

北方稻田生态系统水量平衡及水分效率研究^{*}

罗良国 许健民 罗启仕 闻大中

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

【摘要】 1993~1995年研究了5种不同模式水稻田生态系统水量平衡及水分效率. 结果表明, 不同水稻田模式其总耗水量之间有明显差异, 其中节水模式和节水节肥模式较常规模式节省灌溉水达15~23%, 水分生产效率增加30%以上. 各模式蒸发蒸腾耗水量在同一生长季内基本相同, 田间结构及调控管理对其无明显影响. 实测水稻生育期田间蒸发蒸腾量与计算的可能蒸发蒸腾量相差不超过5%.

关键词 单季稻 稻田生态系统 水分平衡 水分效率 蒸发蒸腾量

Water balance and its efficiency in rice field ecosystems of northern China. Luo Liangguo, Xu Jianmin, Luo Qishi and Wen Dazhong (*Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 1996, 7(4): 371~376.

The water balance and its efficiency in five rice field ecosystems were studied at the lower reaches plain of Liaohe river from 1993 to 1995. The results show that there is a significant difference of total water consumption among different rice field patterns. Comparing with conventional pattern, the improved irrigation and improved irrigation-fertilization patterns can save 15~23% of irrigation water and increase 30% of water efficiency. During the same growing season, each pattern has a similar evapotranspiration, and field structure and control management have no influence on it. During rice development period, the difference between field and potential evapotranspirations is less than 5%.

Key words Single-cropping rice, Rice field ecosystem, Water balance, Water efficiency, Evapotranspiration.

1 引言

下辽河平原是我国北方水资源紧缺的地区之一, 同时又是我国北方单季稻主要产区, 是农田生产中的“用水大户”. 在水资源紧缺的今天, 为充分利用当地有限的水资源, 提高水分利用效率, 提高生产力, 彻底搞清该地区水田生产需水、耗水规律具有重要意义^[1,2,5,6,]. 目前, 我国关于北方稻田生态系统需水耗水规律研究并不多见, 为此, 1993~1995年在沈阳生态试验站进行了北方单季稻水田生态系统的水量平衡及水分效率研究, 试图为北方稻田合

理、高效用水提供科学依据.

2 研究方法

研究地概况见文献^[7].

田间试验设计按常规、稻萍结合、改进施肥、节水和节水节肥5种水田模式进行3次重复试验, 共15个小区. 小区之间留有1m宽的隔离带, 每小区到1m土层深度四周都用油毡纸围隔, 以控制小区之间1m土层内水分的横向流动, 小区面积为45.5 m²; 在另外3个小区中按常规模式、稻萍结合模式和节水模式(实际上亦代表5种水田模式, 因常规与改进施肥、节水与节水节肥模

^{*} 中国科学院“八五”重大项目.

1996年1月2日收到, 3月28日改回.

式分别具有相似的田间水分管理)各设固定式 Lysimeter 进行蒸发蒸腾量测定。

常规模式是依照当地传统方式种稻,水分管理是在插秧至分蘖初期,田间保持水层 3~5 cm 深,而后一直保持田间 1.5~3.0 cm 水层;孕穗抽穗中期至乳熟期,田间恢复 3~5 cm 深水层,以后又保持 1.5~3.0 cm 深;收获前 15 d 晒田。施肥分基肥和 3 次追肥进行。采用常规除草剂和除草农药防治杂草和病虫害。改进施肥模式的基肥采用全层深施(即泡田前撒施而后施耕),追肥采用以水代 N 方式(在田间有水层落至土壤表面无水施尿素后再灌水,以促进根系对肥料的利用)^[8]。稻萍结合模式是茎间放养细绿萍,基肥采用全层深施。节水模式是在分蘖中期、乳熟期采取干湿交替水分管理,在分蘖末期晒田。节水节肥模式是将节水措施和节肥措施相结合的管理模式。另外 5 种水田模式选用水稻品种为辽开 79,田间水稻栽培密度除稻萍模式为 40×20×10 cm 外,其余模式均为 30×10 cm,并以 693 kg·hm⁻²过磷酸钙和 154.5 kg·hm⁻²尿素作基肥,以 252 kg·hm⁻²尿素(3 次追肥总量)和 109.5 kg·hm⁻²氯化钾(孕穗追肥)作追肥。

