

寒地稻作不同节水灌溉模式降雨利用率潜力分析

戚颖^{1,2}, 赵雨森^{1*}, 王斌², 朱士江²

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 东北农业大学水利与建筑学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要 为研究不同灌溉模式降雨利用潜力, 以寒地稻作为研究对象, 系统分析了灌溉站 30 年的试验资料, 结合同时期降雨数据, 分别对有无蓄雨要求的几种灌溉模式进行了理论分析。结果表明, 无蓄雨要求时, 控制灌溉降雨利用率最低, 间歇灌溉较低, 常规灌溉较高, 而湿润灌溉最高; 在相同的蓄雨条件下, 控制灌溉降雨利用率最高, 湿润灌溉居次, 间灌第三, 常规灌溉最低。由此可见, 控制灌溉的降雨利用潜力最大, 其他灌溉模式低于控灌; 不同的灌排及蓄雨标准能够对降雨利用率产生较大影响。

关键词 寒地稻作; 水分利用效率; 灌溉模式; 降雨利用率

中图分类号 S511 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)22-07526-03

Analysis on Rainfall Use Potential of Different Irrigation Modes for Rice Paddy Field in Cold Area

QI Ying, ZHAO Yu-sen et al (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040; College of Water Conservancy and Building Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030)

Abstract To study rainfall use potential of different irrigation modes for rice paddy field in cold area, it analyzed systematically experimental materials, with rainfall data, and researched on irrigation modes with rain storage requirements and without rain storage requirements. The results showed, without rain storage requirements, the rainfall use ratio of control irrigation is the lowest and of wetting irrigation is the highest and that with the same rain storage requirements, the rainfall use ratio of control irrigation is the highest, of wetting irrigation second, flooding irrigation lowest. The conclusions can be got: the rain use potential of control irrigation is the highest; different irrigation and drainage and rain storage requirements have important influence on rain use ratio.

Key words Rice in cold area; WUE; Irrigation mode; Rainfall use ratio

据统计, 2014 年黑龙江省水稻种植面积达 343.4 万 hm^2 , 年用水量 300 多亿 m^3 , 水稻生产用水量占农业生产用水总量 97%。可见, 发展水稻节水新技术对水资源利用具有十分重要的现实意义。水稻节水灌溉的前提是充分利用降雨^[1]。降雨利用率是指有效降雨量在天然降雨量中所占的比重。关于有效降雨量的定义, 水文学与农田水利学中给出了不同的定义。根据水文学的定义, 有效降雨量是指能够产生径流的雨量, 而根据农田水利学上的定义, 其是指能够为作物生长提供水分的雨量^[2]。对于有效降雨量的精确计算是计算降雨利用率的基本前提, 可以直接为灌区规划设计、运行管理等工作服务, 在优化配置区域水资源过程中具有重要的作用^[3-4]。

有效降雨量的计算方法有国内专家学者通常采用的经验系数法和国外常见的 Hershfield、USDA - SCS^[5]、SWBM 等。经验系数法根据统计学原理, 在试验站长期观察数据的基础上, 统计出有效降雨量与降雨量的比值, 作为该地区降雨利用率系数。一般认为, 当降雨量 $> 50 \text{ mm}$ 时, 属于有效降雨, 系数取 0.7 ~ 0.8; 当降雨量为 5 ~ 50 mm 时, 属于有效降雨, 系数在 0.8 ~ 1.0; 当降雨量 $< 5 \text{ mm}$ 时, 该次降雨是无效降雨, 对于农作物水分供应无效^[6]。通常作物有效降雨量的大小受植物截留、渗透、排水等因素影响, 对于水稻而言, 还会受到不同灌溉模式的制约, 不同的灌溉模式, 其水分管理要求不同, 从而影响到天然降雨的有效利用率^[7]。笔者以

