

基于作物需水与自然降水适配度的湖南省 防旱避灾种植制度优化

曲辉辉^{1,2}, 杨晓光^{1,*}, 张晓煜¹, 黄晚华¹, 李茂松³, 李金云⁴

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 黑龙江省海林气象局, 海林 157100)

摘要: 季节性干旱对湖南省农业生产造成很大影响, 明确防旱避灾种植制度, 可为指导当地农业生产提供科学依据。基于湖南省代表站点 1981—2007 年的气候数据和作物生育期资料, 依据干燥度和地形地势特点, 划分不同类型区, 并在各区域内选取代表站点和代表性种植制度, 采用 FAO 推荐的分段单值平均作物系数法订正了作物系数。比较了主要种植制度的作物需水与自然降水适配度及作物需水与自然降水适配度保证指数, 确定了湖南省基于自然降水的防旱避灾种植制度。研究结果表明: 各区域基于自然降水资源的防旱避灾种植制度分别为: (1) 湘中偏北湿润中低海拔地形复杂区和湘东北半湿润中低海拔山地丘陵区为麦-稻和薯-稻种植模式; (2) 湘北半湿润低海拔平原区为油-棉、油-稻和豆-稻种植模式; (3) 湘东偏北半干旱低海拔平原与盆地丘陵过渡区为油-苕、油-棉和油-稻种植模式; (4) 湘东南较干旱中低海拔丘陵区为油-稻、麦-稻和薯-稻种植模式; (5) 中南部较干旱中低海拔盆地地区为油-稻和油-棉种植模式; (6) 湘西北较湿润中高海拔中山低山区为薯-稻和油-苕种植模式; (7) 湘西南较湿润中高海拔丘陵区为油-苕、油-稻、麦-稻和薯-稻种植模式; (8) 湘西干旱高海拔山地丘陵区为油-苕和油-棉种植模式。

关键词: 作物需水与自然降水适配度; 保证指数; 防旱避灾种植制度

Optimized cropping systems to prevent and avoid the drought disaster based on the adaptation between precipitation and crop water requirement in Hunan Province

QU Huihui^{1,2}, YANG Xiaoguang^{1,*}, ZHANG Xiaoyu¹, HUANG Wanhua¹, LI Maosong³, LI Jinyun⁴

1 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Heilongjiang Meteorological Research Institute, Harbin 150030, China

3 Institute of Environment and Sustainable Development of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

4 Hailin Meteorological Bureau, Hailin 157100, China

Abstract: Seasonal drought has serious affections on agricultural production in Hunan Province, Developing an optimal cropping system to prevent and avoid drought disaster could provide scientific guidance for local agriculture production. In this study, adaptation and ensure index between precipitation and crop water requirement were analyzed using weather and crop phenological data of representative stations in Hunan Province from 1981 to 2007. Then optimal cropping systems based on precipitation were evaluated for the local agriculture to prevent and avoid local seasonal drought. Representative stations and cropping systems were selected according to the aridity and topography. And crop coefficients used in the study were amended using the time-averaged single-value approach recommended by FAO. Results showed that: (1) the optimal cropping systems were wheat-rice and potato-rice in humid low-altitude complex-terrain area of north Hunan Province and sub-humid medium-low altitude hilly area of northeast Hunan Province, (2) while in sub-humid low-altitude plains area of north Hunan Province, it was more suitable to adopt cropping systems of rape-cotton rape-rice and soybean-rice, (3) in

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAD04B07); 公益性行业(农业)科研专项(200803028)

收稿日期: 2010-01-30; **修订日期:** 2010-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxg@cau.edu.cn

sub-arid low-altitude plains and hilly transitional area of east Hunan Province, optimized cropping systems were rape-sweet potato, rape-cotton and rape-rice. Similarly, for the other areas, it was, (4) rape-rice, wheat-rice and potato-rice in arid low-altitude hilly area of southeast Hunan Province, (5) rape-rice and rape-cotton in arid low-altitude basin area of middle-south Hunan Province, (6) potato-rice and rape-sweet potato in the humid high-altitude hilly area of northwest Hunan Province, (7) rape-sweet potato, rape-rice, wheat-rice and potato-rice in humid high-altitude hilly area of southwest Hunan Province, (8) and rape-sweet potato and rape-cotton in arid high-altitude hilly area of west Hunan Province.