固定 Lysimeter 是底部 1 m×1 m,高为 1.2 m 的铁桶。桶底底面积的 1/4 处开有多个小孔组成如网状一样的渗水孔,其下焊接体积为 0.5 m×

0.5 m×0.5 m 的盛水箱。桶内填原层次土,当土体填至距桶顶壁 40 cm 处时,紧靠桶壁在其上铺垫 2 层薄膜,以阻挡沿桶壁的渗漏。在桶内紧靠桶壁固定一米尺,以观察桶内水位。

观测田间及 Lysimeter 桶内水层深(用米尺测定)、田间灌水量(用水表测定)、降水量(由站内气象观测场测定)、土壤水分变化量(插秧前与水稻收获后所测土壤含水量之差)、水稻地上部分生物产量和经济产量、稻萍模式还抽样测定翻压前的萍湿重和干重。

3 结果与讨论

3.1 不同水田模式的用水量

3.1.1 水稻生长季降水量 由表 1 可见,1993~1995 年水稻生长季降水量明显不同,1993 年降水属于正常偏少年份,为 448.3 mm,1994~1995 年属降水过多年份,降水量分别为 753.3 和 901.5 mm,1995 年生长季降水约是 1993 年的 2 倍,是 1994 年的 0.3 倍,明显的气候差异给田间水分养分的调控管理和水稻的生长发育带来严重影响。3 年各生长季降水约占用水总量的 20~24%、32~36% 和 40%。

表 1 1993~1995 整个生长季不同水稻田模式的用水量 (mm)
Table 1 Water consumption of different rice field patterns during the whole growth stage from 1993 to 1995

模 式 Pattern	1993			1994			1995		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
I	448.3	1780.5	2228.8	753.3	1604.1	2357.4	901.5	1503.5	2405.0
II	448.3	1584.9	2033.2	753.3	1537.7	2291.0	901.5	1436.3	2337.8
III	448.3	1636.1	2084.4	753.3	1486.0	2239.3	901.5	1399.9	2301.4
IV	448.3	1370.4	1818.7	753.3	1363.2	2116.5	901.5	1228.9	2130.4
V							901.5	1218.5	2120.0

A. 降水量 Rainfall, B. 灌水量 Irrigaion water, C. 用水量 Water consumption; I. 常规模式 Conventional pattern, II. 稻萍模式 Rice-Azolla pattern, III. 改进施肥模式 Improved fertilization pattern, IV. 节水模式 Improved irrigation pattern, V. 节水节肥模式 Improved irrigation fertilization pattern. 下同 The same below.

3.1.2 水稻生长季期间的灌溉水量 不同生长季各生育期灌溉水量变化具有相似的规律性(图 1)。由图 1 可见,几种水田模式在插秧至返青期和分蘖初期灌溉水量相似;而从分蘖中期始至穗分化前,节水模式灌溉水量明显低于其它模式。至孕穗抽穗期,各模式灌溉用水量都较大,原因为水稻

本身生长发育处在需水最关键、最敏感的时期,田间必须一直保持水层。在乳熟期,由于节水模式采取干湿交替调控,其灌溉水量呈下降趋势,而其它 3 种模式灌溉水量仍保持较高水平。不同年度由于各生育期降水不同,相应的田间灌溉水量也有所变化,一般随降水的多或少灌溉水量则相

应减少或增多,但灌溉水量的多少还与该生育期长短及同期田间水分调控要求密切相关。

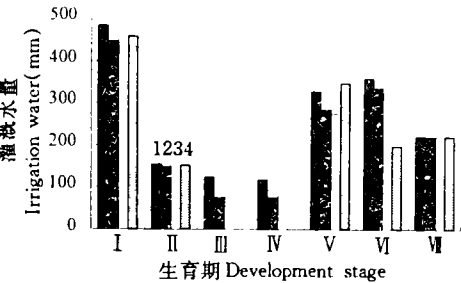


图1 不同水田模式不同生育期的灌溉水量(1993)
Fig. 1 Irrigation water of different development period in different rice field patterns in 1993.
I. 插秧-返青期 Transplanting and reviving stage; II. 分蘖初期 Early tillering stage; III. 分蘖中期 Mid-term tillering stage; IV. 分蘖末期 Later tillering stage; V. 孕穗抽穗期 Booting and heading stage; VI. 乳熟期 Milking stage; VII. 黄熟-收获期 Ripe-harvest stage. 1. 常规模式 Conventional pattern, 2. 稻萍模式 Rice-Azolla pattern, 3. 改进施肥模式 Improved fertilization pattern, 4. 节水模式 Improved irrigation pattern. 下同 The same below.

