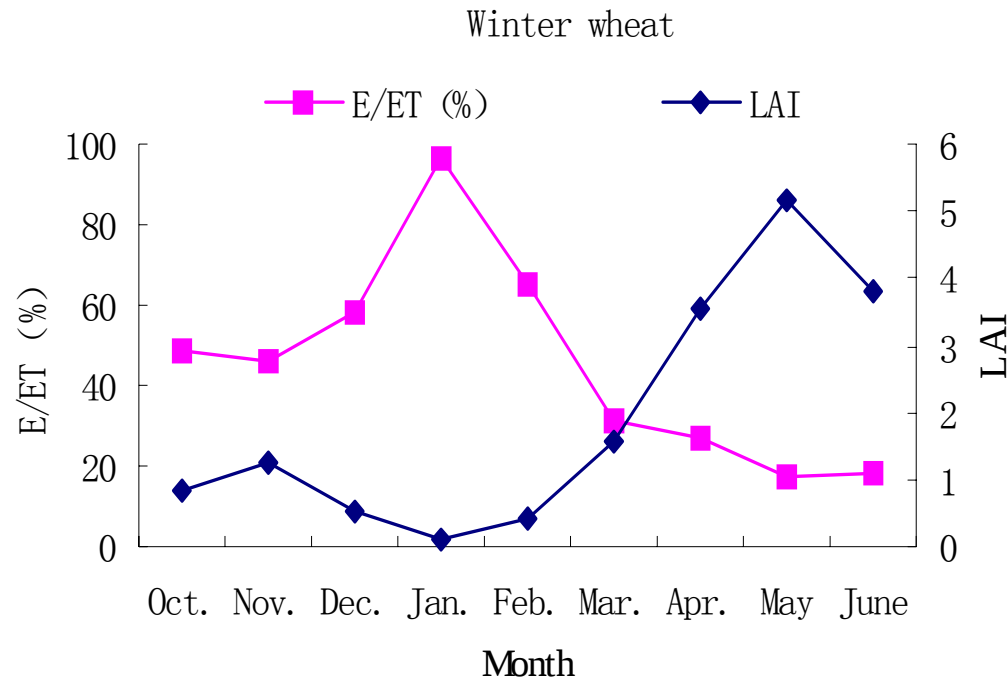
Month	June(11-30)	July	August	Sept.(1-20)	Total
ET (mm)	56.2	159.7	165.0	53.3	434.2
T/ET (%)	35.1	71.8	77.9	75.2	69.8
E/ET (%)	64.9	28.2	22.1	24.8	30.2

130mm

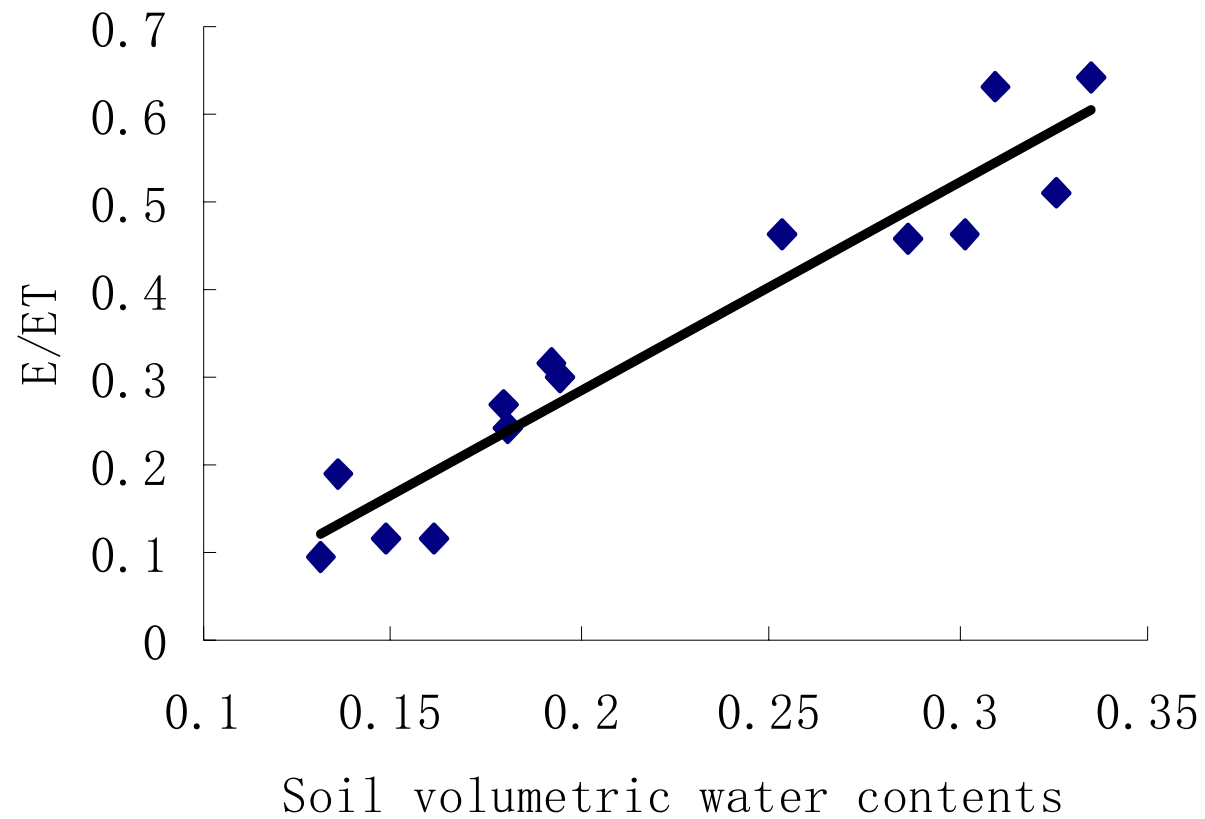


用大型蒸渗仪和Micro-lysimeter测定小麦、玉米的结果

LAI和土壤含水量影响土壤蒸发占蒸散比重



The change of E/ET and LAI over the growing season of winter wheat and maize

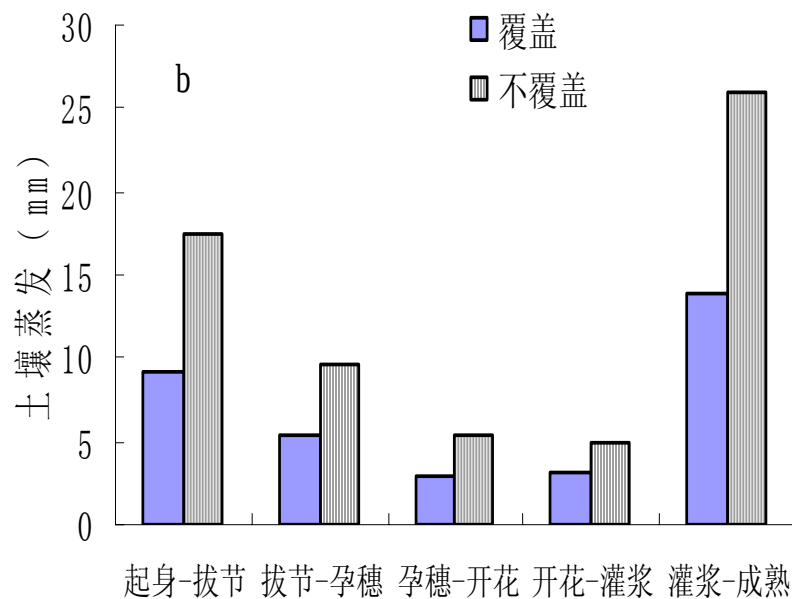


The relation of E/ET with surface soil moisture

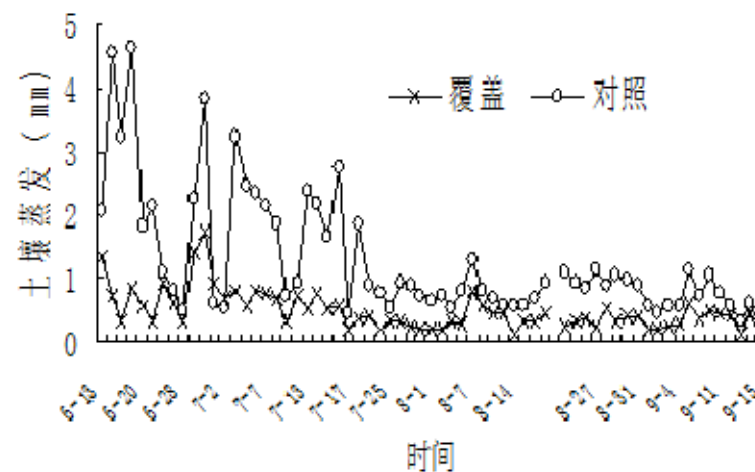
主要SCI论文

- Liu Changming, Zhang Xiying, Zhang Yongqiang. 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. **Agro. Forest. Meteorology**
- Zhang Yongqiang, Qiang Yu, Jie Jiang, Yanjun Shen, Changming Liu. 2005, Simulating daily evapotranspiration from instantaneous latent heat flux measurements. **Agricultural Water Management**
- Zhang Yongqiang, Yu Qiang, Liu Changming, Jiang Jie, Zhang Xiying, 2004. Estimation of winter wheat evapotranspiration under water stress with two semi-empirical approaches, **Agronomy Journal** 96: 159-168.
- Zhang Yongqiang, Liu Changming, Yu Qiang, Shen Yanjun, A. Kondoh, Tang Changyuan, Sun Hongyong, 2004. Surface energy flux and Priestley-Taylor parameter above winter wheat and maize in the North China Plain. **Hydrological Processes**.
- Eloise Kendy, Zhang Yongqiang, Liu Changming, and Tammo Steenhuis, 2004. Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: Case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949-2000. **Hydrological Processes**.
- Zhang Yongqiang, Eloise Kendy, Yu Qiang, Liu Changming, Shen Yanjun, Sun Hongyong, 2004. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management** 64(2): 107-122.

2. 秸秆覆盖的节水效果



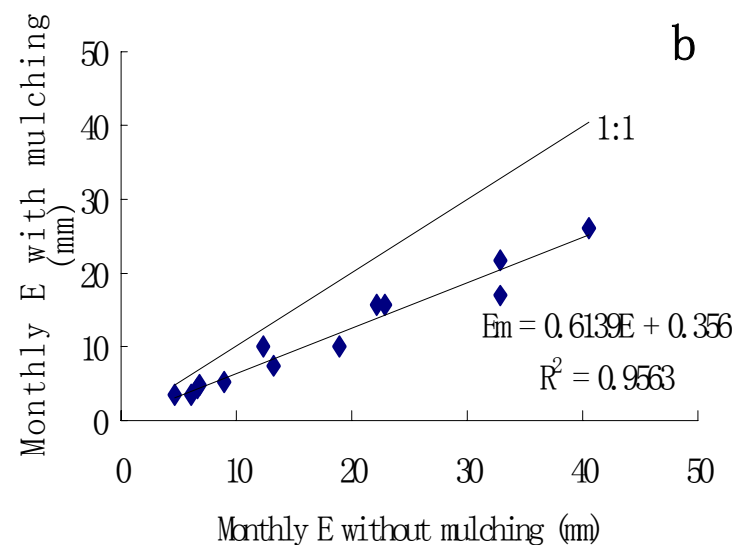
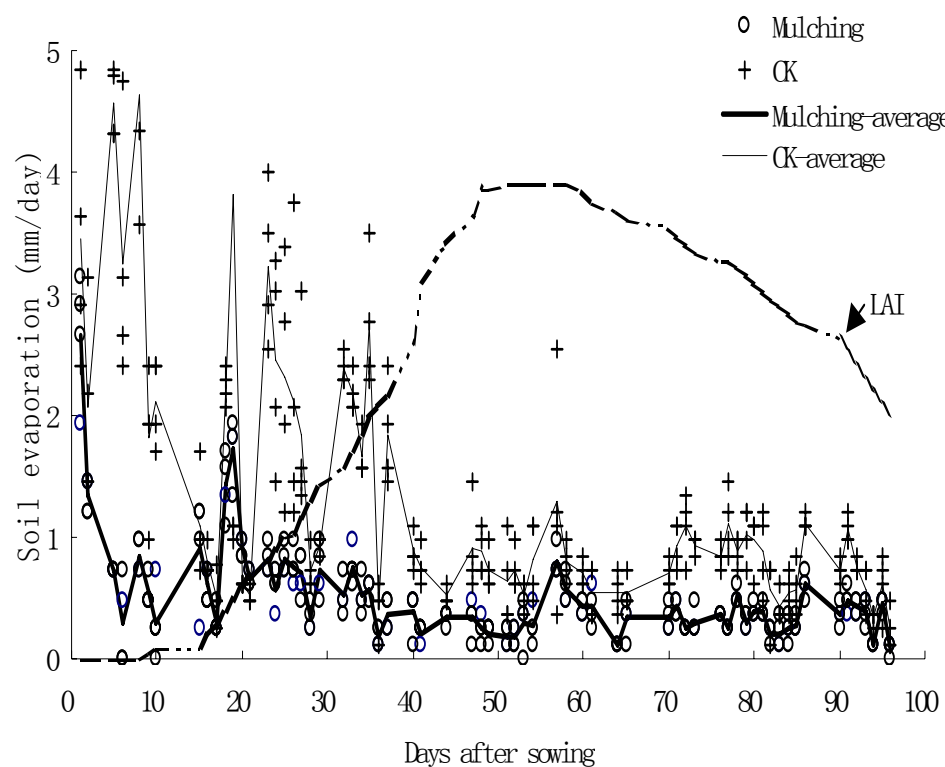
麦田秸秆覆盖的节水效应
(可减少棵间蒸发**40-50mm**)