Key Words: the adaptation between precipitation and crop water requirement; ensure index; the optimized cropping system to prevent and avoid the drought disaster

湖南省是我国南方重要的粮食生产大省之一,素有“湖广熟,天下足”之美誉,是我国著名的双季稻主产区、冬种油菜区和棉花产区。由于年内降水量时空分布不均匀及年际间降水量差异大^[1],且当地土壤保水能力差^[2],季节性干旱极易发生,尤以伏旱和秋旱发生最为频繁,并具有分布地域广、持续时间长,威胁危害大等特点。湖南省的季节性干旱严重影响作物生长发育和产量形成,如伏旱影响中稻灌浆,造成秕粒,影响晚稻移栽或移栽后不能返青,秋旱导致晚稻和其他旱地秋收作物的灌浆成熟受阻^[3]。据统计,1950—2005 年全省因受旱累计减产粮食 4369 万 t,平均每年减产粮食 81 万 t,平均成灾率达 45.73%^[4]。目前,季节性干旱已成为湖南省农业可持续发展的制约因素之一。

针对当前湖南省季节性干旱的现状,调整种植制度,在现有的条件下筛选出能够充分利用当地自然降水资源的种植制度,是结构性防旱避灾的重要途径之一。这方面研究多以经济效益、粮食供需平衡及水分利用效率为评价指标,研究结果也主要集中在华北和西北地区^[5-8],而我国广大南方地区,尤其是重要的粮食产区湖南省种植结构调整的研究还未见报道。

湖南省大部分丘陵山区水利条件较差,灌溉设施较落后,农业抗旱能力较差^[9]。本研究基于当地自然降水资源,着重比较湖南省各区域现行主要种植制度的作物需水与自然降水适配度及作物需水与自然降水适配度保证指数,从充分利用自然降水资源角度出发,对种植制度进行优化,以实现结构和制度避灾的目标,为湖南省季节性干旱防旱避灾种植制度选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 区域背景分析

湖南省位于我国长江中游以南,地处东经 108°47′—114°15′,北纬 24°39′—30°08′,属亚热带季风湿润气候区,气候温和、四季分明、热量充足、降水集中、夏秋多旱。全省多年平均降水量为 1300—1600mm,年平均气温为 16—18℃,年日照时数为 1300—1800h。省内西部山地丘陵区主要种植制度以一年两熟为主,东部平原、丘陵盆地区的主要种植制度为一年两熟或一年三熟。

1.2 数据来源

本研究各代表站点的气候资料来源于国家气象信息中心,包括 1981—2007 年的逐日降水量、平均气温、最高及最低气温、日照时数、平均气压、平均水汽压、平均相对湿度和风速等。作物生育期资料为近 20a 作物各生育阶段的起止日期,资料来源于农业气象试验站的实际观测资料。

1.3 研究方法

1.3.1 参考作物蒸散量(ET_0)

参考作物蒸散量是指高度一致(8—15cm),生长旺盛,水分充足,完全覆盖地面的绿色草丛植被(禾草或苜蓿)的蒸散量^[10],采用 1998 年 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式^[11]进行计算,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); t 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2m 高处的风速 (m/s), 可根据换算公式 $U_2 = \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} U_z$ 计算获得, 公式中 z 为风速测量高度, 在此为 10m, U_z 为 10m 高度的风速 (m/s); e_d 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为干湿表常数。上述参数均可通过气象观测资料 (包括平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均相对湿度、平均风速、平均气压)、海拔高度、经纬度及日序等基础数据计算得到。

1.3.2 作物系数 (K_c)

作物系数 K_c 是作物某生长发育阶段的需水量 ET_c 与对应阶段参考作物蒸散量 ET_0 的比值^[10], 可以反映不同蒸发面的物理学和生物学特性对蒸发或蒸腾过程的影响, 随作物品种特性而异。本研究采用 1998 年 FAO-56 推荐的分段单值平均法计算^[11], 计算步骤如下:

分 3 个阶段计算作物系数——初始生长期 $K_{c_{ini}}$ 、生育中期 $K_{c_{mid}}$ 和成熟期 $K_{c_{end}}$ ^[12]。

首先, 从表中查出作物在特定标准条件下的作物系数 ($K_{c_{ini}(\text{Tab})}$ 、 $K_{c_{mid}(\text{Tab})}$ 、 $K_{c_{end}(\text{Tab})}$), 详见表 2), 特定标准条件是指在空气湿度约为 45%、风速约为 2m/s 的区域、供水充足、管理良好、生长正常、大面积高产的作物条件。

然后, 根据当地土壤及气候条件修正作物系数, 计算公式如下:

$$K_{c_{ini}} = \frac{E_{so}}{ET_0} = 1.15 \quad t_w \leq t_1 \quad (2)$$

$$K_{c_{ini}} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp \left[\frac{-(t_w - t_1) E_{so} \left(1 + \frac{REW}{TEW - REW} \right)}{TEW} \right]}{t_w ET_0} \quad (3)$$