3.1.3 水田用水量 各生育期的灌溉水量与同期降水量之和即为该时期的用水量。水田生产过程的用水总量包括整地泡田时的用水量 and 水稻生育期内用水量 2 个部分。由表 1 可见 1993~1995 年不同年份,水田生产的用水总量均以常规模式最高,分别为 2228.3、2357.4 和 2405.0 mm,而以节水(或节水节肥)的模式最低,分别为 1818.7 (1993)、2116.5 (1994) 和 2130.4 mm (或 2120.0 mm) (1995)。1993、1994 年节水模式比常规模式可分别节省灌溉水 23% 和 15%, 1995 年节水模式和节水节肥模式比常规模式分别节省灌溉水 18.3% 和 19%。

3.2 田间蒸发蒸腾量

3.2.1 各生育期蒸发蒸腾量与生长季总蒸发蒸腾量 由于水稻各生育期所处的季节和时间的长短不同,同时由于气候条件本身的差异,各生育期的蒸发蒸腾量略有不同,但基本变化趋势相似。由图 2 可见,不

同模式田间蒸发蒸腾量在同一生育期内,彼此相近而且均以孕穗抽穗期最大,插秧-返青期和乳熟期次之,再其次是黄熟-收获期、分蘖中期和分蘖末期,分蘖初期最小。

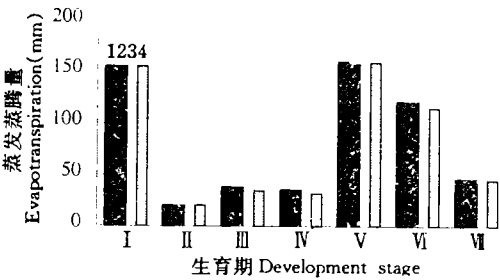


图2 不同水田模式不同生育期的蒸发蒸腾量(1993)
Fig. 2 Evapotranspiration of different development period in different rice field patterns in 1993.

表2 1993~1995 整个生长季不同水稻田模式的蒸发蒸腾量(mm)
Table 2 Evapotranspiration (ET) of different rice field patterns during the whole growth stage from 1993 to 1995

年份 Year	模式 Pattern				
	I	II	III	IV	V
1993	575.7	572.8	575.7	560.2	
1994	511.9	512.6	511.9	516.9	
1995	518.7	517.0	518.7	499.7	499.7

由表 2 可见,在同一年份,不同模式的总蒸发蒸腾量基本相近。1993 年水稻生育期内各水田模式的总蒸发蒸腾量为 560.2~575.7 mm,相差不过 3%;1994 年为 511.9~516.9 mm,相差不过 1%,差异极不显著;1995 为 499.7~518.7 mm,相差不过 4%,说明尽管不同模式的水田生态系统在结构或调控管理上有很大差异,但这种差异并未对水田的蒸发蒸腾量产生明显影响。即使在节水(或节水节肥)模式的水田,其蒸发蒸腾耗水也并不比一直保持有水层的水田有明显的降低;水田的蒸发蒸腾量主要受水稻生长季各生育期的天气条件的影响。1993 年与 1994、1995 年水稻生育期总蒸发蒸腾量的年际差异较明显,1993 年的水稻生育期总蒸发蒸腾量较 1994 年高约 12%,较 1995 年高约 15%,

这是年际间的气候条件差异所致.