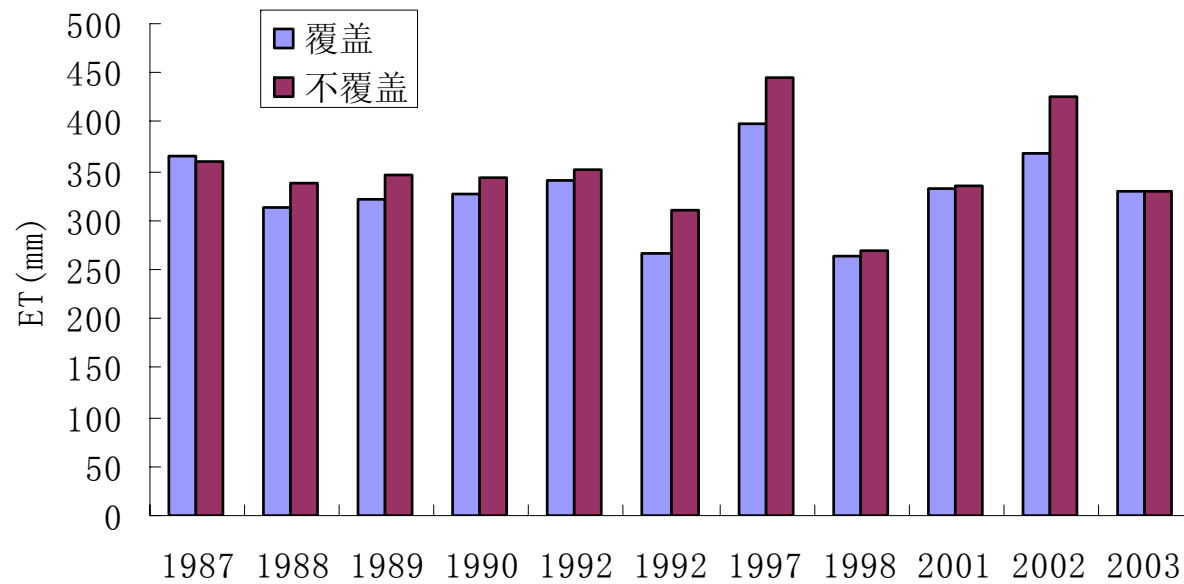
玉米田秸秆覆盖的节水效应
(覆盖节水**35-40mm**)

秸秆覆盖在增产的基础上可减少蒸散的30%，冬小麦+夏玉米两季可节约水分70-100mm。

秸秆覆盖与不覆盖条件下土壤蒸发动态（小型土壤蒸发器测定）

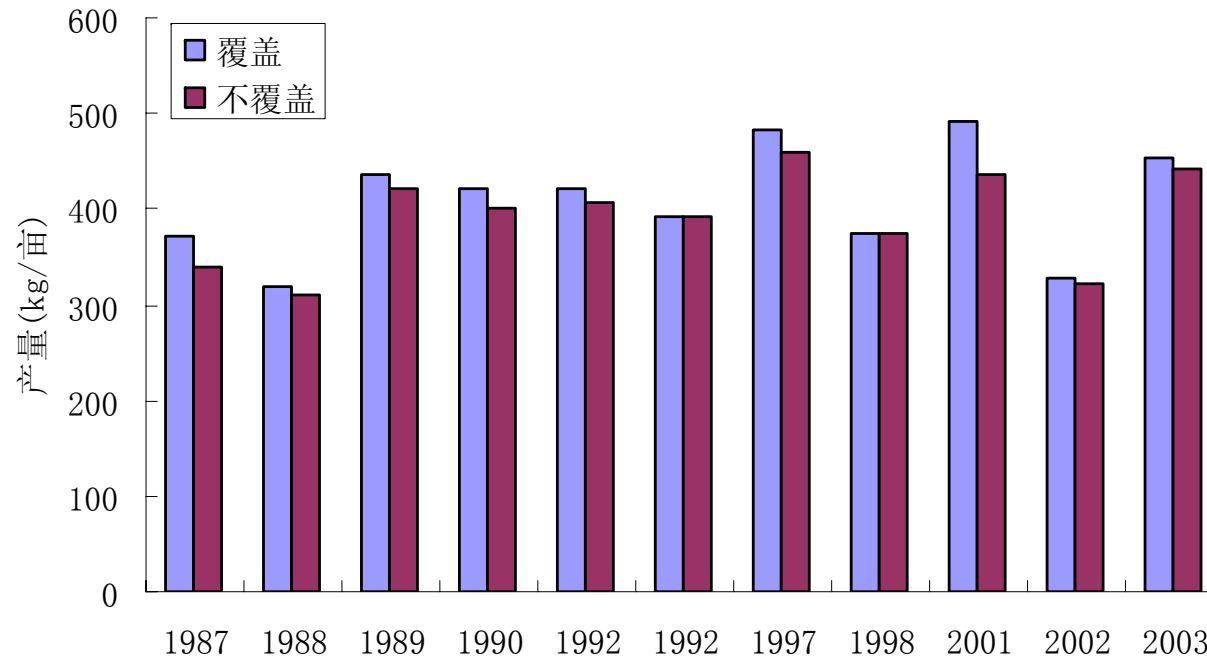


小麦秸秆覆盖对夏玉米蒸散的影响



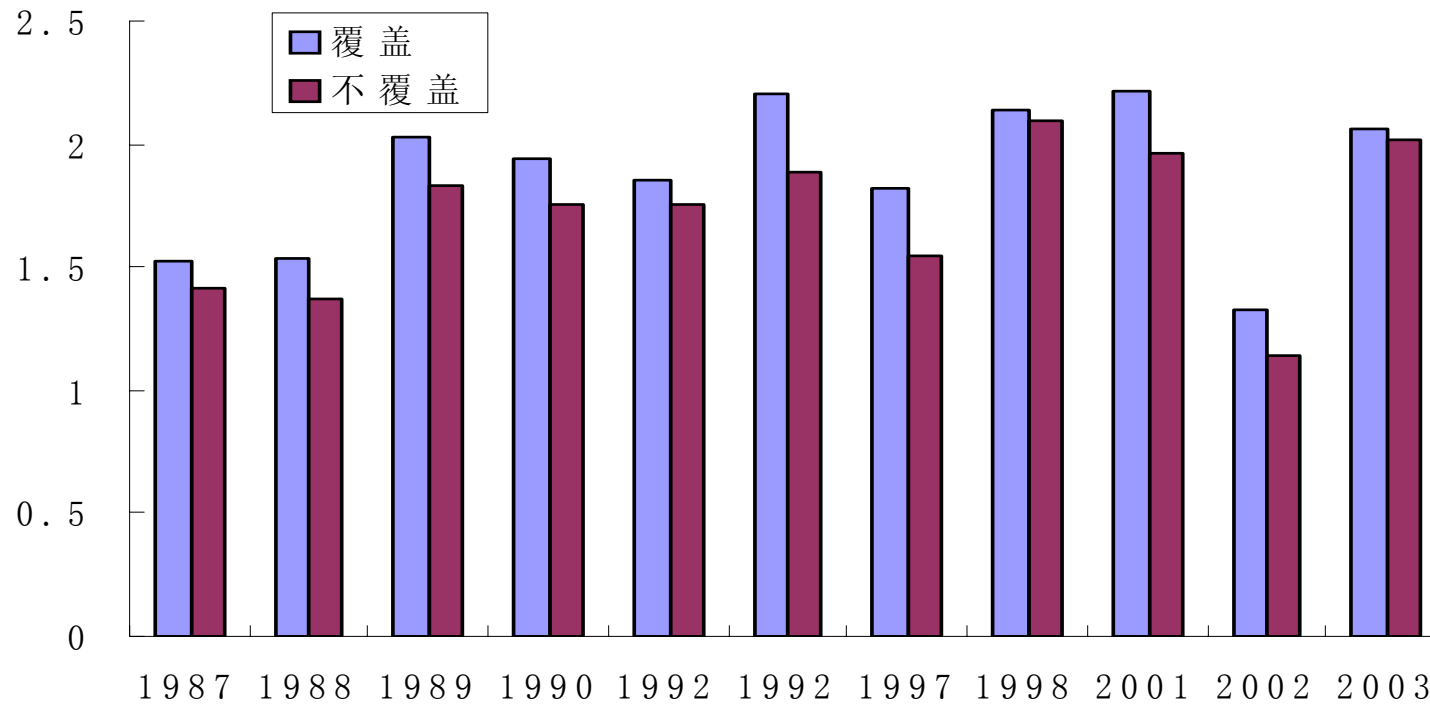
[Agronomy Journal](#), 97:783-790 ,2005

小麦秸秆覆盖对夏玉米产量的影响



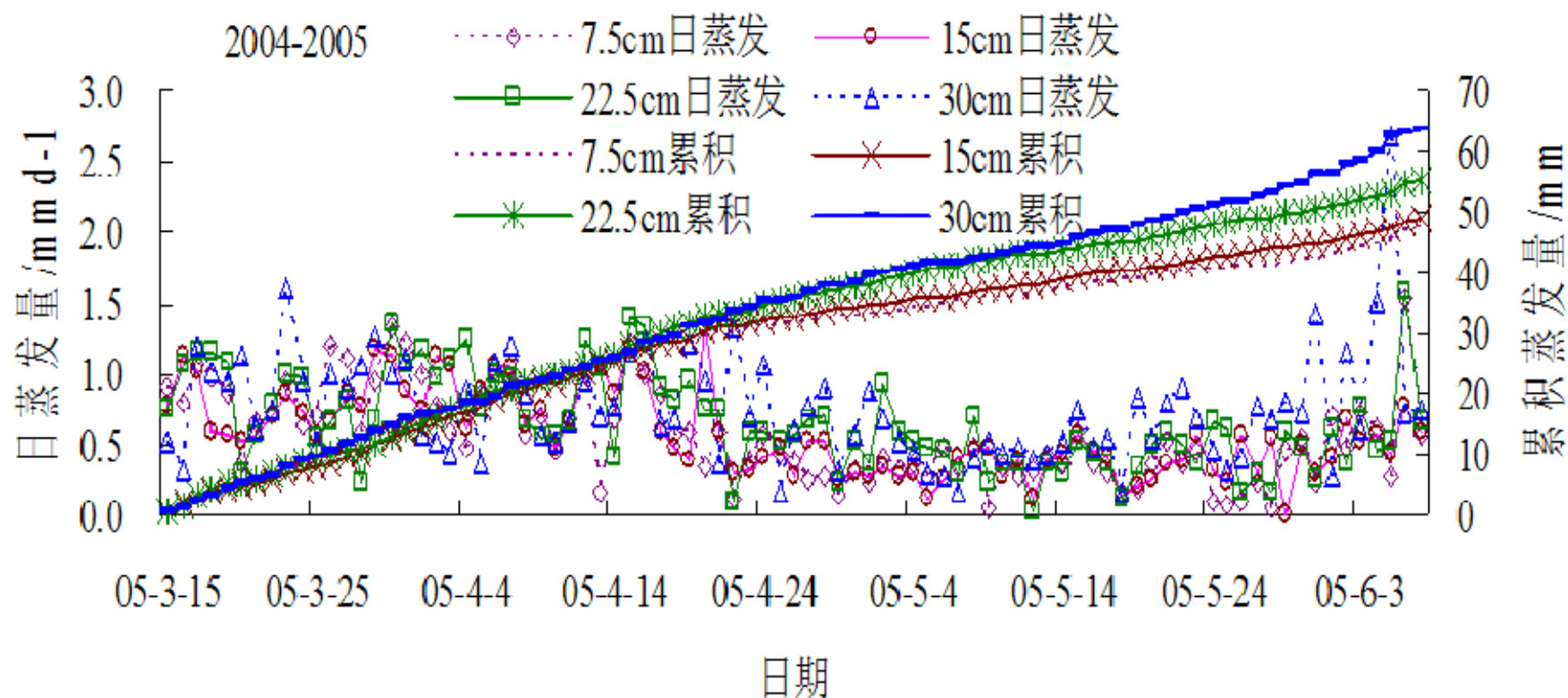
[*Agronomy Journal*, 97:783-790 ,2005](#)

小麦秸秆覆盖对夏玉米水分利用效率的影响



[*Agronomy Journal*, 97:783-790 ,2005](#)