黑龙江省水稻灌溉试验站 30 年的试验数据为依据, 根据土壤水量平衡理论, 采用 FAO56-PM 公式计算作物腾发量, 对控制灌溉、间歇灌溉、湿润灌溉和常规灌溉 4 种灌溉模式的天然降水利用率逐一进行分析, 得到各自的降雨利用率; 同时, 通过盆栽对比试验实测每种模式的降雨利用率, 以期为合理开发利用水资源提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料选取 文中所涉及的 30 年(1978 ~ 2008 年)的气象资料由中国气象科学共享服务平台提供, 水稻灌溉试验资料由黑龙江省水稻灌溉站提供。

1.2 土壤水量平衡 SWBM 是对农田水文过程的简化模拟, 主要因素有降雨、灌溉、渗透、排水、蒸发、土壤水分变化及深层渗透等。据此, 可写出 Δt 时间段内的土壤含水量变化公式: $\Delta V = R + IR - (I + Q + ET + DP)$, 式中, ΔV 为土壤含水量的变化量, R 为降雨量, IR 为灌溉量, I 为植物截留水量, Q 为径流量, ET 为腾发量, DP 为深层渗漏量。其中, R 根据气象资料可以查获; I 该部分很少, 可以忽略; DP 基本为一常数; Q 为超出灌溉标准后的排水量; ET 可由气象资料计算得到; ΔV 是未知量^[2]。根据降雨量、径流量与渗漏量, 可以得到有效降雨量。计算的关键是作物腾发量 ET 。笔者采用 FAO56PM 公式^[8-9]进行腾发量计算。

1.3 FAO56 Penman-Monteith 公式需水量数学模型 众多研究者经过研究发现不论在干旱还是在湿润地区, Penman-Monteith 公式均是最准确的一种计算方法^[10-12]。1990 年, FAO 在意大利召开的蒸发蒸腾量计算专题国际会议推荐用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量。1998 年, FAO 给出了 Penman-Monteith 公式的最新修正式, 以下简称 FAO56 Penman-Monteith 公式^[8-9]。FAO56 Penman-Monteith

基金项目 国家科技支撑计划项目(2009BADB3B04); 国家自然科学基金资助项目(51009026, 41271046)。

作者简介 戚颖(1979 -), 女, 山东威海人, 讲师, 在读博士, 从事水土保持及生态安全等方面的研究。* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事水土保持方面的研究。

收稿日期 2014-07-07

公式基本方程为： $ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}$ ，式中， ET_0 为应用

Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量，mm/d； T 为 2 m 高处平均气温，℃； Δ 为温度 - 饱和水汽压关系曲线在 T 处的斜率，kPa/℃； R_n 为作物表面净辐射，MJ/(m²·d)； G 为土壤热通量，MJ/(m²·d)； γ 为湿度表常数，kPa/℃； u_2 为 2 m 高处风速，m/s； e_s 为饱和水汽压，kPa； e_a 为实际水汽压，kPa。FAO56 Penman-Monteith 公式基本方程表明， ET_0 的计算共需 8 个参数。实际上，FAO56 Penman-Monteith 公式参数的计算过程表明，对于固定地点，计算所需的气象数据主要有最高气温、最低气温、相对湿度、风速和日照时数 5 个参数。温度、湿度、风速和日照时数均是常规的气象资料，容易获取。采用 FAO 推荐的参考作物系数法计算作物需水量，其计算公式为： $ET = k_c ET_0$ ，式中， k_c 为作物系数，视作物类型而定。

1.4 盆栽对比试验 项目试验区在黑龙江水稻灌溉试验中心站进行，地理坐标 125°44'E、45°63'N，属于典型的寒地黑土分布区。试验采用控制灌溉、间歇灌溉、湿润灌溉 3 种节水灌溉模式，以常规淹灌为对照，4 个处理，3 次重复。试验小区面积 100 m²，共 12 个小区，四周加设保护行，其间种植作物为水稻。小区与小区之间采用塑料板与水泥埂作为隔