3.2.2 实测蒸发蒸腾量与可能蒸发蒸腾量之比较 以推荐的 Penman 公式快速查表

表 3 1993~1995 不同水稻田模式实测田间蒸发蒸腾量与当季可能蒸发蒸腾量的比较(mm)

Table 3 Comparison between real and potential evapotranspirations in different rice field patterns from 1993 to 1995

年份 Year	A	I	B	II	B	III	B	IV	B	V	B
1993	562.2	575.7	0.024	572.8	0.017	575.7	0.024	560.2	0.004		
1994	523.7	511.9	0.023	512.6	0.021	511.9	0.023	516.9	0.013		
1995	496.0	518.7	0.045	517.0	0.042	518.7	0.045	499.7	0.007	499.7	0.007

A. 可能蒸发蒸腾量 Potential evapotranspiration, B. 百分比 Percentage.

$$ET = \frac{\delta}{\delta + \gamma} \cdot \frac{1}{L} \{ [Q + q] \cdot (0.248 + 0.75 \frac{n}{N})(1 - r) \} [\sigma T_a (0.56 - 0.08 \sqrt{ed})(0.1 + 0.9 \frac{n}{N})] \{ + \frac{\gamma}{\gamma + \delta} \cdot [0.26(1 + 9.8 \times 10^{-3} \mu_2)(e_a - e_d)] \}$$

式中, ET 为可能蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), δ 为气温等于 T_a 时饱和水汽压曲线的斜率($\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), γ 为干湿球常数, L 为蒸发潜热($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$), $(Q + q)$ 为晴天条件下的太阳总辐射, (n/N) 为日照百分率(实测日照时数 n 与可照时数 N 之比), r 为反射率(对农田常绿植被覆盖, 采用 0.2), σ 为玻尔兹曼常数, T_a 为时段平均气温($^\circ\text{C}$), e_d 为空气的水汽压(mbar), e_a 为气温为 T_a 时的饱和水汽压(mbar), μ_2 为 2m 高度处的平均水平风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). 由表 3 可见, 在同一年内, 不同水田模式实测田间蒸发蒸腾量与 Penman 由公式计算的可能蒸发蒸腾量相比, 其差值均 $< 5\%$. 这表明可采用 Penman 公式所计算的当地同期可能蒸发蒸腾量值代表该地水田生育期内的蒸发蒸腾量, 从而使水田水量平衡研究大为简化, 这对于水稻生产中评估和改善水分管理实践也是极为有意义的.

3.3 田间渗漏水量与水量平衡

按照水量平衡原理, 本实验中的水稻

计算法^[3,4]和 1993~1995 年沈阳市作物生长季气象资料, 并按下式计算该地区水稻生长季的可能蒸发蒸腾量(表 3).

生育期内的水量平衡式^[9,10]可写成: 降水量 + 灌水量 = 蒸发蒸腾量 + 渗漏量 + 土壤水分变化量.

实验中已测得了降水量、灌水量、蒸发蒸腾量和生育期前后土壤水分变化量, 因而依据此平衡公式求得水田的渗漏水量(表 4). 由表 4 可见, 在水量平衡要素中, 由于不同水田模式在同一生育期内的降水量相同, 田间蒸发蒸腾量又相近似, 因而不同水田模式在生育期的田间灌溉水量之间的差异决定了不同水田模式田间渗漏水量的差异. 1993~1995 年, 几种水田模式的田间渗漏水量均以常规模式最大, 节水(或节水节肥)模式最低. 渗漏水量最大的常规模式 1995 年和 1994 年相差较小, 但分别较 1993 年渗漏水量大 22% 和 21%; 而渗漏水量最小的节水(或节水节肥)模式 1995 年和 1994 年基本相近, 但较之于 1993 年的渗漏水量均高出 40% 左右. 显然, 这是由于年际间生长季气候差异较大所致. 1994、1995 年过多的降水给水田水分的人工调控工作带来较大困难, 有时难以达到预先控制要求, 且因总蒸发蒸腾量减少, 多余的水量则随渗漏带走, 从而使渗漏水量加大. 3 年试验表明, 在稻作生长季, 该地区耗于田间渗漏损失的水量占总用水量的 70% 左右, 采取干湿交替调控管理的节水(或节水节肥)模式比常规模式可降低渗漏水量 13~23%, 节水效果显著.