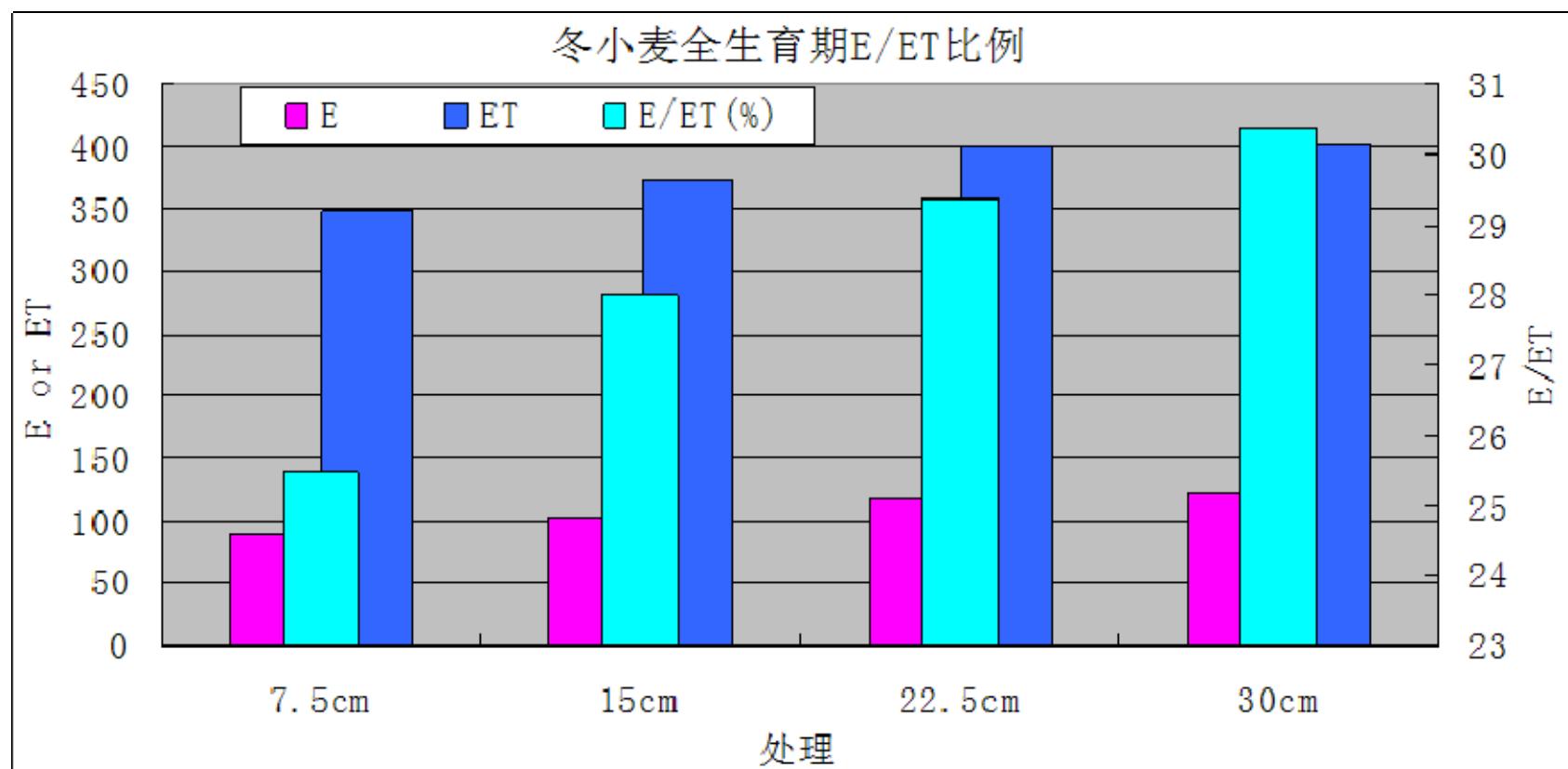
小麦缩行种植的节水效果



不同行距冬小麦各生育期土壤蒸发量

在 $p=0.05$ 水平上，各行距日棵间蒸发量及逐日累积土壤蒸发差异均达到显著水平；其中，7.5cm行距分别与22.5cm、30cm行距的日蒸散量差异达到显著水平（ p 分别为0.025，0.03）。

冬小麦全生育期棵间蒸发占田间蒸散量的比例

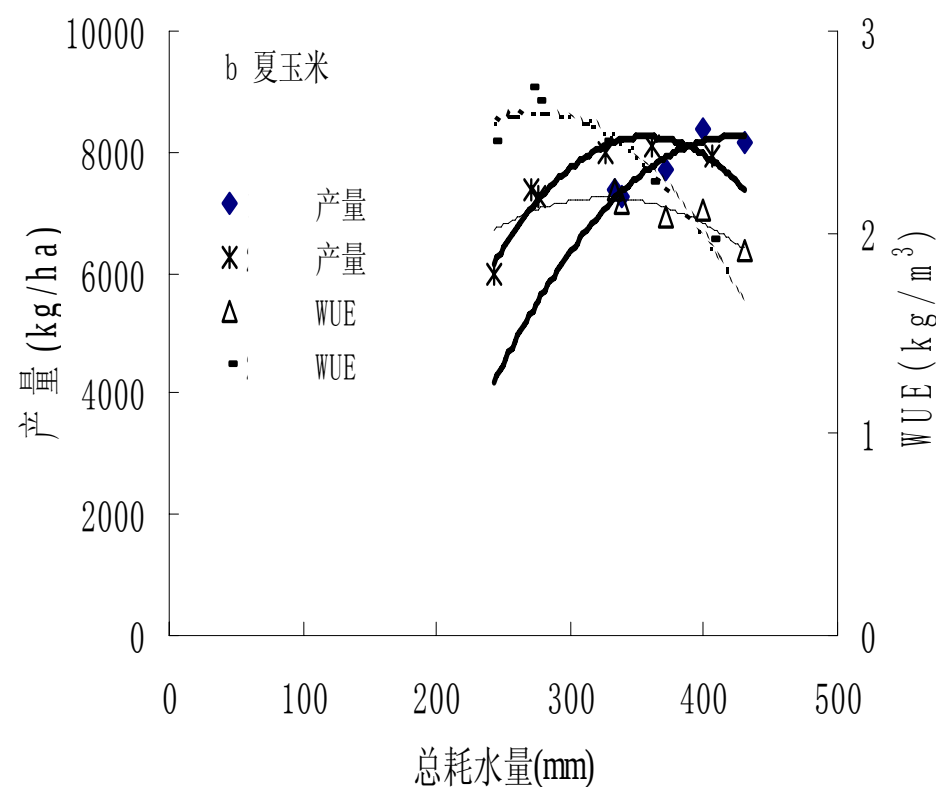
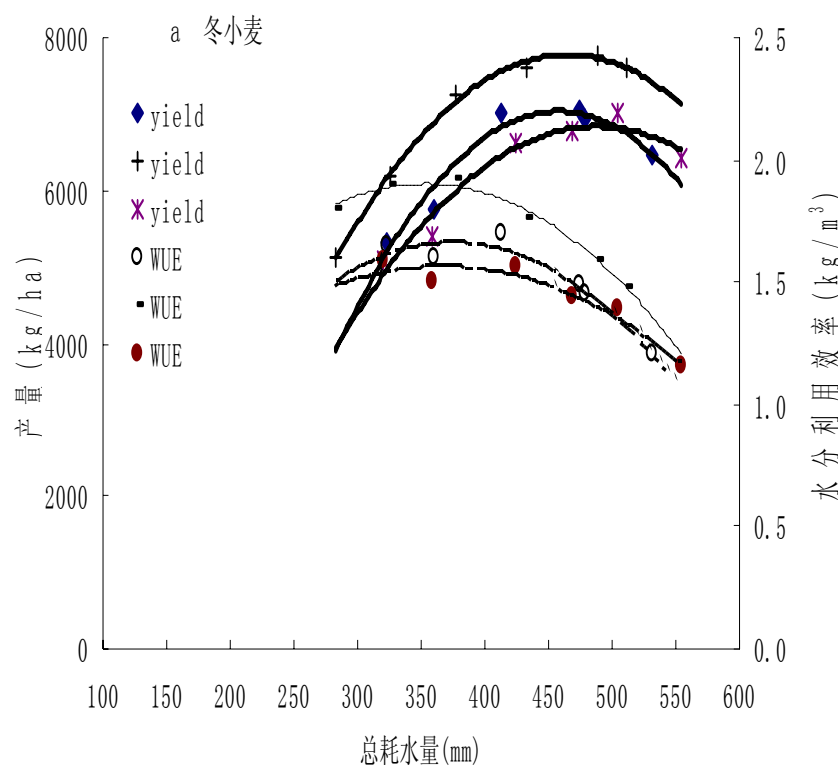


不同作物覆盖率对棵间蒸发的影响效果差异明显，随着行距的增大，棵间蒸发量及棵间蒸发占总蒸散量的比例逐渐增大，7.5 cm行距土壤蒸发总量分别为15cm、22.5cm、30cm行距土壤蒸发总量的85.49%，75.98%，73.05%。另根据水量平衡法计算得到各行距冬小麦全生育期蒸散耗水量，随着行距增大，作物耗水总量也随之增加，并且在试验所设等差行距梯度范围内，各相邻行距ET相差分别是22.76mm，27.25mm，1.87mm

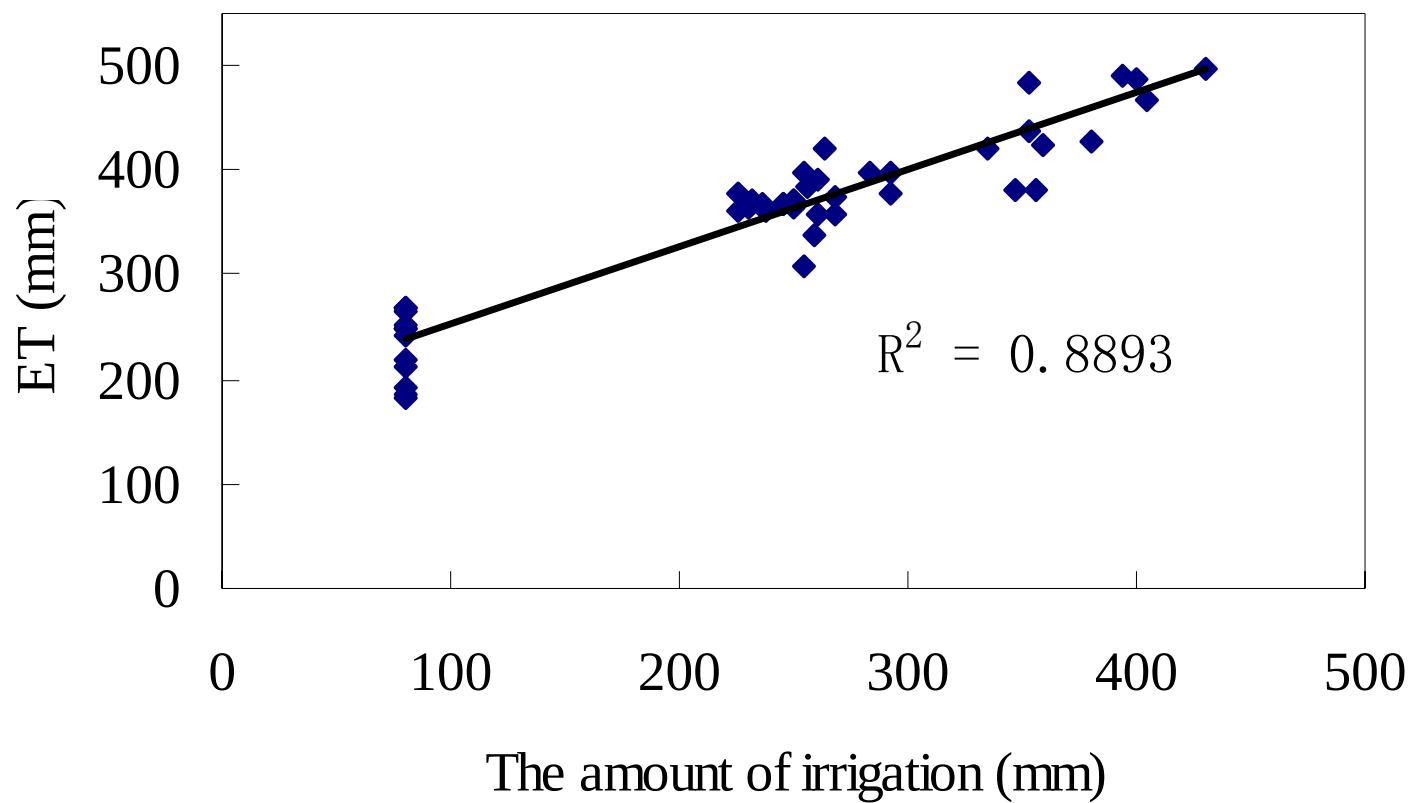
不同行距冬小麦土壤水分利用效率

处理	消耗土壤水分 mm	降水量 mm	灌溉量 mm	总蒸散量 mm	产量 kg/hm2	水分利用效率 kg/m3
7.5cm	29.2	116.9	175	321.1	6870.5	2.1
15cm	46.0	116.9	175	337.9	5272.6	1.6
22.5cm	54.8	116.9	175	346.7	5236.8	1.5
30cm	62.2	116.9	175	354.1	5052.9	1.4