渗材料(埋入地下 40 cm)，防止发生侧向渗漏。另设桶栽试验与小区试验相配合，各设 4 个处理，每个处理 6 次重复，分为设置遮雨棚桶栽与不设置遮雨棚桶栽。测桶采用圆柱形塑料桶，规格 50 cm，直径 52 cm，面积约 0.2 m²。测桶摆放在周围为水田的空地上，形成与大田相似的田间小气候。设置遮雨棚的桶栽试验，其需水量 E_1 全部由灌溉水 IR_1 提供，不设遮雨棚的盆栽水稻其需水量 E_2 由灌溉水 IR_2 和有效降雨量 ER 组成。试验中，遮雨棚的盆栽水稻需水量 E_1 ，即灌溉水量 IR_1 可直接测得，不设遮雨棚的盆栽水稻其灌溉水量 IR_2 可直接测得，二者之差，即($IR_1 - IR_2$)为由于遮雨棚的遮雨作用而额外补充的水量，等同于有效雨量 ER 。根据同期降雨数据可获得实际降雨量 R ，从而得到不同灌溉模式的天然降水利用率。

小区试验及桶栽试验采用相同的施肥标准。基肥，氮 72 kg/hm²、磷 72 kg/hm²、钾 104 kg/hm²；分蘖肥仅施氮肥 54 kg/hm²；穗肥，氮 36 kg/hm²、磷 18 kg/hm²、钾 26 kg/hm²；粒肥仅施氮肥 18 kg/hm²。其中，不同灌溉模式的水分管理标准如表 1 所示。试验时，当测得土壤水分达到下限标准，立即进行灌溉，且只灌水至上限。此时可利用钢尺读出田间土层厚度。期间遇到降雨，必须进行加测。在无土层情况下，可利用土壤水分测定仪测定土壤水分。项目区大田表层土壤 20 cm 以内的体积饱和含水率 54.72%。供试品种为北方绿洲本田生育期 108 d。

表 1 不同灌溉模式水分管理标准

灌溉模式	返青期	分蘖初	分蘖盛	分蘖末	拔孕期	抽开期	乳熟	黄熟
控制灌溉	0~30	70%~100%	70%~100%	晒田	80%~100%	80%~100%	75%~100%	落干
间歇灌溉	0~30	0~40	0~40	晒田	0~30	0~40	0~40	落干
湿润灌溉	0~30	0~30	0~20	晒田	0~10	0~20	0~20	落干
常规淹灌	0~30	0~80	0~80	晒田	0~80	0~80	0~80	落干

注：大于零的整数代表稻田土层厚度，单位为 mm；百分数代表稻田土壤水分含量，100%代表稻田土壤水分达到饱和状态。

2 结果与分析

2.1 考虑蓄雨要求的不同灌溉模式天然降水利用率 从蓄雨条件下控制灌溉的降雨利用率(表 2~3)可以看出，在蓄雨上限为 30~40 mm 时，控制灌溉天然降雨有效利用率为 86.05%；当控制灌溉的蓄雨上限采用 30~80 mm 时，其天然降雨有效利用率将达 93.10%。从蓄雨条件下湿润灌溉的降雨利用率(表 4~5)可以看出，在蓄雨上限为 10~30 mm 时，湿润灌溉天然降雨有效利用率为 73.12%；当湿润灌溉的蓄雨上限采用 30~40 mm 时，其天然降雨有效利用率将达

82.10%。从表 6~7 可以看出，在蓄雨上限为 30~40 mm 时，间歇灌溉天然降雨有效利用率为 71.89%；在蓄雨上限为 30~80 mm 时，常规淹水灌溉天然降雨有效利用率为 71.59%。比较表 2 与表 6 可知，相同蓄雨上限时，控制灌溉天然降雨利用率较间歇灌溉高出 14.16%；比较表 3 与表 7 可知，相同蓄雨上限时，控制灌溉天然降雨利用率较淹水灌溉高出 21.51%；比较表 2 与表 5 可知，相同蓄雨上限时，控制灌溉天然降雨利用率较湿润灌溉高出 3.95%；比较表 2 与表 4 可知，控制灌溉天然降雨利用率较湿润灌溉高出 12.93%。