表 4 1993~1995 年不同水稻田模式的水量平衡(mm)
Table 4 Water balance of different rice field patterns from 1993 to 1995

项 目 Items	1993				1994				1995				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	V
A	1780.5	1584.9	1636.1	1370.4	1604.1	1537.7	1486.0	1363.2	1503.5	1436.3	1399.9	1228.9	1218.5
B	448.3	448.3	448.3	448.3	753.3	753.3	753.3	753.3	901.5	901.5	901.5	901.5	901.5
C	575.7	572.8	575.7	560.2	511.9	512.6	511.9	516.9	518.7	517.0	518.7	499.7	499.7
D	1483.2	1315.1	1405.4	1107.7	1789.0	1732.0	1688.0	1559.3	1813.3	1757.1	1723.6	1567.8	1542.6
E	169.9	145.3	103.3	150.8	56.5	46.4	39.4	40.3	73.0	63.7	59.1	62.9	77.7

A. 灌溉水量 Irrigation; B. 降雨量 Rainfall; C. 蒸发蒸腾量 Evapotranspiration; D. 渗漏量 Leakage; E. 变化量 Conversional.

减少田面水层深度和适时保持田面干湿交替状态, 实质上减少了水田的渗漏水量(图 3).

3.4 水稻产量及水分效率

3.4.1 生物产量与经济产量 表 5 列出了不同水田模式在 1993~1995 年收获的经济产量(籽实产量)和地上部生物产量(经济产量加秸秆产量). 由表 5 可见不同年份不同水田模式其经济产量和生物产量的差异, 不仅与各年气候条件有关, 还与水稻品种有关. 同一年份不同模式的产量之间差

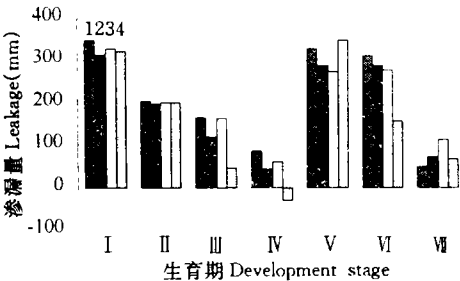


图 3 不同水田模式不同生育期的渗漏量(1993)
Fig.3 Leakage of different development periods in different rice field patterns in 1993.

表 5 1993~1995 不同水田模式的水稻生物产量与经济产量的比较(kg·hm⁻²)
Table 5 Comparison between biological and economical yields in different rice field patterns from 1993 to 1995

项 目 Items	1993				1994				1995				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	V
A	8787.0	8563.5	8940.0	9106.5	6754.5	6330.0	7452.0	7021.5	8374.5	8382.0	8470.5	8586.0	8514.0
B	6942.0	6765.0	7062.0	7194.0	5538.0	5190.0	6111.0	5757.0	6864.0	6867.0	6943.5	7038.0	6978.0
C	15729.0	15328.5	16002.0	16300.5	12292.5	11520.0	13563.0	12778.5	15238.5	15124.9	15141.0	15624.0	15492.0

A. 经济产量 Dry seed yield; B. 秸秆产量 Dry straw yield; C. 地上部分生物产量 Biological yield.

异不大, 但通过水肥调控后的节水、节水节肥或改进施肥模式均比常规模式在单产上有所提高, 但稻萍模式产量最低.

3.4.2 水分利用效率与生产效率 以 1 hm² 水田实际灌溉的单位水量(mm)所生产的干物质(稻谷)(kg)数作为灌溉水的生产效率, 而以蒸发蒸腾消耗水量(mm)所生产的干物质(稻谷)(kg)数作为水田的水分利用效率^[4,5]. 事实上, 作物生长实际所需的是蒸腾耗水和不可避免的棵间蒸发耗水. 水分利用效率和水分生产效率在衡量水资源利用方面同样都很重要, 而前者能

更好地反映水的有效利用情况.

依据表 1、2、5 的计算得到不同年份不同水田模式的水分效率结果(表 6). 比较表中水分利用效率和水分生产效率可知, 由于不同水田模式具有相似的蒸发蒸腾量, 且作物产量之间差异不大, 因此作物水分利用效率亦相近似. 但因灌溉水量各有不同, 水分生产效率就有明显差异. 采取水肥合理调控的水田模式水分生产效率则有明显提高, 尤其是节水(或节水节肥)模式较常规种稻可提高水分生产效率达 30% 以上.