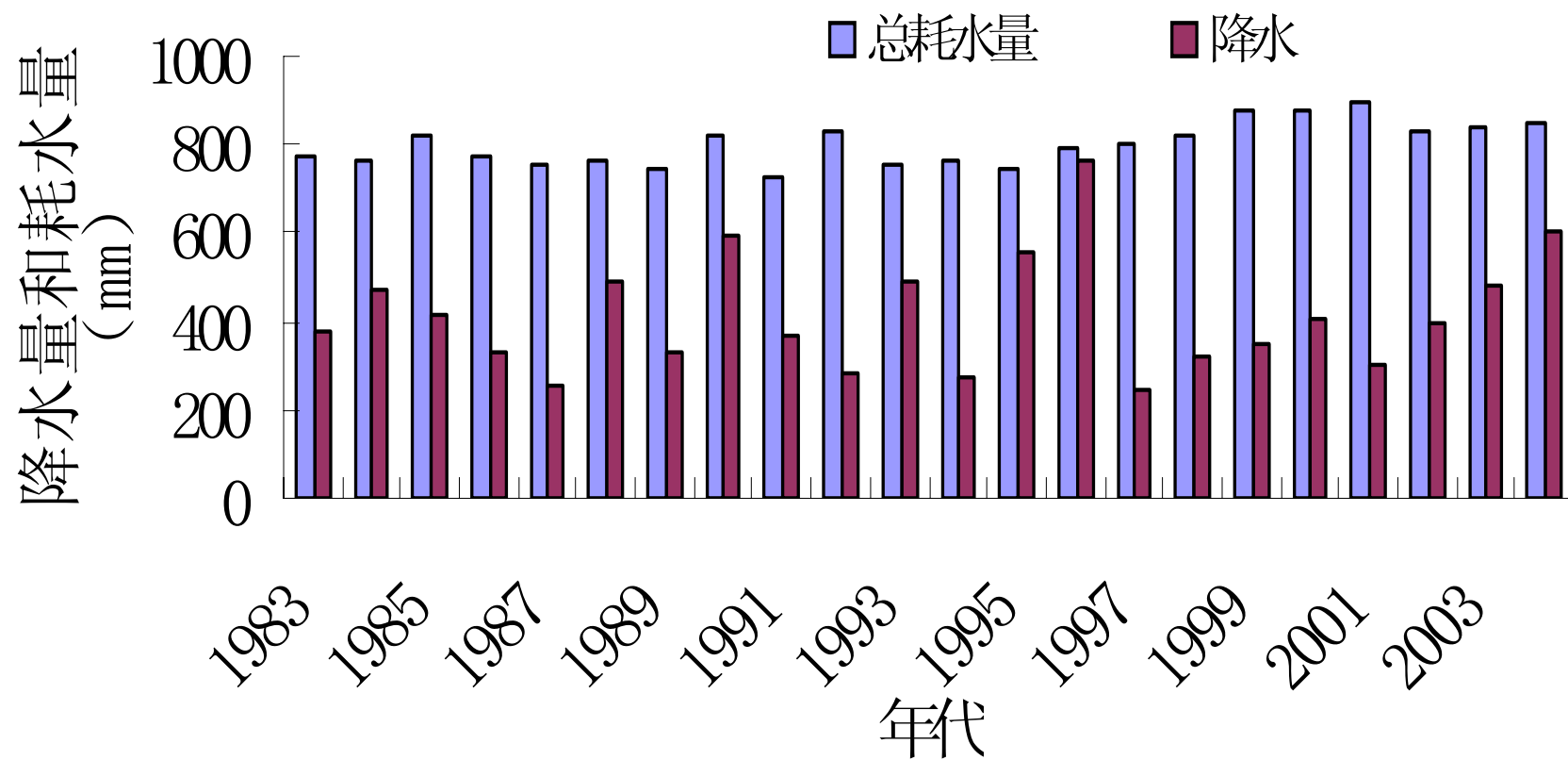
3. WUE和产量的关系及调亏灌溉制度



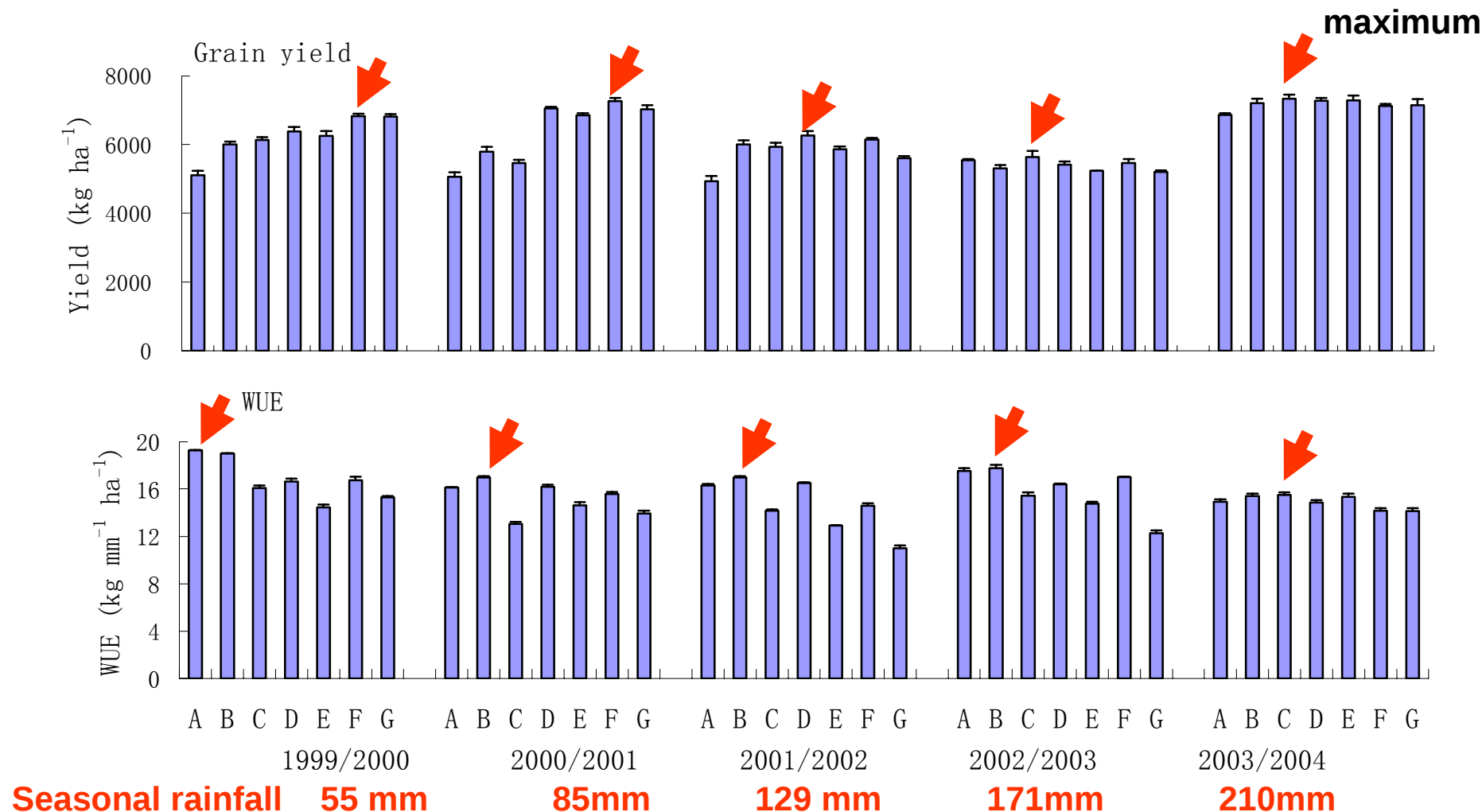
作物产量、耗水量和水分利用效率间呈抛物线关系，超量的水分会造成产量与水分利用效率的降低。这是优化灌溉制度建立的基础。



冬小麦季灌水量与蒸散量之间的关系



栾城站1983-2004年冬小麦-夏玉米一年两作
条件下农田实际耗水量与降水量比较



A-T0: without irrigation; B-T1N: one irrigation at jointing; C-T2: as T1N plus pre-wintering; D-T2N: two irrigations at jointing and flowering; E-T3: as T2N plus the pre-wintering irrigation; F-T3N: three irrigations at jointing, heading and early milk; G-T4: as T3N plus irrigation at pre-wintering. (大田结果)

不同水分处理下的冬小麦的WUEi, WUEet和WUE

Table 6 – Irrigation water-use efficiency (WUEi), net water-use efficiency (WUEet) and water-use efficiency (WUE) of different treatments during three crop seasons^a

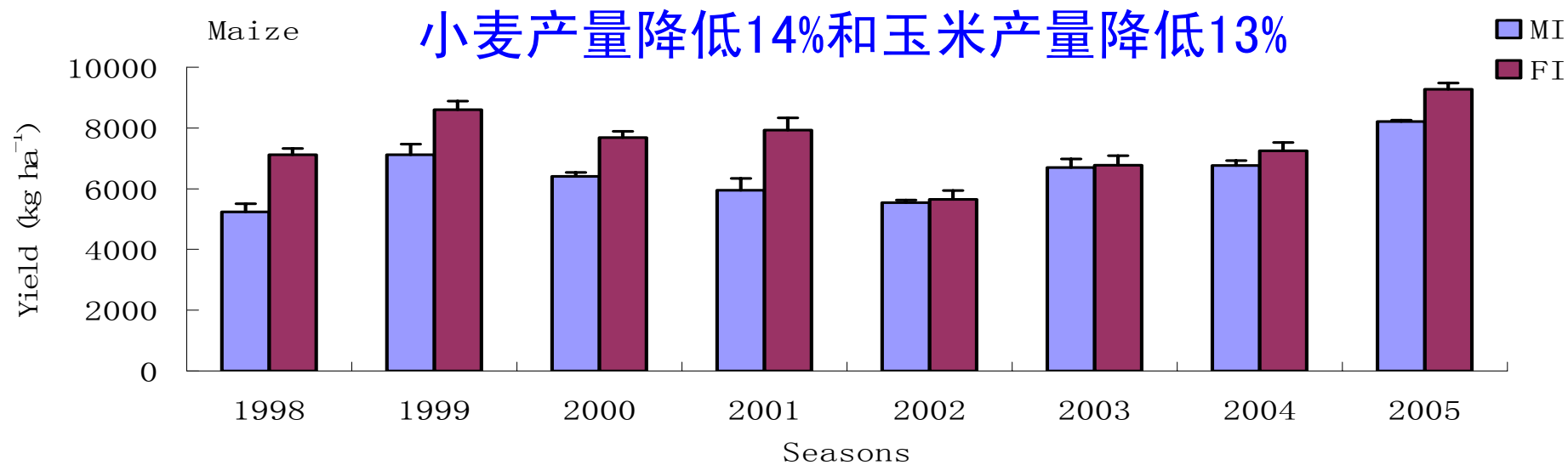
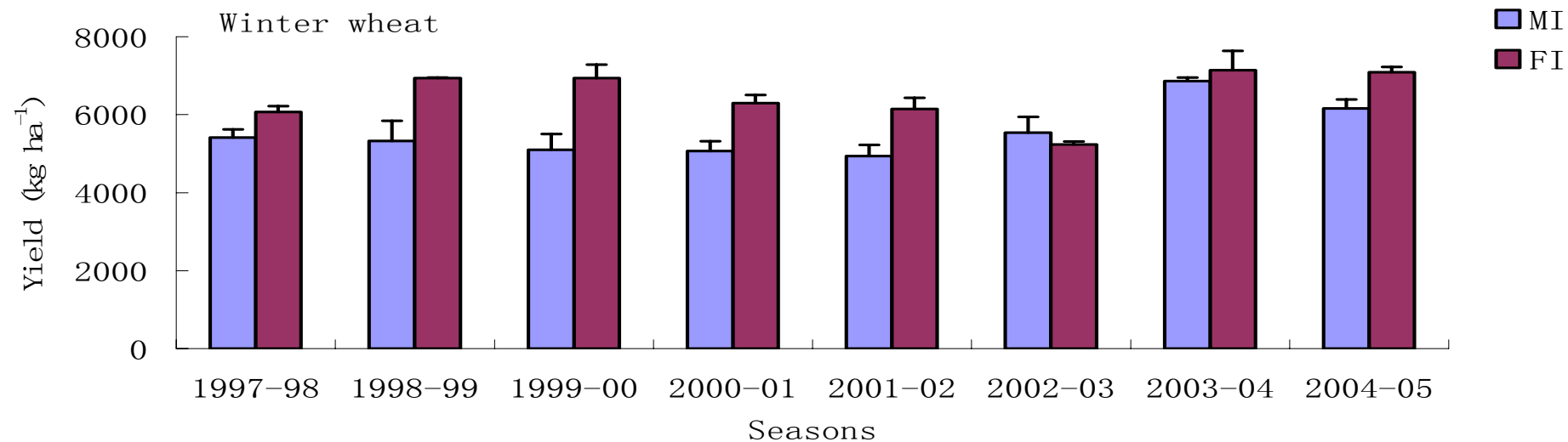
Year	Treatment	Irrigation (mm)	Grain yield (kg ha ⁻¹)	WUEi (kg m ⁻³)	WUEet (kg m ⁻³)	WUE (kg m ⁻³)
1999–2000	A	284.5	5467 ± 179 a	0.67 ab	0.50 b	1.43 bc
	B	323.9	5487 ± 252 a	0.60 b	0.54 ab	1.31 c
	C	247.9	5584 ± 151 a	0.82 a	0.49 c	1.50 b
	D	404.8	5306 ± 64 a	0.43 c	0.59 a	1.14 d
	E	80.0	3552 ± 172 b	–	–	1.83 a
2000–2001	A	272.7	4893 ± 172 a	0.57 ab	0.42 ns	1.19 ab
	B	234.0	4965 ± 142 a	0.54 ab	0.35 ns	1.33 ab
	C	230.0	5177 ± 276 a	0.80 a	0.37 ns	1.34 ab
	D	308.7	4972 ± 96 a	0.53 b	0.46 ns	1.12 b
	E	80.0	3328 ± 80 b	–	–	1.38 a
2001–2002	A	249.3	4299 ± 174 a	0.31 ab	0.35 ns	1.08 b
	B	247.5	4431 ± 79 a	0.37 a	0.36 ns	1.09 b
	C	250.7	4417 ± 165 a	0.36 a	0.40 ns	1.03 b
	D	354.1	4333 ± 137 a	0.23 b	0.42 ns	0.97 bc
	E	80.0	3526 ± 52 b	–	–	1.36 a