式中, REW 为大气蒸发力控制阶段蒸发量 (mm); TEW 为一次降雨或灌溉后总计蒸发量 (mm); E_{so} 为潜在蒸散率 (mm/d); t_w 为降水平均间隔天数 (d); t_1 为大气蒸发力控制阶段天数 (d), ($t_1 = REW/E_{so}$)。相关土壤参数见参考文献^[13-14]。

$$K_{c_{mid}} = K_{c_{mid}(\text{Tab})} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (4)$$

当 $K_{c_{end}(\text{Tab})} \geq 0.45$ 时

$$K_{c_{ent}} = K_{c_{ent}(\text{Tab})} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (5)$$

当 $K_{c_{end}(\text{Tab})} < 0.45$ 时

$$K_{c_{ent}} = K_{c_{ent}(\text{Tab})} \quad (6)$$

式中, U_2 为该生育阶段内 2m 高度处的日平均风速 (m/s); $RH_{\min}$ 为该生育阶段内日最低相对湿度的平均值 (%); h 为该生育阶段内作物的平均高度 (m)。

1.3.3 作物需水量 (ET_c)

作物需水量指在水分供应充足且其他因素不成为限制因子条件下, 作物为获得最高产量所需要的水分总量^[15]。作物所需水分主要用于作物蒸腾和农田蒸发。FAO 推荐的“参考作物蒸散量乘以作物系数法”为计算作物需水量公认方法之一。计算公式如下^[11]:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (7)$$

式中, ET_c 为某一时段的作物需水量 (mm); ET_0 为对应时段的参考作物蒸散量 (mm); K_c 为同一时段的作物系数。

1.3.4 作物需水与自然降水适配度

作物需水与自然降水适配度能够反映出某时段内自然降水对作物需水的满足程度, 数值介于 0—1 之间, 计算方法如下^[16]:

$$A_i = \begin{cases} \frac{P_i}{ET_{Ci}} & (P_i < ET_{Ci}) \\ 1 & (P_i \geq ET_{Ci}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, A_i 为第 i 阶段的作物需水与自然降水适配度, P_i 为第 i 阶段内的降水量(mm); ET_{Ci} 为第 i 阶段内的作物需水量(mm)。

一种种植模式全生育期内作物需水与自然降水适配度 A 等于各生育阶段的作物需水与自然降水适配度 A_i 以对应生育阶段的需水模系数为权重的加权平均值, 计算方式如下:

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{ET_{Ci}}{ET_C} \cdot A_i \quad (9)$$

式中, ET_{Ci} 为第 i 阶段内的作物需水量(mm); ET_C 为某种植模式全生育期内的作物需水量(mm); A_i 为第 i 阶段的作物需水量与自然降水适配度, A 为对应种植模式全生育期内作物需水量与自然降水适配度。

1.3.5 作物需水与自然降水适配度保证指数

参考自然灾害风险评估方法, 以概率论为理论基础, 对作物需水与自然降水适配度进行分析。

(1) 正态性检验及正态化

本文以作物需水与自然降水适配度 A 序列为分析目标, 根据对冬小麦干旱的研究结果^[17], 首先, 采用偏度-峰度检验法检验其波动曲线是否为正态性, 不服从正态分布的序列即为偏态分布, 将服从偏态分布的序列进行正态化处理^[18]。经正态化处理的分析目标可视为“正态序列”, 以新的均值和方差作为特征参数, 与已经通过正态性检验的分析目标按正态分布函数进行后面的风险估算。

(2) 风险估算

应用样本的均值 μ 和均方差 σ 来建立分布函数: $F(x) = \int_{-a}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} dx$

从而计算出不同作物需水与自然降水适配度的发生概率:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = p(x_1 < x < x_2) \quad (10)$$

正态分布表近似公式: $p(x) = \frac{1}{2} (1 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6)^{-16}$

$$\alpha_1 = 0.049867437, \alpha_2 = 0.0211410061, \alpha_3 = 0.0032776263$$

$$\alpha_4 = 0.0000380036, \alpha_5 = 0.0000488906, \alpha_6 = 0.000005383$$

分别计算作物需水与自然降水适配度为 0.1、0.2、...、1.0 时的发生概率 p 。

(3) 作物需水与自然降水适配度保证指数

为确定唯一评价标准, 将不同等级作物需水与自然降水适配度的发生概率折算为作物需水与自然降水适配度保证指数 (I), 计算方法为不同等级作物需水与自然降水适配度 (G) 与其发生概率 P 乘积之和^[19], 即:

$$I = F(G, p) = \sum_{i=1}^n G_i p_i \quad (11)$$

2 结果与分析

2.1 研究区域及种植制度选择

因湖南省的地形地势复杂, 干燥度 (全年参考作物蒸散量 (ET_0) 与降水量的比值) 呈现明显的空间分布特征。本文依据干燥度分布特点, 结合地势并参考当地农业气象专家和农学专家的建议, 将湖南省划分为 9 个区域 (表 1), 各区域内选取一个代表站点进行研究。选点时遵循典型性和全面性的原则。湖南省 9 个代表站点分布如图 1。