表 6 1993~1995 不同水田模式的水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Table 6 Water use efficiency in different rice field patterns from 1993 to 1995

项目 Items	1993		1994		1995	
	A	B	A	B	A	B
I	1.02	0.33	0.88	0.28	1.08	0.37
II	1.00	0.36	0.82	0.27	1.08	0.39
III	1.04	0.36	0.97	0.33	1.09	0.40
IV	1.08	0.44	0.91	0.35	1.15	0.47
V					1.14	0.47

A. 水分利用效率 Water use efficiency, B. 水分生产效率 Water production efficiency.

4 结 论

4.1 在沈阳郊区潮棕壤水田条件下, 整个水稻生育期内水田耗水量高达 2200 ~ 2400 mm, 其中仅 20 ~ 40% 是由降水补给, 其余均依靠灌溉供给. 不同气候年份的耗水量亦有变化.

4.2 尽管对水田生态系统采取的水肥调控和管理措施不同, 但在同一年份的整个生育期内, 不同调控管理模式的水田生态系统的总蒸发蒸腾量几乎相同, 其数值约为水田用水量的 1/4. 同时, 水田总蒸发蒸腾量值与采用 Penman 公式所计算的该地区同一时期农田的可能蒸发蒸腾量值十分近似, 二者相差不过 5%. 因而可以采用 Penman 公式计算的可能蒸发量值作为该地区水田实际蒸发蒸腾量的估算值, 从而使该地区水田水量平衡研究大为简化.

4.3 水田的水分渗漏是水田耗水的主要方面, 即使在沈阳生态实验站的渗漏能力较差的潮棕壤条件下, 整个水稻生育期内的田间渗漏量将达到水田耗水总量的 70% 以上. 对水田采取各种节水措施, 实质上是努力减少水田的渗漏水损失. 尽可能

减少水田田面水层厚度, 适时使田面落干等措施都是减少渗漏水损失的有效途径. 在沈阳地区采取浅湿灌溉、干湿交替的节水灌溉方法, 可较常规方法节省灌溉用水 (或减少田间渗漏水量) 15 ~ 23%.

4.4 加强对水稻的栽培管理, 搞好水田的水肥调控, 努力提高水田单位面积的产量, 是提高水田水分利用效率的基础. 在沈阳地区正常年景情况下, 水田蒸发蒸腾的水分利用效率可达 $1 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上, 灌溉水的水分生产效率为 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上, 改进水田的施肥管理和采取节水灌溉方法, 可提高水稻单产, 同时使水分利用效率有所提高, 特别是使灌溉水的水分生产效率明显提高, 通常可达 30%.

参考文献

- 1 山 仑、解 萌. 1991. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报, 1(1): 70~76.
- 2 王天锋. 1991. 黄淮海平原的农业利用问题之一——水利的效率. 农业现代化研究, 12(4): 33~37.
- 3 王懿贤. 1983. 彭门蒸发力快速表算法. 地理研究, 2(1): 93~107.
- 4 左大康. 1986. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. 气象学报, 33(1): 81~84.
- 5 叶永成、曹振贤等. 1989. 沈阳国土资源. 沈阳: 沈阳出版社.
- 6 宋达泉、沈善敏、金和春等. 1987. 辽宁省国土资源. 沈阳: 辽宁人民出版社.
- 7 苏凤岩、闻大中、徐卿德等. 1996. 北方稻田生态系统研究 I. 稻萍结合系统的结构研究. 应用生态学报, 7(2): 179~184.
- 8 邹邦基、赫荣臻、杨玉兰. 1991. 提高稻田氮素效益的施肥技术. 应用生态学报, 2(3): 238~243.
- 9 Talsma, T. 1986. Water requirement of irrigation rice in semi-arid region. Agric. Water Manage., 11(11): 75~90.
- 10 Tripathi, R. P., Kushwaha, H. S. and Mishra, R. K. 1986. Irrigation requirement of rice under shallow water table conditions. Agric. Water Manage., 12(1~2): 127~136.