水分池结果

最大WUEi是在灌浆期水分胁迫处理下，而同时WUE也比较高

为实现地下水采补平衡的最小灌溉---只在冬小麦和夏玉米播种时进行灌溉-

年份	季节降水 (mm)		最小灌溉灌溉量 (mm)		充分灌溉灌溉量 (mm)	
	小麦	玉米	小麦	玉米	小麦	玉米
1997-98	113	192	90	120	240	240
1998-99	60	290	135	135	300	180
1999-00	50	348	120	135	300	180
2000-01	127	217	120	120	300	300
2001-02	110	288	120	120	300	240
2002-03	156	312	90	90	300	180
2003-04	210	427	90	90	180	120
2004-05	104	322	90	120	240	180
平均.	116	300	107	116	270	203



最小灌溉(MI) 下的冬小麦和夏玉米产量与充分灌溉(FI)的比较

小麦107mm
玉米116mm

小麦270mm
玉米203mm

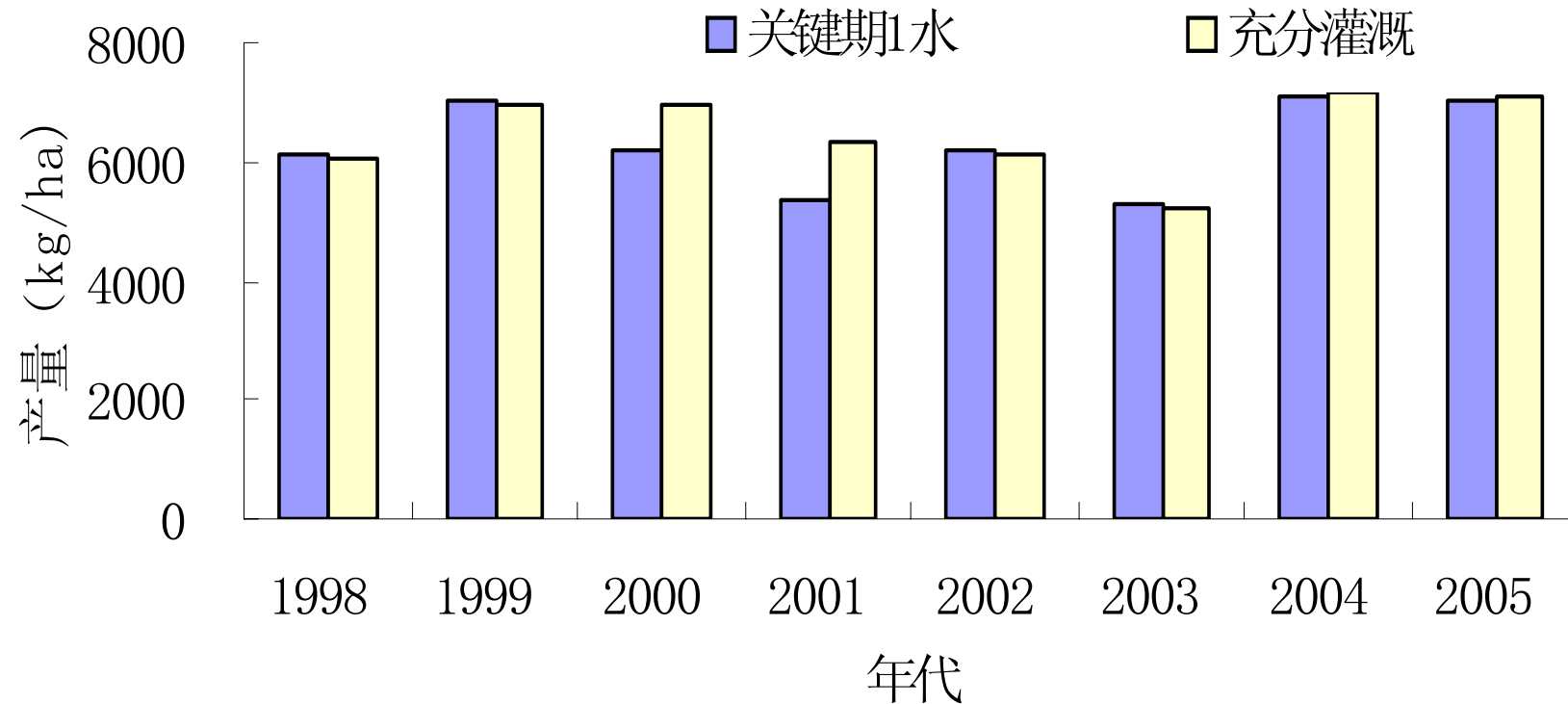
在最小灌溉(MI)和充分灌溉下(FI)的农田水分平衡

季节	降水	蒸散(ET)		灌溉总量	
		MI	FI	MI	FI
	mm				
1997-98	306	590	761	284	455
1998-99	350	661	909	310	559
1999-00	399	608	894	209	495
2000-01	344	558	852	214	508
2001-02	399	678	843	279	444
2002-03	469	606	726	137	257
2003-04	638	818	903	180	265
2004-05	427	713	914	287	487
平均	417	654	850	238	434

最小灌溉基本结论

- 在最下灌溉下冬小麦和夏玉米平均产量比充分灌溉降低14%和13%;
- 最小灌溉下冬小麦和夏玉米年灌溉水量237 mm，比充分灌溉水量433 mm少200mm。
- 当地地下水年平均补给量为195mm，实施最下灌溉下的灌溉用水量接近地下水年补给量，有望实现地下水采补平衡。

最小灌溉在干旱年份会带来产量的显著降低，为了弥补这种对产量的显著影响，在最小灌溉基础上，实施关键生育期补水灌溉的方法



冬小麦在关键期补水(CI)的产量与充分灌溉产量(FI)的比较

冬小麦在最小灌溉(MI) , 关键期补水(CI)和充分灌溉条件 (FI)下的蒸散(ET)和产量 的比较 (产量仅减少3%)

季节	MI		CI		FI	
	ET(mm)	Yield (kg/ha)	ET(mm)	Yield (kg/ha)	ET(mm)	Yield (kg/ha)
1997/98	299	5414	334	6088	390	6066
1998/99	323	5326	366	7024	479	6938
1999/00	283	5104	325	6181	488	6938
2000/01	314	5063	359	5391	441	6300
2001/02	303	4938	313	6185	421	6145
2002/03	317	5539	272	5258	354	5233
2003/04	460	6859	462	7074	507	7143
2004/05	378	6165	383	7058	496	7094
平均	335	5551	352	6282	447	6482

关键期补水灌溉制度的结论

- 冬小麦在播种底墒好的条件下，无论何种降水年型，冬小麦和夏玉米只在关键生育期灌溉1水，平均产量只比充分灌溉少3%；
- 整个生育期用水量减少 90 mm，水分利用效率提高20%。
- 这种灌溉制度简便，农民容易掌握

根据多年研究结果建立的冬小麦的优化灌溉制度

Units: mm

季节降水 (mm)	灌溉次数	次灌溉量	总灌溉量	灌溉时期
多雨>130 mm	1	60-70	60-70	拔节
正常 90-130 mm	2	60-70	120-140	拔节，抽穗-开花
少雨<80 mm	3	60-70	180-210	拔节，抽穗，灌浆早期

这种灌溉制度比农民所采用的灌溉制度减少冬小麦生育期灌溉次数1-2次，产量提高10%，水分利用效率提高10-15%，节水效果明显

相关SCI文章:

Zhang, X.Y., D. Pei, and C.S. Hu. 2003. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain. **Irrig. Sci.** 21: 159-166.

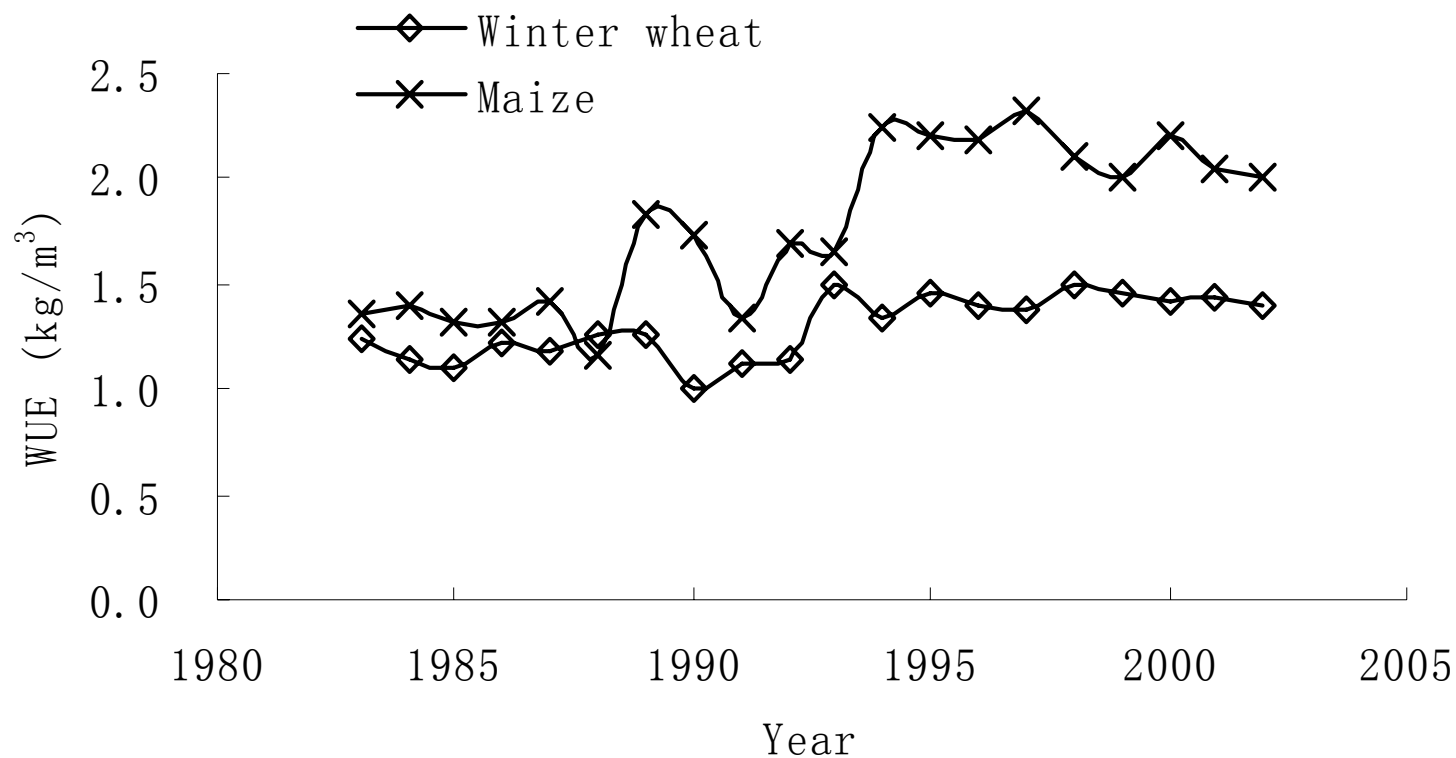
Zhang XY, et al. Performance of double-cropping winter wheat and maize under minimum irrigation in NCP, **Agronomy Journal**, 2006.