本文仅以种植面积较大的传统粮食作物和经济作物为研究对象, 未考虑蔬菜、烟草及麻类等作物。依据当地专家的建议, 选取目前常见的种植制度进行研究。

各区域的代表站点和主要种植制度如表 1 所示。

表 1 各区域代表站点和种植制度
Table 1 Representative stations and cropping systems of each region

区域 Region	代表站点 Representative station	种植制度 Cropping systems
湘东北半湿润中低海拔山地丘陵区	平江	冬小麦-中稻、马铃薯-中稻、玉米-晚稻、大豆-晚稻
湘东偏北半干旱低海拔平原与盆地丘陵过渡区	长沙	油菜-早稻-晚稻、油菜-中稻、早稻-晚稻、玉米-晚稻、大豆-晚稻、油菜-棉花、油菜-红薯
中南部较干旱中低海拔盆地	衡阳	油菜-早稻-晚稻、早稻-晚稻、油菜-中稻、油菜-棉花
湘东南较干旱中低海拔丘陵区	郴州	油菜-早稻-晚稻、早稻-晚稻、油菜-中稻、冬小麦-中稻、马铃薯-中稻、玉米-晚稻、大豆-晚稻
湘北半湿润低海拔平原区	常德	油菜-早稻-晚稻、早稻-晚稻、油菜-中稻、玉米-晚稻、大豆-晚稻、油菜-棉花
湘中偏北湿润中低海拔地形复杂区	安化	冬小麦-中稻、马铃薯-中稻、玉米-晚稻、大豆-晚稻
湘西北较湿润中高海拔中山低山区	桑植	冬小麦-中稻、马铃薯-中稻、油菜-红薯
湘西干旱高海拔山地丘陵区	芷江	冬小麦-中稻、马铃薯-中稻、油菜-棉花、油菜-红薯
湘西南较湿润中高海拔丘陵区	武冈	早稻-晚稻、油菜-中稻、冬小麦-中稻、马铃薯-中稻、玉米-晚稻、大豆-晚稻、油菜-红薯

注：表中所述干旱-湿润等级及海拔低-高等级均为省内相对情况；马铃薯和红薯分别简称为薯和苕

2.2 作物系数确定

对缺乏试验资料或试验资料不足的作物或地区，一般是利用联合国粮农组织(FAO)推荐的 84 种作物的标准作物系数^[11]，如表 2 所示，但此标准作物系数仅适用于半湿润气候区（空气湿度约为 45%；风速约为 2 m/s），供水充足，管理良好，生长正常，大面积高产的作物条件，若直接用于湖南省则误差较大。因此有必要根据当地的气候、土壤和作物特征进行作物系数订正，在此，采用 FAO-56 推荐的分段单值平均作物系数的标准方法^[11]，根据当地气候、土壤、作物和灌溉条件，订正了湖南省主要作物不同生育阶段的作物系数。结果见表 3。

从作物系数计算结果可以看出，订正后的各站作物系数：除水稻 Kc_{ini} 低于 FAO 推荐的特定标准条件下的作物系数外，其他作物的 Kc_{ini} 均高于特定标准条件下的作物系数，各种作物的 Kc_{mid} 和 Kc_{end} 均低于特定标准条件下的作物系数。经检验订正后的作物系数除生育初期外，与试验测定结果基本相符^[20]。

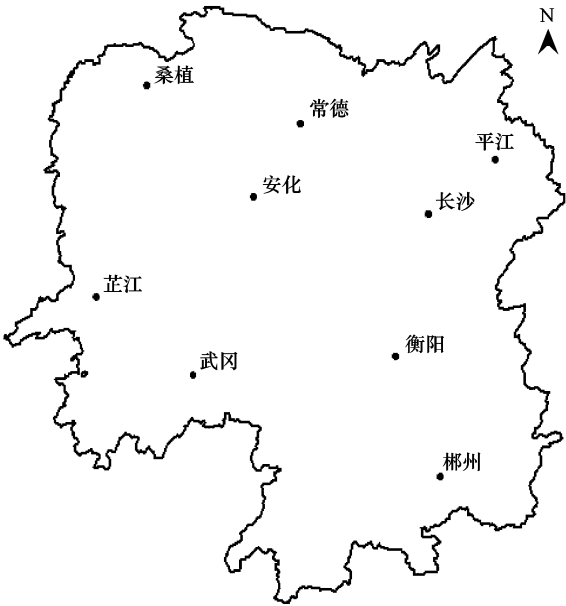


图 1 代表站点分布图
Fig. 1 Location of representative stations

表 2 FAO 推荐的各作物的标准作物系数^[11]
Table 2 Standard crop coefficient for each crop recommended by FAO^[11]