表 2 控制灌溉的蓄雨上限为 30~40 mm 时降雨利用率

生育期	降雨量/mm	水分管理上限/mm	蓄雨上限/mm	排水/mm	有效降雨量/mm	有效利用率/%
返青期	3.9	30	30	0	2.9	74.36
分蘖期	70.9	0	40	15.6	50.7	71.51
拔孕期	43.8	0	30	0	40.8	93.15
抽开期	5.9	0	40	0	5.9	100.00
乳熟期	75.9	0	40	11.2	62.7	82.61
黄熟期	67.8	落干			67.8	100.00
合计	268.2			26.8	230.8	86.05

表3 控制灌溉的蓄雨上限为30~80 mm时降雨利用率

生育期	降雨量//mm	水分管理上限//mm	蓄雨上限//mm	排水//mm	有效降雨量//mm	有效利用率//%
返青期	3.9	30	30	0	2.9	74.36
分蘖期	70.9	0	80	6.5	58.4	82.37
拔孕期	43.8	0	80	0	41.8	95.43
抽开期	5.9	0	80	0	4.9	83.05
乳熟期	75.9	0	80	0	73.9	97.36
黄熟期	67.8	落干			67.8	100.00
合计	268.2			6.5	249.7	93.10

表4 湿润灌溉的蓄雨上限为10~30 mm时降雨利用率

生育期	降雨量//mm	水分管理上限//mm	蓄雨上限//mm	排水//mm	有效降雨量//mm	有效利用率//%
返青期	3.9	30	30	0	2.9	74.36
分蘖期	70.9	30	30	22.7	51.9	73.20
拔孕期	43.8	10	10	0	41.8	95.43
抽开期	5.9	20	20	0	4.9	83.05
乳熟期	75.9	20	20	47.1	26.8	35.31
黄熟期	67.8	落干			67.8	100.00
合计	268.2			69.8	196.1	73.12

表5 湿润灌溉的蓄雨上限为30~40 mm时降雨利用率

生育期	降雨量//mm	水分管理上限//mm	蓄雨上限//mm	排水//mm	有效降雨量//mm	有效利用率//%
返青期	3.9	30	30	0	2.9	74.36
分蘖期	70.9	30	40	22.7	51.9	73.20
拔孕期	43.8	10	30	0	41.8	95.43
抽开期	5.9	20	40	0	4.9	83.05
乳熟期	75.9	20	40	23	50.9	67.06
黄熟期	67.8	落干			67.8	100.00
合计	268.2			45.7	220.2	82.10

表6 间歇灌溉的降雨利用率

生育期	降雨量//mm	水分管理上限//mm	蓄雨上限//mm	排水//mm	有效降雨量//mm	有效利用率//%
返青期	3.9	30	30	0	2.9	74.36
分蘖期	70.9	40	40	15.6	50.7	71.51
拔孕期	43.8	30	30	0	40.8	93.15
抽开期	5.9	40	40	0	4.8	81.36
乳熟期	75.9	40	40	47.1	25.8	33.99
黄熟期	67.8	落干			67.8	100.00
合计	268.2			62.7	192.8	71.89

表7 常规灌溉的降雨利用率

生育期	降雨量//mm	水分管理上限//mm	蓄雨上限//mm	排水//mm	有效降雨量//mm	有效利用率//%
返青期	3.9	30	30	0	2.9	74.36
分蘖期	70.9	80	80	86.5	51.9	73.20
拔孕期	43.8	80	80	0	41.8	95.43
抽开期	5.9	80	80	0	4.9	83.05
乳熟期	75.9	80	80	51.2	22.7	29.91
黄熟期	67.8	落干			67.8	100.00
合计	268.2			137.7	192.0	71.59