Hu, C.S., J.A. Delgado, X.Y. Zhang and L. Ma. 2005. Assessment of groundwater use by wheat in the Luancheng Xian Region and potential implications for water conservation in the Northwestern North China Plain. **J. Soil & Water Conserv.** 60:80-88

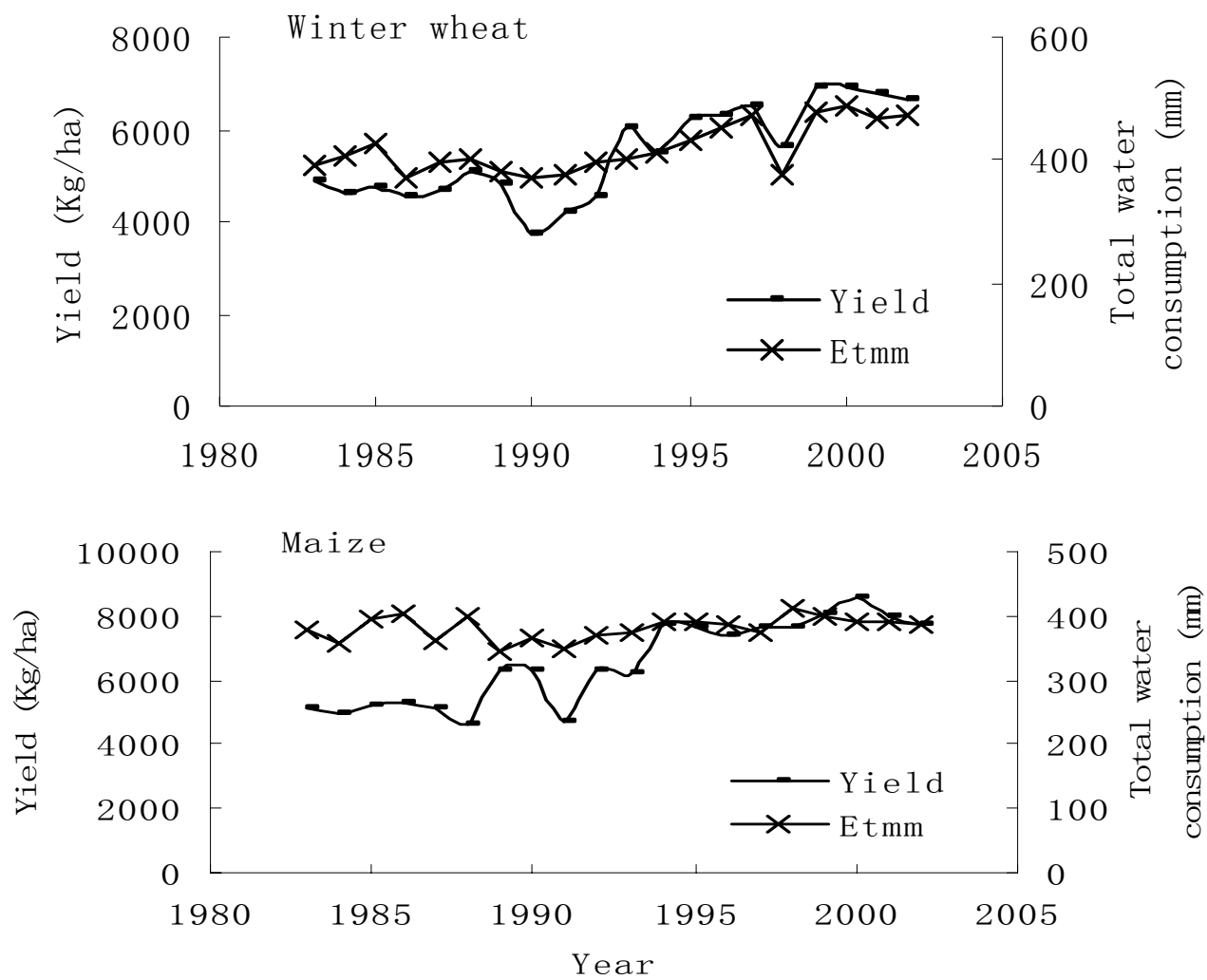
Zhang Xiying et al. Effects of deficit irrigation on yield, yield components and water use efficiency of winter wheat, 2004, **Journal of Experimental Botany**, (supplemental)

Zhang Y. Q., Yu Q., Liu C. M., Jiang J., Zhang X. Y. Estimation of winter wheat evapotranspiration under water stress with two semi-empirical approaches. **Agronomy Journal**, 2004, 96: 159-168.

