

# 高温伏旱区旱地农作系统水分供需平衡特征与生态适应性研究

张云兰<sup>1,2</sup>, 王龙昌<sup>1</sup>, 邹聪明<sup>1</sup>, 胡小东<sup>1</sup>, 薛兰兰<sup>1</sup>

(1. 西南大学 农学与生物科技学院, 重庆 北碚 400715; 2. 广西财经学院, 南宁 530003)

**摘要:**天然降水是高温伏旱区旱地农作系统的主要水资源。根据调查资料和田间实验结果,以高温伏旱代表区域奉节、万州、沙坪坝为研究区,计算出重庆几种主要种植模式(小麦-玉米-甘薯、胡豆-玉米-甘薯、小麦-玉米-大豆、马铃薯-玉米-甘薯、胡豆-玉米-大豆、油菜-玉米-甘薯)的需水量,系统地分析在坡度 $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 耕地上,不同降雨年型中,主要种植模式水分供需平衡与错位特征,并利用水分生态适应性数学模型进行评价。研究表明:奉节 3 种降雨年型主要是由各年 5-9 月的实际降雨量决定的,万州 3 种降雨年型各月降雨量的差异主要体现在 7-9 月,沙坪坝 3 种降雨年型的年降雨量差异的最明显月份为 7 月。3 个研究区和北碚实验区的平均年参考作物蒸散量的大小顺序是奉节>北碚>万州>沙坪坝。就相同的复作模式而言,不同研究区作物需水量的大小顺序为:奉节>万州>沙坪坝;同一研究区不同复作模式需水量大小顺序为:油菜-玉米-甘薯>胡豆-玉米-大豆>马铃薯-玉米-甘薯>小麦-玉米-大豆>胡豆-玉米-甘薯>小麦-玉米-甘薯。在平整的耕地上,奉节只有丰水年适宜在坡度较小的耕地上种植小麦-玉米-甘薯、胡豆-玉米-甘薯和小麦-玉米-大豆。万州丰水年可以在平整的土地上种植各种复作模式,平水年适宜种植小麦-玉米-甘薯。沙坪坝平水年适宜种植小麦-玉米-甘薯、胡豆-玉米-甘薯和小麦-玉米-大豆。通过积极调整种植结构,调节播种时间,采用保护性耕作,抗旱品种培育与生物抗旱技术,大力修建蓄水工程,发展设施农业等措施改善水资源利用状况,提高旱作农业的可持续发展能力。

**关键词:**高温伏旱区;作物需水量;水分供需平衡;水分生态适应性;农作系统

中图分类号:S152.75;P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)06-0095-06

## Study on Water Supply-demand Equilibrium and Ecological Adaptability of Dryland Farming Systems in Hot and Summer Drought Areas

ZHANG Yun-lan<sup>1,2</sup>, WANG Long-chang<sup>1</sup>, ZOU Cong-ming<sup>1</sup>, HU Xiao-dong<sup>1</sup>, XUE Lan-lan<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Beibei, Chongqing 400715, China;

2. Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003, China)

**Abstract:** Precipitation is the major water resource in dryland farming system of hot and summer drought areas. In this study, taking representatives of hot and summer drought areas, Fengjie, Wanzhou, Shapingba as study areas, water demand was calculated for several main planting patterns such as wheat-corn-sweet potato, horsebean-corn-sweet potato, wheat-corn-soybean, potato-corn-sweet potato, horsebean-corn-soybean, rape-corn-sweet potato, water supply-demand equilibrium and dislocation characteristics of the main crops and planting patterns in farmland with the slope  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ , on different years of rainfall types was analyzed systematically, and evaluated by mathematical model of water ecological adaptability. Three rainfall type years of Fengjie were mainly determined by actual rainfall in the months from May to September. The month rainfall differences of three rainfall type years in Wanzhou was mainly centralized in the months from July to September. The most obvious rainfall difference of three rainfall type years in Shapingba appeared in July. The order of average annual reference evapotranspiration of three study regions and Beibei was Fengjie>Beibei>Wanzhou>Shapingba. As the same crop or the same planting pattern, the order of

收稿日期: 2010-05-12

资助项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD29B08); 西南季节性干旱区集雨补灌技术集成与示范; 国家自然科学基金项目(30871474);