作物 Crops	$Kc_{ini}(\text{Tab})$	$Kc_{mid}(\text{Tab})$	$Kc_{end}(\text{Tab})$	作物 Crops	$Kc_{ini}(\text{Tab})$	$Kc_{mid}(\text{Tab})$	$Kc_{end}(\text{Tab})$
冬小麦 Winter wheat	0.7(越冬期为 0.4)	1.15	0.4	玉米 Maize	0.3	1.2	0.6
水稻 Rice	1.05	1.2	0.75	油菜 Rape	0.35	1.08	0.35
红薯 Sweet potato	0.5	1.15	0.65	棉花 Cotton	0.35	1.18	0.65
大豆 Soybean	0.4	1.15	0.5	马铃薯 Potato	0.5	1.15	0.75

表 3 湖南省代表站点各种作物不同生育阶段订正后的作物系数

Table 3 Revised crop coefficient in different growth stages of each crop in representative stations of Hunan Province

代表站点 Representation station	各阶段 K_c Each stage K_c	作物 Crops									
		早稻 Early rice	中稻 Midseason rice	晚稻 Late Rice	油菜 Rape	冬小麦 Winter wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	马铃薯 Potato	红薯 Sweet potato	棉花 Cotton
平江 Pingjiang	$K_{c_{ini}}$	—	0.97	0.77	—	0.99	1.10	1.09	1.09	—	—
	$K_{c_{mid}}$	—	1.12	1.12	—	1.06	1.11	1.07	1.08	—	—
	$K_{c_{end}}$	—	0.66	0.67	—	0.40	0.49	0.41	0.70	—	—
长沙 Changsha	$K_{c_{ini}}$	0.97	0.91	0.60	0.85	—	1.07	1.04	—	0.87	0.97
	$K_{c_{mid}}$	1.13	1.14	1.14	1.03	—	1.12	1.09	—	1.11	1.08
	$K_{c_{end}}$	0.68	0.68	0.69	0.35	—	0.51	0.43	—	0.60	0.54
衡阳 Hengyang	$K_{c_{ini}}$	1.03	0.95	0.79	0.91	—	—	—	—	—	0.97
	$K_{c_{mid}}$	1.14	1.15	1.13	1.01	—	—	—	—	—	1.11
	$K_{c_{end}}$	0.69	0.68	0.67	0.35	—	—	—	—	—	0.56
郴州 Chenzhou	$K_{c_{ini}}$	0.84	0.95	0.85	0.90	0.99	1.05	1.05	1.09	—	—
	$K_{c_{mid}}$	1.13	1.14	1.12	1.01	1.07	1.11	1.08	1.09	—	—
	$K_{c_{end}}$	0.69	0.66	0.66	0.35	0.40	0.51	0.43	0.69	—	—
常德 Changde	$K_{c_{ini}}$	0.98	0.96	0.86	0.92	—	1.10	1.06	—	—	0.97
	$K_{c_{mid}}$	1.11	1.12	1.11	1.01	—	1.10	1.07	—	—	1.08
	$K_{c_{end}}$	0.66	0.65	0.66	0.35	—	0.48	0.40	—	—	0.54
安化 Anhua	$K_{c_{ini}}$	—	0.99	0.87	—	1.06	1.10	1.07	1.07	—	—
	$K_{c_{mid}}$	—	1.12	1.12	—	1.06	1.11	1.07	1.08	—	—
	$K_{c_{end}}$	—	0.66	0.67	—	0.40	0.49	0.41	0.68	—	—
桑植 Sangzhi	$K_{c_{ini}}$	—	0.99	—	1.05	1.07	—	—	0.99	0.98	—
	$K_{c_{mid}}$	—	1.13	—	1.02	1.08	—	—	1.10	1.10	—
	$K_{c_{end}}$	—	0.67	—	0.35	0.40	—	—	0.69	0.59	—
芷江 Zhijiang	$K_{c_{ini}}$	—	0.99	—	0.97	1.04	—	—	1.11	0.98	1.01
	$K_{c_{mid}}$	—	1.14	—	1.02	1.08	—	—	1.10	1.10	1.11
	$K_{c_{end}}$	—	0.68	—	0.35	0.40	—	—	0.69	0.60	0.57
武冈 Wugang	$K_{c_{ini}}$	1.04	0.98	0.84	0.95	1.00	1.10	1.08	1.09	0.96	—
	$K_{c_{mid}}$	1.12	1.14	1.13	1.01	1.07	1.10	1.08	1.09	1.10	—
	$K_{c_{end}}$	0.68	0.67	0.66	0.35	0.40	0.48	0.42	0.69	0.59	—