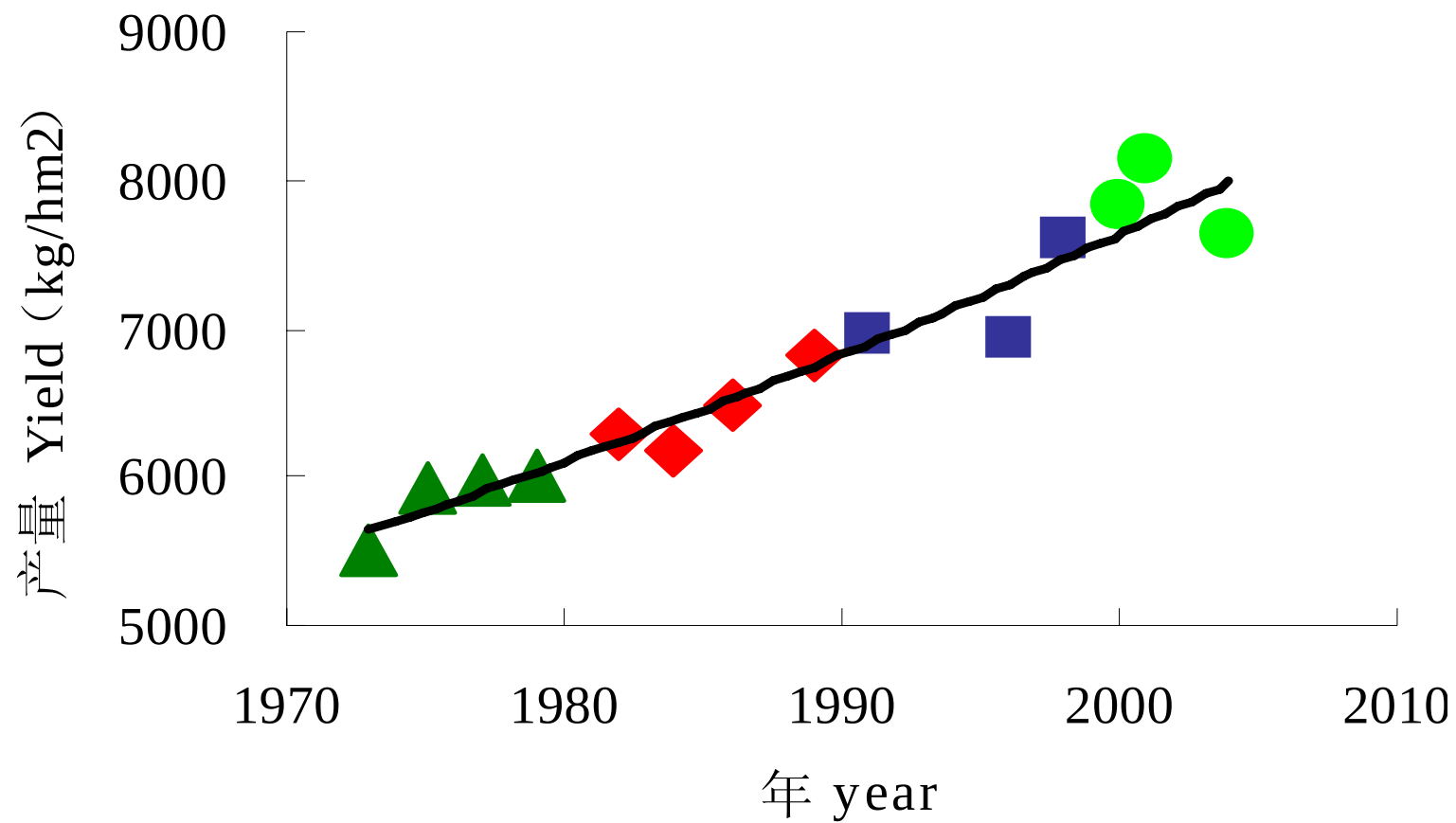
4. WUE和产量的年际变动与品种关系



冬小麦夏玉米从80年代到现在的水分利用效率变动

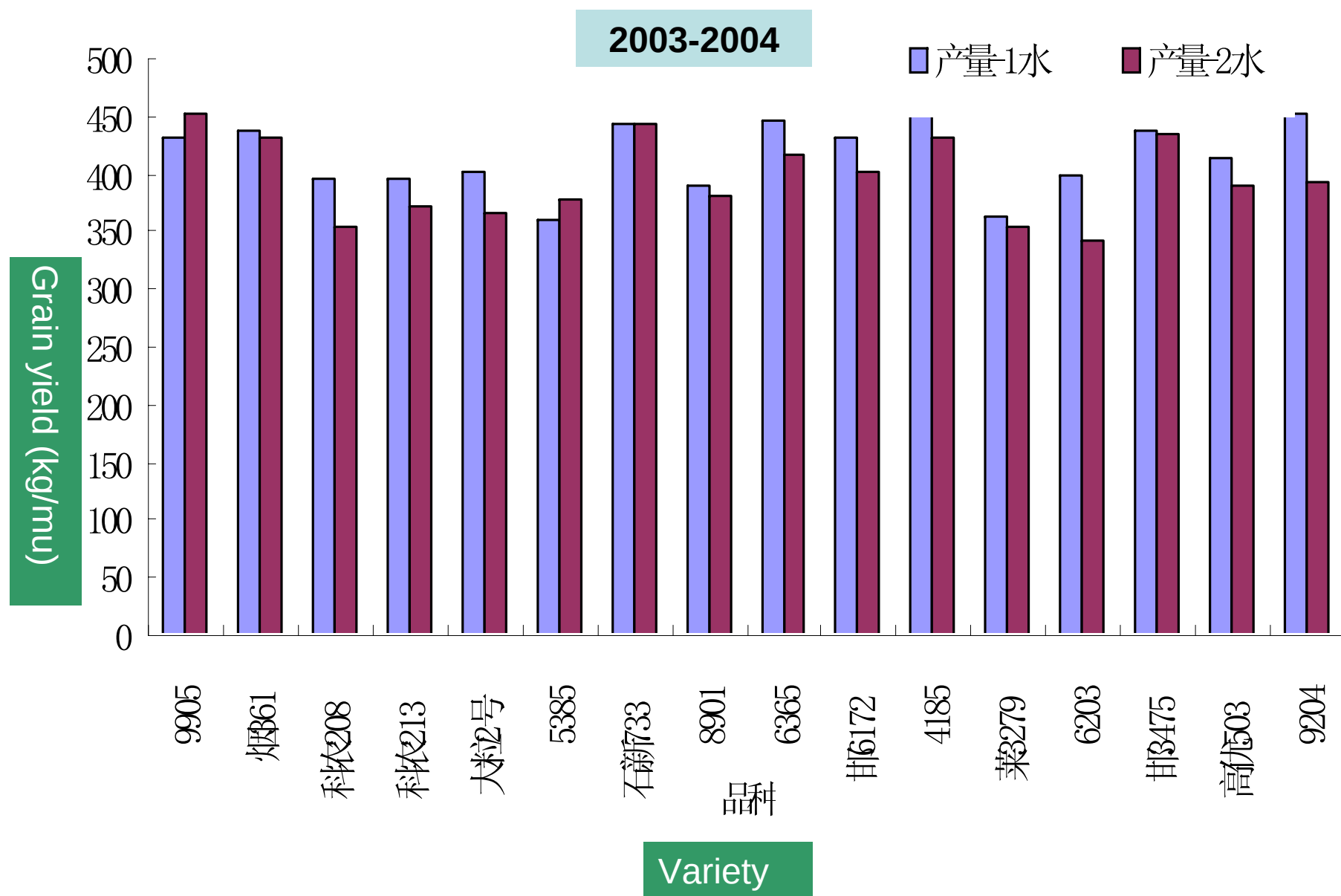


冬小麦和夏玉米产量变动



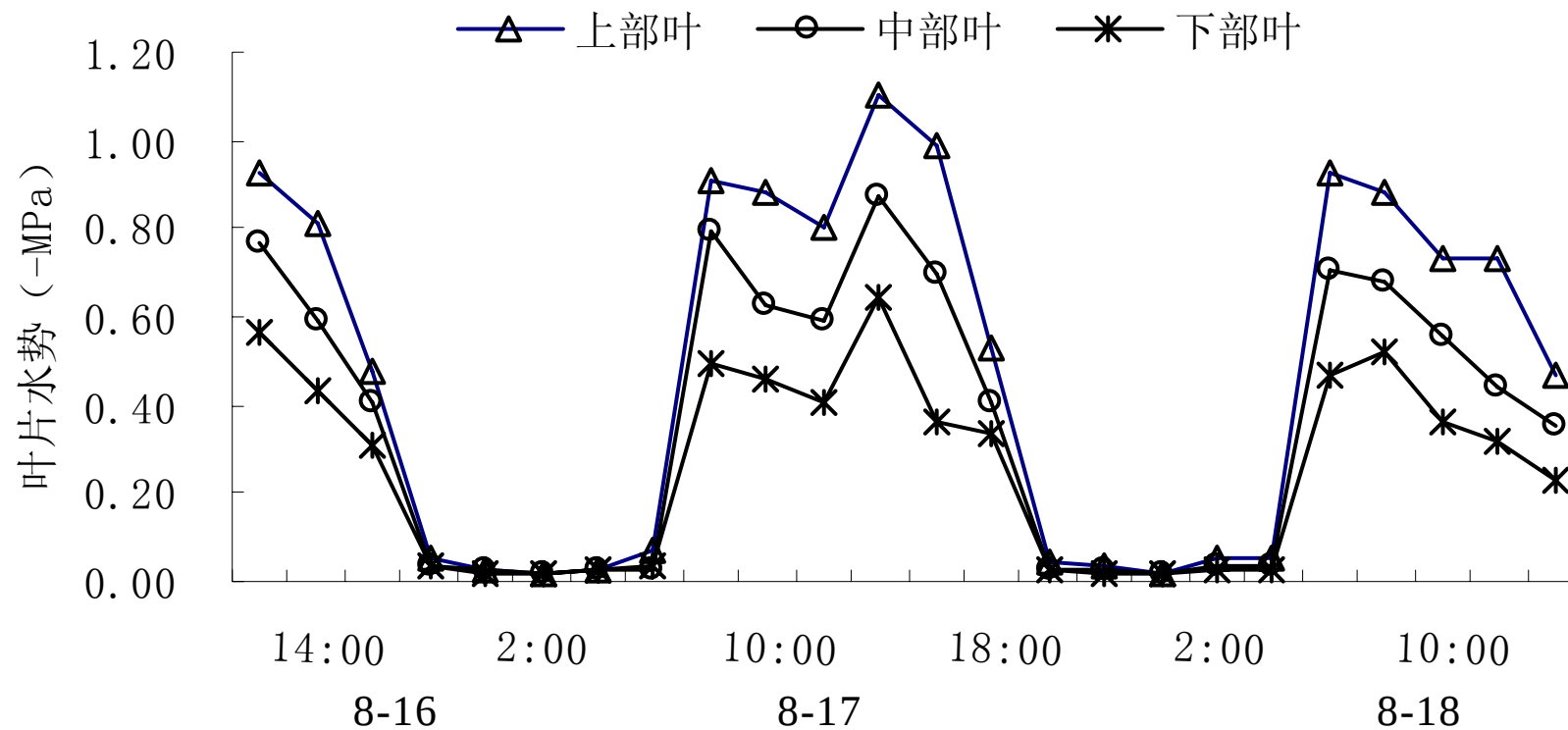
不同年代选育品种在现在同样栽培条件下的产量表现

现代品种间存在着产量和水分利用效率的差异

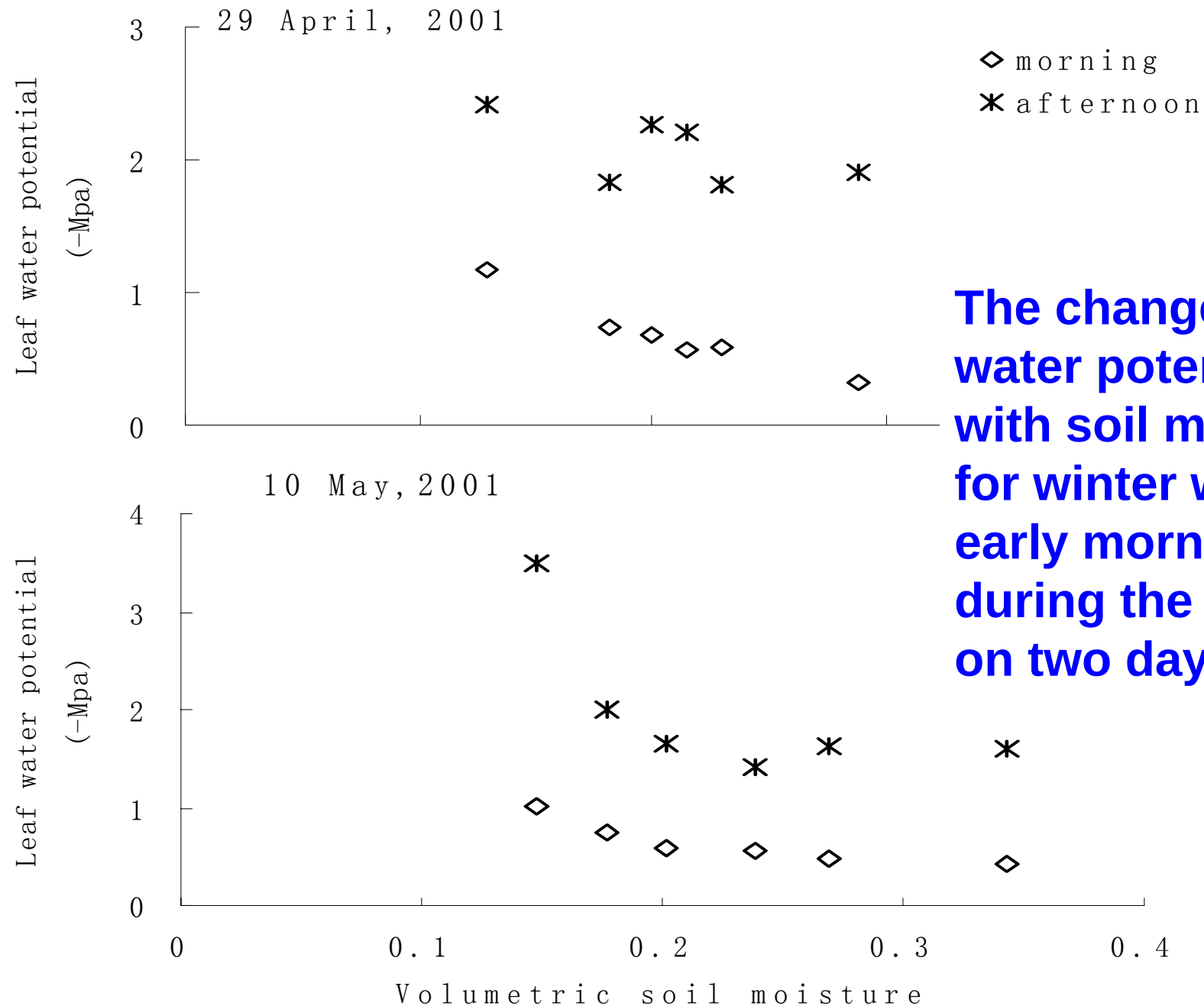


5. 指导灌溉的水分指标体系

(1) 叶片水势

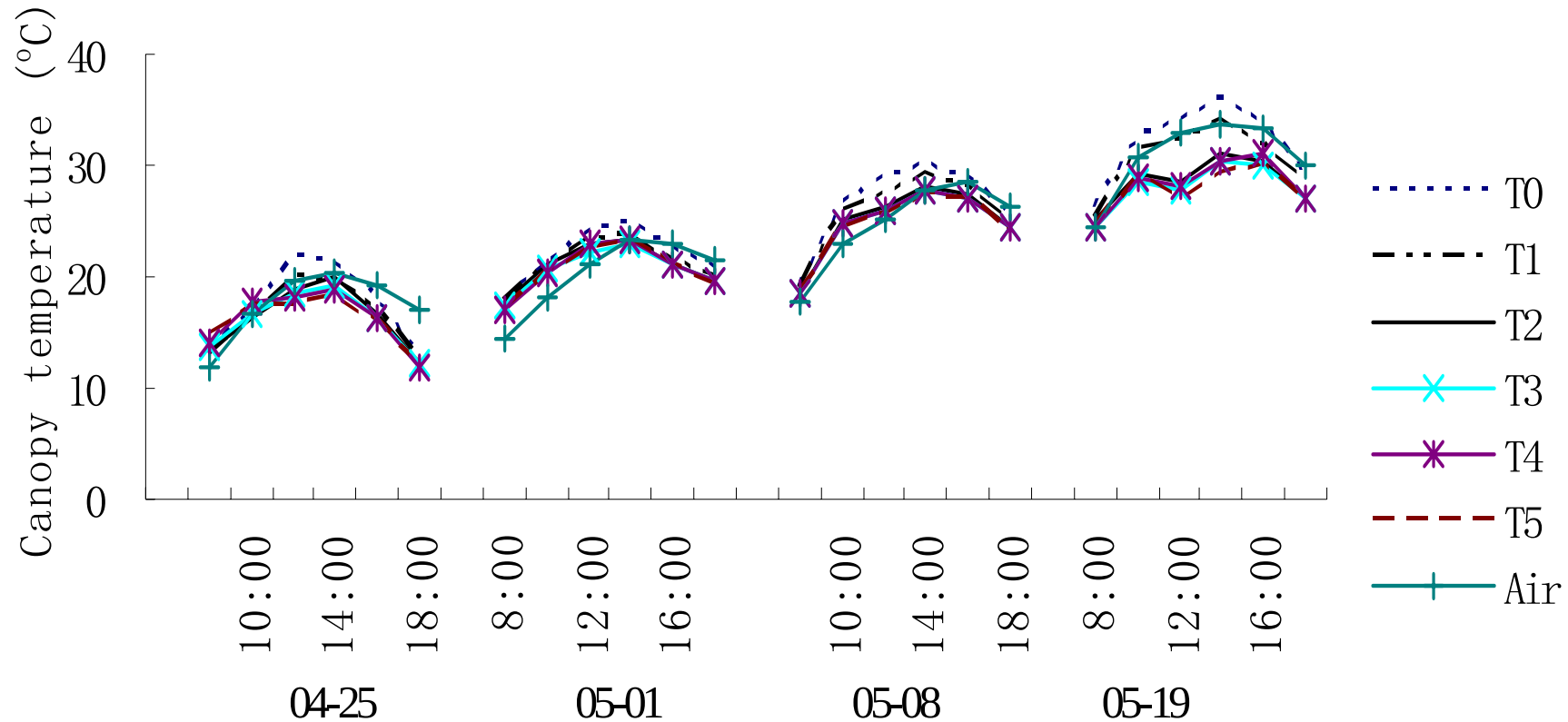


The diurnal change of leaf water potential of maize for three days and the difference of leaf water potential at different locations of the stem (16 Aug. to 18 Aug. 2000)

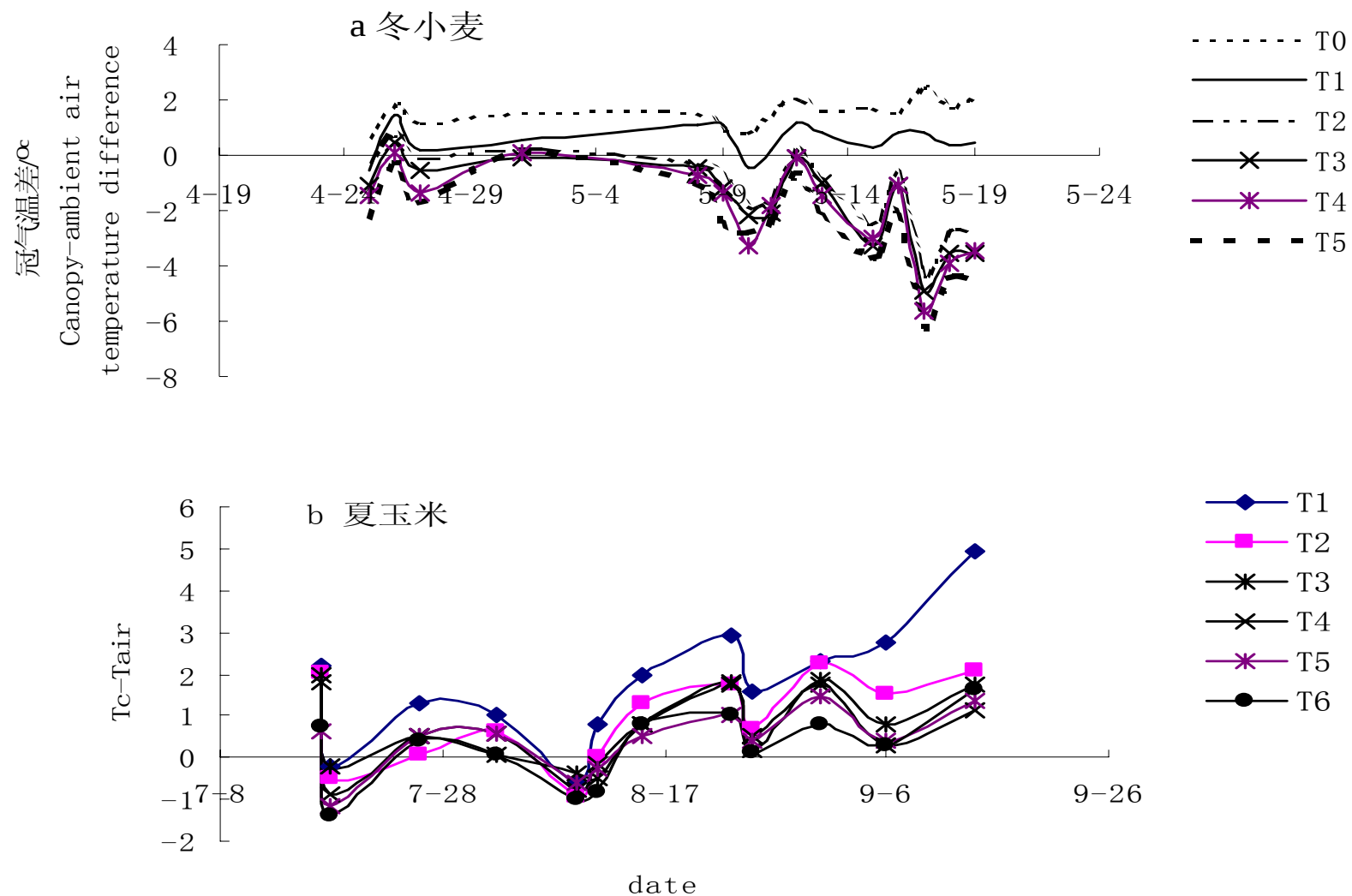


The change of leaf water potential with soil moisture for winter wheat in early morning and during the noon on two days.