2.2 无蓄雨要求的不同灌溉模式天然降水利用率 对于无蓄雨要求的不同灌溉模式天然降水利用率,采用上述的水量平衡(SWBM)法和设置盆栽试验2种方法进行研究。从2

种计算方法得出的无蓄雨要求时各灌溉模式的雨水利用率(表8)可以看出,不同灌溉模式雨水利用率具有相同的规律,且降水利用率的大小顺序依次是湿润灌溉>淹灌>间灌

表8 不同计算方法天然降水利用率计算结果

模式	返青期		分蘖期		拔孕期		抽开期		乳熟期		黄熟期		全生育期	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
淹灌	74.36	72.73	85.9	84.63	93.15	98.17	100	91.53	88.14	69.57	100	88.5	91.42	83.51
控灌	74.36	95.45	86.46	65.87	97.82	91.78	100	84.75	33.25	49.41	100	88.5	76.79	72.05
湿灌	74.36	90.91	97.18	83.22	97.72	98.17	100	84.75	90.41	90.91	100	88.5	95.79	89.32
间灌	74.36	90.91	78.14	70.52	95.43	98.86	100	69.49	79.21	59.68	100	88.5	87.22	76.93

注:①表示采用水量平衡方法;②表示采用盆栽试验方法。

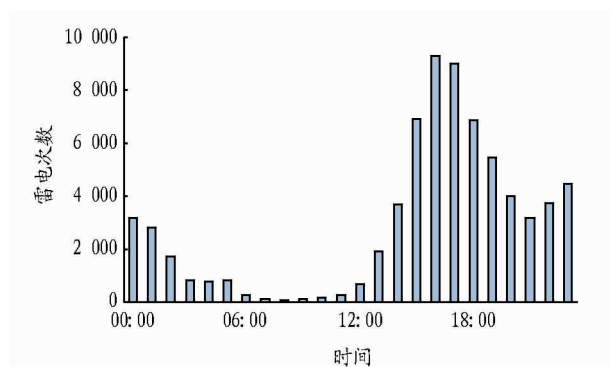


图7 2013年昆明地区闪电逐时统计直方图

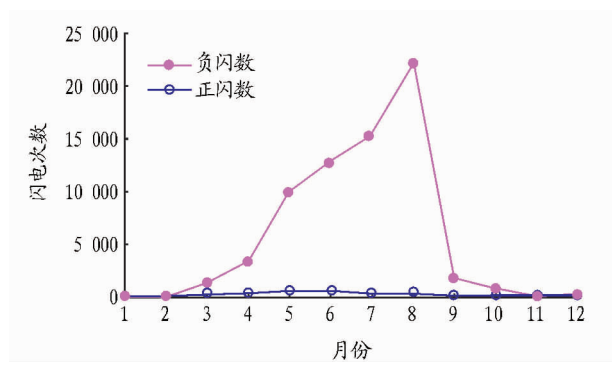


图8 2013年昆明地区闪电极性逐月分布

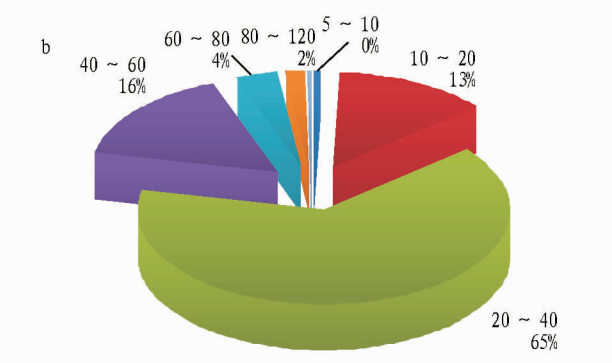
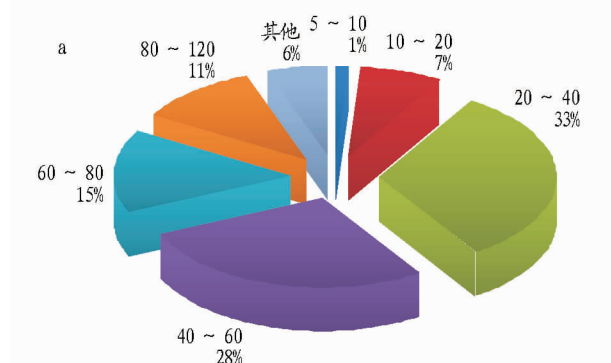