2.3 作物需水与自然降水适配度保证指数分析

本文计算了各区域代表站点 1981—2007 年不同种植制度的作物需水与自然降水适配度,27a 间各种种植制度的作物需水与自然降水适配度数值大小及波动幅度的变化特征均不相同,为体现各种种植制度间作物需水与自然降水适配度数值和波动幅度的差异,利用作物需水与自然降水适配度保证指数进行分析。作物需水与自然降水适配度保证指数为长时间序列内发生可能性最大的作物需水与自然降水适配度值,可以弥补以平均值评价种植制度的不足。

表 4 为湖南省各区域代表站点不同种植制度的作物需水与自然降水适配度保证指数及其排列次序。由此可以看出,湖南省不同种植制度作物需水与自然降水适配度保证指数的变化范围为 0.67—0.94。各地种植制度虽不完全相同,但总体而言:油-苕种植模式作物需水与自然降水适配度保证指数最高,为 0.86—0.94;油-棉、油-稻、麦-稻和薯-稻种植模式的作物需水与自然降水适配度保证指数位居其次,分别为 0.78—0.84、0.78—0.84、0.77—0.85 和 0.77—0.86;再次为油-稻-稻、玉-稻和豆-稻种植模式,作物需水与自然降水适配度保证指数依次为 0.73—0.78、0.72—0.79 和 0.70—0.79;作物需水与自然降水适配度保证指数最低的为稻-稻种植模式,其值为 0.67—0.74。

表 4 湖南省各种种植制度作物需水与自然降水适配度保证指数

种植制度 Ccropping systems	代表站点 Representative station								
	平江	长沙	衡阳	郴州	常德	安化	桑植	芷江	武冈
	Pingjiang	Changsha	Hengyang	Chenzhou	Changde	Anhua	Sangzhi	Zhijiang	Wugang
油-稻-稻 Ra-Ri-Ri	—	0.75(4)	0.73(3)	0.75(4)	0.78(4)	—	—	—	—
稻-稻 Ri-Ri	—	0.70(7)	0.67(4)	0.68(7)	0.74(6)	—	—	—	0.73(7)
油-稻 Ra-Ri	—	0.80(2)	0.78(1)	0.81(1)	0.83(2)	—	—	—	0.84(2)
麦-稻 W- Ri	0.83(1)	—	—	0.80(2)	—	0.77(1)	0.85(3)	0.79(3)	0.84(2)
薯-稻 P-Ri	0.83(1)	—	—	0.80(2)	—	0.77(1)	0.86(1)	0.79(3)	0.83(4)
玉-稻 M-Ri	0.79(3)	0.74(6)	—	0.75(4)	0.77(5)	0.72(3)	—	—	0.79(5)
豆-稻 So-Ri	0.78(4)	0.75(4)	—	0.73(6)	0.79(3)	0.70(4)	—	—	0.78(6)
油-棉 Ra-C	—	0.80(2)	0.78(1)	—	0.84(1)	—	—	0.82(2)	—
油-苕 Ra-SP	—	0.94(1)	—	—	—	—	0.86(1)	0.87(1)	0.87(1)

注:表中括号内数字为当地各种种植模式按作物需水与自然降水适配度保证指数由高到低的排列次序;W:冬小麦,M:玉米,Ri:水稻,Ra:油菜,SP:红薯,C:棉花,So:大豆,P:马铃薯

生育期内作物需水与自然降水适配程度较高的作物和种植制度,在长时间序列内的作物需水与自然降水适配度保证指数也较高。如油菜和红薯两种作物生育期内作物需水与自然降水适配度均较高,油-苕种植模式的作物需水与自然降水适配度同样较高,该种植制度的作物需水与自然降水适配度保证指数也较高;而早稻和晚稻两种作物生育期内作物需水与自然降水的适配程度较低,稻-稻种植模式的作物需水与自然降水适配度较低,该种植制度的作物需水与自然降水适配度保证指数同样较低。

2.4 基于作物需水与自然降水适配度及其保证指数的种植制度综合评价

在农业生产中,作物需水与自然降水适配度保证指数越高,那么在长时间序列内降水较高程度的满足作物需水的可能性越大,该种植制度在实际生产中防旱避灾的能力就越强。

若以当地各种种植制度作物需水与自然降水适配度保证指数的平均值作为界限,作物需水与自然降水适配度保证指数高于均值的视为较优的种植制度。根据表 4 内容,湖南省各区域较优的种植制度及排序见表 5。