(2) 冠气温差

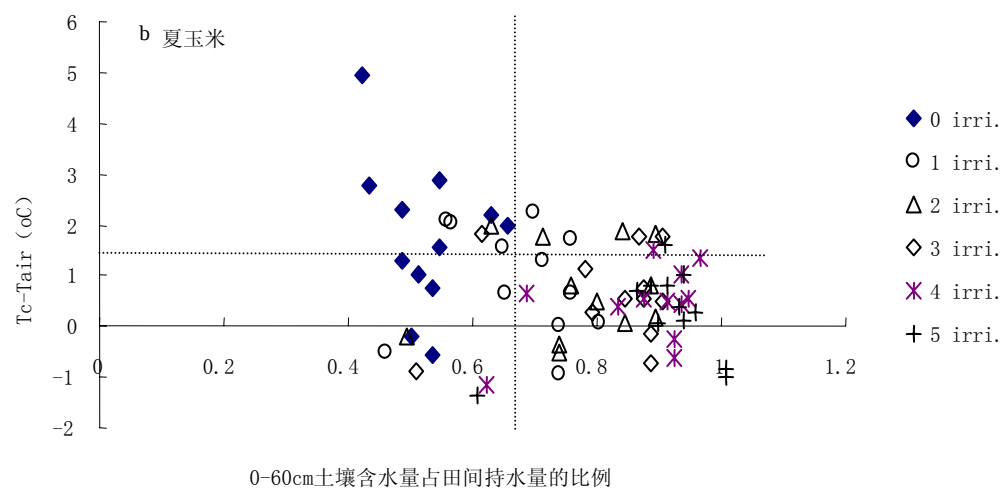
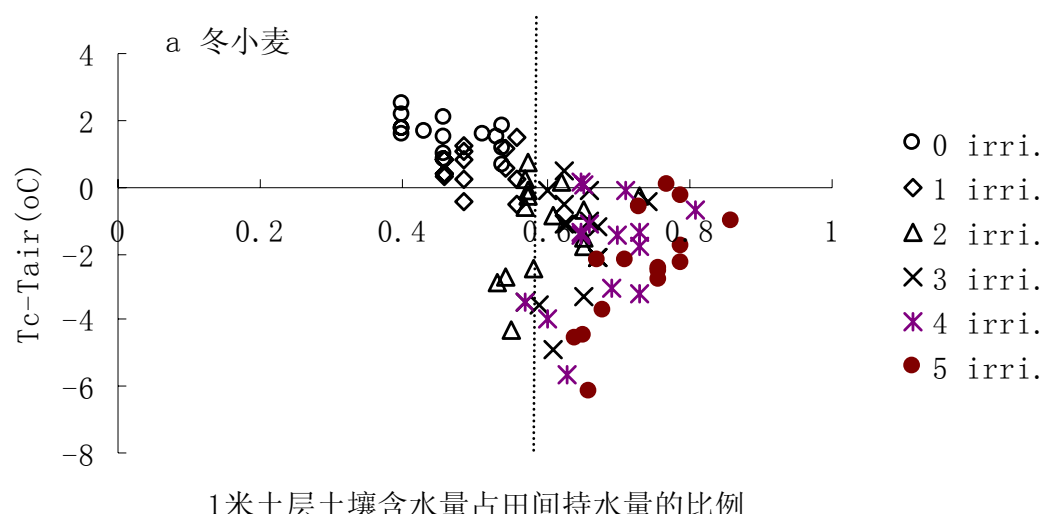


The daily change of canopy temperature for different irrigation treatment in 2000/2001 winter wheat season at four days (T0 to T5 represent irrigation treatments from rain-fed treatment to five number irrigation application treatment)



2000-2001年冬小麦（a）和夏玉米（b）生长期不同灌水处理午间冠层温度与百叶箱温度（Tc-Tair）差值随生育期的变化（T1-T6代表3-2-从不灌水到灌5水处理）

(3) 土壤含水量



当1米土体土壤含水量在占55%-60%的田间持水量时，是冠气温差从负值到正值的转变，一般认为出现正值表示作物开始缺水。

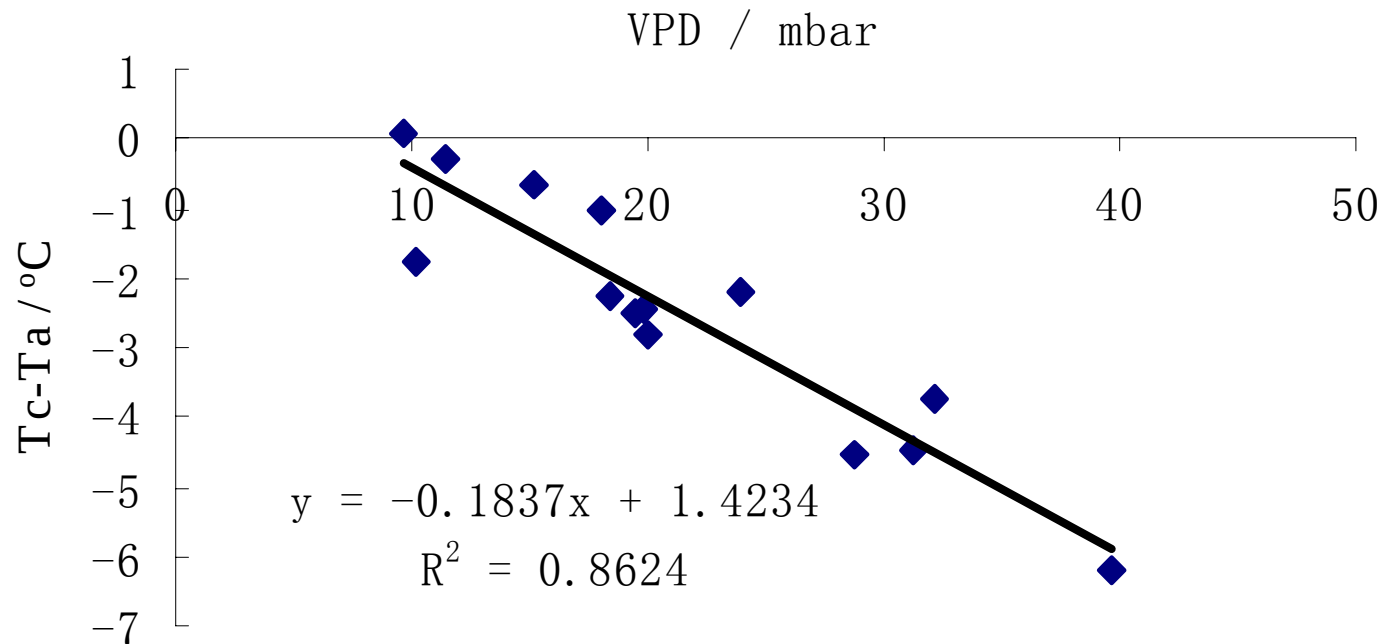
2000-2001冬小麦（a）和夏玉米（b）生长期间不同灌水处理午间冠层温度与百叶箱温度（ T_c-T_{air} ）差值与土壤含水量之间的关系

(4) Crop water stress index (CWSI)

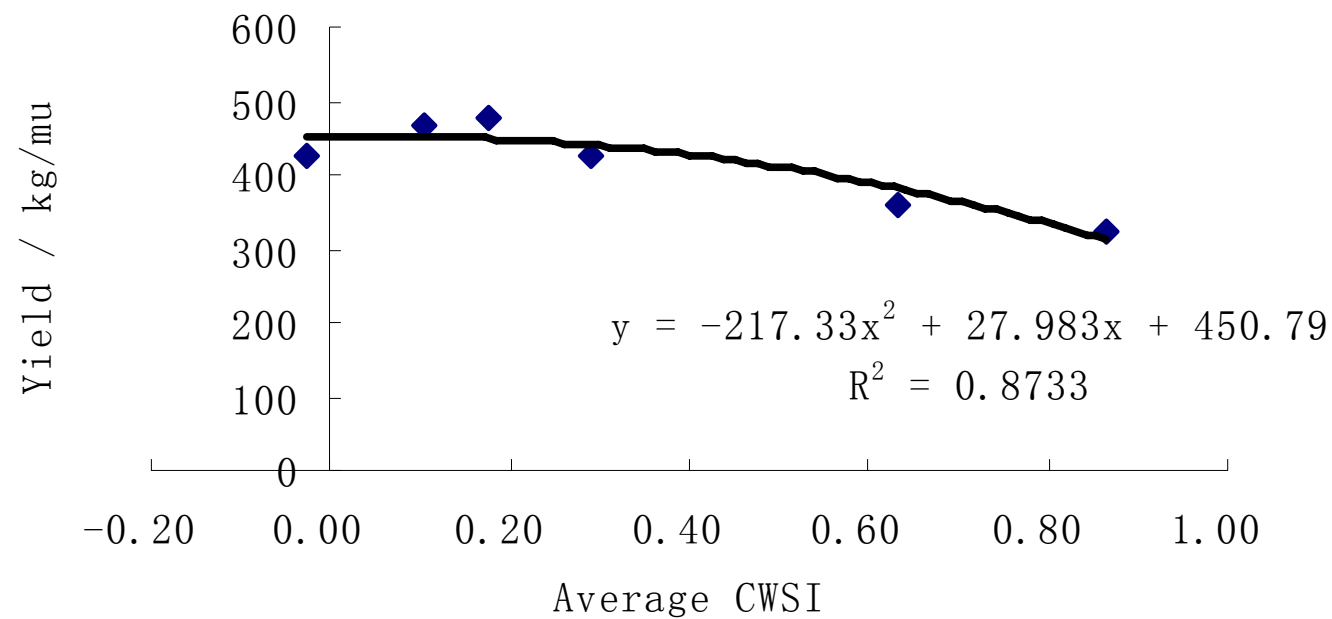
$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - D2}{D1 - D2}$$

D1是冬小麦最大冠气温差，也就是 $T_c - T_a$ 的上限值，根据文献资料，一般认为该上限值为20°C。

D2是 $T_c - T_a$ 的下限值，也就是充分供水的作物冠层温度与气温的差值，可以用基线方程来计算



Non-water-stressed baseline for winter wheat determined by linear regression technique from measurement taken for the 5 applications of irrigation treatment during booting to milky filling period



当CWSI平均在0.1-0.2范围，冬小麦产量最优，因此平均CWSI在0.1-0.2范围是冬小麦优化供水的标准。

The threshold values for irrigation scheduling of winter wheat at different growing stages using different indicators

Indicators	Seedling	Revival	Elongation	Booting to heading	Grain-filling	Maturing
Sensitivity index	0.0712	-0.1213	0.3145	0.2721	0.1016	-0.087
Soil water*	60	55	65	60	60	55
Tc-Tair*/°C	0	0.1~0.2	-0.1~-0.2	0	0	0.2~0.3
CWSI*	0.3	0.4	0.15-0.20	0.3	0.3	0.4
LWPf-LWPm*/MPa	0.3~0.45	0.5~0.6	0.2~0.3	0.3~0.4	0.3~0.45	0.5~0.65

*: Soil water is the percentage of soil moisture over field capacity; Tc-Tair is the temperature difference of canopy with ambient air temperature from meteorological station at midday; CWSI is calculated using equations (5-1 and 5-2); LWPf-LWPm is the leaf water potential difference of well watered leaf water potential with the deficit-treated leaf water potential before sun rising.

主要SCI论文

- Hu Chunsheng, Delgado J.A, Zhang Xiying, Ma Liwang. 2005. Assessment of groundwater use by wheat in the Luancheng Xian Region and potential implications for water conservation in the Northwestern North China Plain, **Journal of Soil and Water Conservation**, 60:80-88
- Zhang Xiying, Suying Chen, Mengyu Liu, Dong Pei, Hongyong Sun, 2005, Improved Water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain, **Agronomy Journal**, 97:783-790
- Zhang Xiying, Chen Suying, Pei Dong, Liu Mengyu and Sun Hongyong, 2005. Evapotranspiration, yield and crop coefficient of irrigated maize under straw mulch, **Pedosphere**, 15(5) 576-584
- Zhang Xiying, Dong Pei and Suying Chen. 2004. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. **Hydrological Processes**, 18:2275-2287
- Zhang Xiying, Peidong, Chunsheng HU. 2003. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain , **Irri. Science**
- Zhang Xiying, Pei Dong, Chen Suying, 2003, Effects of deficit irrigation on yield, yield components and water-use efficiency of winter wheat (Abstract), **Journal of Experimental Botany** (Supplement) 54:18
- Liming Wang, Guoyu Qiu, Xiying Zhang, Suying Chen, 2005, Application of a new method to evaluate crop water stress index, **Irrigation Science**, 24:49-54

谢谢！

请各位专家批评指正！