图9 2013年昆明正闪(a)和负闪(b)强度分布

3 小结

根据闪电定位监测数据分析,2013年昆明地区全年共发生地闪(云地之间的闪电)70 409次,全年由闪电定位监测系统监测到闪电定位资料的雷电日数达160 d;从月分布来看,全年3~9月是云南省雷暴多发季节,进入6、7、8月达到高峰,地闪占全年总地闪个数的73.56%,期间天气复杂,对流相对激烈,雷暴相对频繁,往往也是雷电灾害高发的季节;从时间分布来看,主要集中在14:00~23:00,该时间段内地闪

个数占总地闪个数的84.90%;从空间分布来看,地闪密度分布不均,地闪相对比较集中在昆明市中部地区,高密度分布于东北部,最高处达11次/ km^2 。

参考文献

(上接第7528页)

>控灌,说明湿润灌溉情况下水稻能高效地利用降雨,而控制灌溉的雨水利用率最低,这缘于其对土壤水分要求较严格,且田面不建立水层。

3 结论

根据试验区30年的气象资料及水稻灌溉试验资料,采用PM公式计算水稻腾发量,依据SWBM理论计算了有蓄雨要求和无蓄雨要求的不同灌溉模式天然降水利用率;同时,通过盆栽试验,对比分析了无蓄雨要求的不同灌溉模式天然降水利用率。结果表明,在蓄雨标准相同情况下,控制灌溉天然降水利用率最高,为86.05%,湿润灌溉居次,为82.10%,间歇灌溉第三,为71.89%,常规灌溉最低,为71.59%;在不考虑蓄降雨时,SWBM与盆栽试验均表明控制灌溉天然降水利用率最低,而湿润灌溉最高。不同的灌溉要求对稻作天然降水利用率能够产生较大的影响,农业生产当中应慎重选择。

参考文献

[1] 王友贞,许浒,曹秀清,等.水稻旱作覆膜节水效果与提高降雨利用率的研究[J].中国农村水利水电,2001(9):4-5.

- [1] 冯桂力,陈文选,刘诗军,等.山东地区闪电的特征分析[J].应用气象学报,2002,13(3):347-355.
- [2] 程向阳,杨仲江,杨彬,等.具有特殊地质地貌的黄山风景区雷电环境分析[J].气象科技,2009,37(6):759-761.
- [3] 曾山泊,肖稳安,李霞.苏州地区雷暴活动规律和雷灾分析[J].气象科学,2006,26(5):517-524.
- [4] PATWARDHAN A S, NIEBER J L, JOHNS E L. Effective Rainfall Estimation Methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990, 116(2):182-193.
- [5] 崔远来,袁宏源,李远华.考虑随机降雨时稻田高效节水灌溉制度[J].水利学报,1999(7):40-45.
- [6] 郑恩玉,林义钱.水稻生长期的降雨利用率分析[J].浙江水利科技,2003(2):64-65.
- [7] 徐小波,周和平,王忠,等.干旱灌区有效降雨量利用率研究[J].节水灌溉,2010(12):44-46.
- [8] 董斌,霍军力,李新建,等.不同灌溉模式下稻田降雨利用和径流量试验[J].武汉大学学报:工学版,2007,40(6):6-10.
- [9] 杨燕山,陈渠昌,郭中小,等.内蒙古西部风沙区耕地有效降雨量适宜计算方法[J].内蒙古水利,2004,96(1):67-70.
- [10] 王斌,王贵作,黄金柏,等.农业旱情评估模型及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2011,56-58.
- [11] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [12] JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements [M]. New York: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, A SCE, 1990:360.
- [13] ALLEN R G, JENSEN M E, WRIGHT J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration [J]. Agronomy Journal, 1989, 81(4):650-662.
- [14] 胡顺军,潘渝,康绍忠,等. Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J].农业工程学报,2005,21(6):30-35.