表 5 湖南省各区域基于作物需水与自然降水适配度保证指数的种植制度优化

Table 5 Optimized cropping system based on the insure index of adaptation between precipitation and crop water requirement of each region in Hunan Province

代表站点 Representative station	较优种植制度 Optimized cropping system	代表站点 Representative station	较优种植制度 Optimized cropping system
平江 Pingjiang	冬小麦-中稻、马铃薯-中稻	长沙 Changsha	油菜-红薯、油菜-棉花、油菜-中稻
衡阳 Hengyang	油菜-中稻、油菜-棉花	郴州 Chenzhou	油菜-中稻、冬小麦-中稻、马铃薯-中稻
常德 Changde	油菜-棉花、油菜-中稻、大豆-晚稻	安化 Anhua	冬小麦-中稻、马铃薯-中稻
桑植 Sangzhi	马铃薯-中稻、油菜-红薯	芷江 Zhijiang	油菜-红薯、油菜-棉花
武冈 Wugang	油菜-红薯、油菜-中稻、冬小麦-中稻、马铃薯-中稻		

从表中可以看出,湖南省比较适宜的种植模式主要为油-棉、油-苕、油-稻、麦-稻和薯-稻 5 种,即旱作种植模式和与中稻搭配的水旱轮作种植方式。

3 结论与讨论

本研究在以自然降水为农业生产唯一水分来源的前提下,基于各地自然降水资源及九个类型区的主体种植制度,通过对不同区域各种种植制度作物需水与自然降水适配度保证指数的分析,明确了湖南省各区域防旱避灾的种植制度,得出作物需水与自然降水适配度及其保证指数较高的种植制度包括油-棉、油-苕、油-稻、麦-稻和薯-稻模式,作物需水与自然降水适配度及其保证指数较低的种植制度包括油-稻-稻、豆-稻、玉-稻和稻-稻模式。

(1) 湘中偏北湿润中低海拔地形复杂区和湘东北半湿润中低海拔山地丘陵区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为麦-稻和薯-稻模式;

(2) 湘北半湿润低海拔平原区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为油-棉、油-稻和豆-稻模式;

(3) 湘东偏北半干旱低海拔平原与盆地丘陵过渡区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为油-苕、油-棉和油-稻模式;

(4) 湘东南较干旱中低海拔丘陵区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为油-稻、麦-稻和薯-稻模式;

(5) 中南部较干旱中低海拔盆地区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为油-稻和油-棉模式;

(6) 湘西北较湿润中高海拔中山低山区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为薯-稻和油-苕模式;

(7) 湘西南较湿润中高海拔丘陵区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为油-苕、油-稻、麦-稻和薯-稻模式;

(8) 湘西干旱高海拔山地丘陵区基于自然降水资源的防旱避灾种植制度为油-苕和油-棉模式。

所得结论对于降低季节性干旱粮食生产风险有实际的参考价值,对农业生产中种植制度的选择具有一定的指导意义。但本研究没有考虑降水的有效性及地下水对作物的补给作用;此外,在湖南省的大部分地区,灌溉是作物生长发育过程中不可忽视的重要水分来源。在今后的研究中,还需要充分考虑降水的径流、渗漏和土壤水与地下水对作物生长发育的补给作用,以及灌溉对作物需水的及时补充,提出更加完善的基于作物需水与自然降水适配度保证指数的种植制度优化,进一步提高对农业生产指导的科学性、实用性和可操作性。

References:

- [1] Wang C Y. Research progress of major agro-meteorological disasters. Beijing: Meteorology Press, 2007: 194-195.
- [2] Zhang B, Zhang T L. Causes of seasonal drought formation and strategy of the eastern hilly in southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15 (4): 413-419.
- [3] Ou Y H. Flood and drought studies. Beijing: Meteorology Press, 2001.
- [4] Yuan H B, Li J B. Agricultural Drought Disaster characteristics and means of efficient use of water resources in Hunan. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2006, 18(5): 151-152.
- [5] Cui Y P, Gao J Q. Optimization of Growing Patterns of Farmlands on Slopes of Nihegou Valley. *Journal of Northwest Forestry College*, 1995, 10 (Supplement): 142-147.
- [6] Cai J B, Cai L G, Liu Y, Xu D. Optimized cropping system of the limited water supply conditions — Study of water demand and distribution in Yellow River Irrigation Area. *Water Saving Irrigation*, 2002, (1): 20-22.
- [7] Wu X P, Wu H J, Zhuang Y, Cai D X, Zheng Y, Jiang Z W, Li Y K. Water-saving planting structure optimization of gray multi-objective programming models and methods — Luoyang City as an example. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2008, 32 (6): 16-21.
- [8] Wu X P, Zheng Y, Jiang Z W, Wu H J, Cai D X, Pang H C, Li Y K, Wu Q F. Evaluation of water-saving and efficient cropping systems in Luoyang City//Tang H J, Pang H C, Ren T Z, Li Y Y. *Water-saving farming systems theory and technology*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 180-184.
- [9] Huang W H, Yang X G, Qu H H, Feng L P, Huang B X, Wang J, Shi S J, Wu Y F, Wu Y F, Zhang X Y, Xiao X P, Yang G L, Li M S. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 28-34.
- [10] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 24(2nd edition), 1997.
- [11] Allen R G, Luis S P, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998: 15-86.
- [12] Liu Y, Pereira L S. Validation of FAO Methods for Estimating Crop Coefficients. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(5): 26-30.
- [13] Gong Z T. Chinese Soil Taxonomy. Beijing: Science Press, 1999: 109-260.
- [14] Huang C Y. Pedology. Beijing: China Agricultural University Press, 2000: 74-101.
- [15] Han X L. Agricultural Climatology. Shanxi: Shanxi Science and Technology Press, 1999: 90-138.
- [16] Zhang Z T. Study on the characteristic of water use of different cropping patterns in Fuxin and Dezhou. Beijing: College of Resources and