重庆市科技攻关项目(CSTC, 2008AB1001); 西南大学农业部生物技术作物品质改良重点开放实验室基金项目

作者简介: 张云兰(1984-), 女, 四川成都人, 硕士生, 主要从事农业生态研究。E-mail: zyl840723@sina.com

通信作者: 王龙昌(1964-), 男, 陕西周至人, 博士, 教授, 主要从事农业生态研究。E-mail: wanglc2003@163.com

water demand in different regions was Fengjie> Beibei> Wanzhou> Shapingba. As the same region, the order of different complex planting pattern water demand was, rape-corn-sweet potato> horsebean-corn-soybean> potato-corn-sweet potato> wheat-corn-soybean> horsebean-corn-sweet potato> wheat-corn-sweet potato. In the flat farmland Fengjie, wheat-corn-sweet potato, horsebean-corn-sweet potato and wheat-corn-soybean could be planted on, gentle slope land in wet year. But for Wanzhou, all of the complex planting patterns were suitable in wet year, and wheat-corn-sweet potato could be chosen in average year. As Shapingba, wheat-corn-sweet potato, horsebean-corn-sweet potato and wheat-corn-soybean were suitable in average year. Dryland farming will be sustainable through agricultural water-saving and drought-resistance countermeasures such as planting structure and planting time adjustment, using conservation tillage, cultivating drought-resistant varieties, taking biological drought-resistance technology, building water-storage project.

**Key words:** hot and summer drought area; crop water demand; water supply-demand equilibrium; water ecological adaptability; cropping system

高温伏旱是我国南方地区农业生产的重要制约因素,其严重区域主要包括四川、重庆、湖北、湖南和江西等省市,涉及农田面积 0.133 亿  $\text{hm}^2$ 。近年来由于全球气候变暖,高温伏旱生态灾害更有加重的趋势,致使农田生态质量大幅下降。对于高温伏旱区农业生态系统,在构成农作物生长发育的非生物环境农业生态诸因子中,降水生态因子无疑是主导性限制因子。也就是说,降水生态因子在数量和质量上的微小变化,都将对农作物的生长发育及产量形成产生深刻影响<sup>[1]</sup>。该农业系统的生产潜力很大程度上是由自然降水的丰欠及其时空分布状况决定的。对于这一农业生态经济系统类型,如何在更大程度上依靠现代科学技术和管理科学手段,通过积极、稳妥地发展生态适应性高的农业,同时采取有效的抗旱措施,充分发掘其巨大的生产潜力,大幅度提高生产水平,走向可持续发展道路,是一项很迫切的研究课题。本研究以高温伏旱典型区域——重庆(奉节、万州、沙坪坝)为研究基地,以农田作物种群优化和降水资源化为基本目标,研究旱地农作系统主要复作模式水分平衡特征与水分生态适应性,寻求一个既能有效保持水土,又能有效克服水分亏缺和提高土地生产力的新的结合点。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区概况

重庆就区县分布而言,长江、嘉陵江、涪江沿江地区是伏旱频率高值区,发生频率多在 70% 以上,其中,有两个频率高值中心,一个在中部的丰都、忠县、涪陵一带,另一个在西部沿江地区的江津、巴南、璧山、北碚、合川一带,发生频率在 75% 以上,丰都、江津、璧山发生频率最高,达 80%。本研究所选择的区域(奉节、万州、沙坪坝)伏旱率如附图 6 所示。

奉节为低山温和区。海拔 600~1 000 m 的区域,年平均气温 15℃;最冷月平均气温 3~5℃,极端最低气温一般不低于-10℃;最热月平均气温 23.0~25.5℃,极端最高气温 35~38℃;年降水量一般为 1 200~1 350 mm。万州为中深丘温暖区。海拔 400~600 m 之间的区域,年平均气温 16.8℃;最冷月平均气温 5.0~6.5℃,极端最低气温一般不低于-6℃;最热月平均气温 25.5~27.0℃,极端最高气温 38~40℃;年降水量一般为 1 100~1 200 mm。区内气温较高,热量较为丰富,高温伏旱较重。沙坪坝为河谷平坝浅丘温热区。海拔 400 m 以内的区域,年平均气温 18.3℃;最冷月平均气温 6.0~8.2℃,极端最低气温一般不低于-4℃;最热月平均气温 27.0~29.5℃,极端最高气温 40.0~44.1℃;年降水量大多在 980~1 200 mm。区内气温高,热量丰富,高温伏旱严重<sup>[2]</sup>。

### 1.2 试验区概况

西南大学教学试验用地位于重庆市北碚区,地理位置 29°51'N, 106°27'E,属亚热带季风湿润气候。试验地坡度为 15°,海拔 244 m,年均总日照时数 1 276.7 h,多年平均气温 18℃,≥10℃积温 5 979.5℃,夏季最高气温达到 40℃左右,无霜期达 359d,多年平均降雨量 1 133.7 mm,春、夏、秋、冬降雨量分别为全年的 25.5%、41.4%、27.9%、5.5%,年蒸发量 1 181.1 mm,伏旱发生频率达 93%。试验地土壤为旱地紫色土,坡度较缓,地力相对均匀。土壤容重 1.21  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,土壤田间持水量 31%,pH 值 6.47,土壤有机质 28.00  $\text{g}/\text{kg}$ ,全氮 0.158  $\text{g}/\text{kg}$ ,全磷 0.62  $\text{g}/\text{kg}$ ,全钾 70.41  $\text{g}/\text{kg}$ 。