Environmental Science of China Agricultural University, 2008.

- [17] Huo Z G, Li S K, Wang S Y, Liu J L, Xue C Y. Study on the risk evaluation technologies of main agrometeorological disasters and their application. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(6):692-703.
- [18] Zhang X J, Wang J X, Zhang J X, Sun X Y. Study on the normal method of background value of soil environment skewed distribution. *Environmental Monitoring in China*, 1990, 6(2): 32-34.
- [19] Li S K, Huo Z G, Wang S Y, Liu R H, Sheng S X, Liu J L, Ma S Q, Xue C Y. Risk evaluation system and models of agrometeorological disasters. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(1): 77-87.
- [20] Huang M Q. Calculation of Crop Water Consumption and Determination of Parameters under Deficit Irrigation. Yangling: Northwest A & F University, 2007.

参考文献:

- [1] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展. 北京:气象出版社,2007:194-195.
- [2] 张斌,张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究. *生态学报*,1995,15(4):413-419.
- [3] 欧阳惠. 水旱灾害学. 北京:气象出版社,2001.
- [4] 袁华斌,李景保. 湖南农业干旱灾害特征与水资源高效利用途径. *江西农业学报*,2006,18(5):151-152.
- [5] 崔云鹏,高军强. 泥河沟流域塬坡面农田种植结构的优化研究. *西北林学院学报*,1995,10(增):142-147.
- [6] 蔡甲冰,蔡林根,刘钰,许迪. 在有限供水条件下的农作物种植结构优化——簸箕李引黄灌区农作物需、配水初探. *节水灌溉*,2002,(1):20-22.
- [7] 武雪萍,吴会军,庄严,蔡典雄,郑妍,姜志伟,李银坤. 节水型种植结构优化灰色多目标规划模型和方法研究——以洛阳市为例. *中国农业资源与区划*,2008,32(6):16-21.
- [8] 武雪萍,郑妍,姜志伟,吴会军,蔡典雄,逢焕成,李银坤,武其甫. 洛阳市节水高效种植制度评价研究//唐华俊,逢焕成,任天志,李玉义. 节水农作制度理论与技术. 北京:中国农业科学技术出版社,2008:180-184.
- [9] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,冯利平,黄彬香,王靖,施生锦,武永峰,张晓煜,肖小平,杨光立,李茂松. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析. *农业工程学报*,2009,25(8):28-34.
- [12] 刘珏,Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. *农业工程学报*,2000,16(5):26-30.
- [13] 龚子同. 中国土壤系统分类. 北京:科学出版社,1999:109-260.
- [14] 黄昌勇. 土壤学. 北京:中国农业大学出版社,2000:74-101.
- [15] 韩湘玲. 农业气候学. 山西:山西科学技术出版社,1999:90-138.
- [16] 张振涛. 辽宁阜新和山东德州不同种植制度水分利用特征研究. 北京:中国农业大学资源与环境学院,2008.
- [17] 霍治国,李世奎,王素艳,刘锦奎,薛昌颖. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究. *自然资源学报*,2003,18(6):692-703.
- [18] 张晓荆,王敬贤,张家贤,孙续元. 土壤环境背景值偏态分布的正态化方法探讨. *中国环境监测*,1990,6(2):32-34.
- [19] 李世奎,霍治国,王素艳,刘荣花,盛绍学,刘锦奎,马树庆,薛昌颖. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究. *自然灾害学报*,2004,13(1):77-87.
- [20] 黄梦琪. 水分亏缺条件下作物需水量的计算及地下补给量的确定. 杨凌:西北农林科技大学,2007.