## 2 研究内容与方法

### 2.1 降水年型及分布特征

通过降水量相对变化率,划分降雨年型<sup>[3-6]</sup>:

$$P = \left[ \frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} \right] \times 100\%$$

式中:  $R$  —— 实际年降水量;  $\bar{R}$  —— 平均年降水量, 取  $P \geq 25\%$  为丰水年,  $P \leq -25\%$  为欠水年,  $-25\% < P < 25\%$  (取降雨量最接近降雨平均值的年) 为平水年。

2.2 复作模式需水量计算

2.2.1 土壤含水率的测定 试验期间用烘干法测定 0-80 cm 土层的土壤含水率。称量出铝盒加湿土的质量 ( $W_{湿}$ ), 即铝盒加烘干土的重量 ( $W_{干}$ ); 再称量该铝盒的重量 ( $W_{盒}$ ), 即可计算出土壤含水量<sup>[5]</sup> ( $W\%$ )。

$$W\% = \frac{W_{湿} - W_{干}}{W_{干} - W_{盒}} \times 100\%$$

2.2.2 土壤贮水量 ( $W$ ) 计算

$$W = d \times h \times W\% \times 10$$

式中:  $d$  —— 试验地土壤容重 ( $g/cm^3$ );  $h$  —— 土层厚度 (cm)<sup>[5-6]</sup>。

2.2.3 复作模式作物实际蒸散量计算 建立农田水量平衡模型<sup>[7]</sup>:

$$ET_a = P + I + G - \Delta W - R_s - D_p$$

式中:  $ET_a$  —— 生育期田间耗水量 (mm);  $P, I, G$  分别为生育期降水量、灌溉量和地下水补给量 (mm);  $\Delta W$  —— 作物生育期土壤贮水变化量, 即生育期末的贮水量与生育期前的贮水量之差 (mm);  $R_s, D_p$  —— 地表径流量和深层渗透量 (mm)。由于试验地无灌溉, 地下水位深于 10 m 以下, 降雨渗透深度在土壤水分测定深度的范围内, 且试验地地势平缓, 一般情况下不会产生径流,

2.2.4 水分胁迫系数 ( $K_s$ ) 的计算

$$K_s = \ln \left[ \left( \frac{S - S_w}{S^* - S_w} \right) \times 100 + 1 \right] / \ln 101$$

式中:  $S$  —— 根层土壤实际含水量;  $S^*$  —— 根层土壤田间持水量;  $S_w$  —— 根层土壤凋萎系数 (采用经验值法)<sup>[3]</sup>。

2.2.5 复作模式需水量 ( $ET_c$ ) 计算<sup>[6]</sup>

$$ET_c = ET_a / K_s$$

2.2.6 复作模式作物系数  $K_c$  计算<sup>[5]</sup>

$$K_c = ET_c / ET_0$$

式中:  $ET_c$  —— 参考作物蒸散量。

根据实验条件, 计算的小麦-玉米-甘薯、马铃薯-玉米-甘薯的作物系数, 结合 FAO 提供的作物系数, 拟定胡豆-玉米-甘薯、小麦-玉米-大豆、胡豆-玉米-大豆和油菜-玉米-甘薯的作物系数, 再计算出复作模式在奉节、万州和沙坪坝的需水量。

2.3 作物水分供需平衡

$$d = P / ET_c$$

式中:  $d$  —— 作物生育期降雨满足率;  $P$  —— 作物生育期降雨量;  $ET_c$  —— 作物生育期需水量<sup>[7]</sup>。

2.4 水分生态适应性评价

$$PESI = \prod_{i=1}^n \{1 - a_i [1 - P(1 - C) / ET_m]_i\}$$

式中:  $PESI$  —— 降水生态适应性指数;  $P$  —— 各生育期的降雨供给量;  $C$  —— 降雨径流系数;  $P(1 - C)$  —— 各生育期的有效降雨供给量;  $ET_m$  —— 作物各生育期的需水量;  $a_i$  —— 权重系数<sup>[7]</sup>。

3 结果与分析

3.1 研究区不同降雨年型月降雨量分布规律

从图 1(a) 可以看出, 奉节丰水年各月降雨量分布与重庆各月降雨分布趋势相同。丰水年、平水年和欠水年在 1-4 月, 1 月 1, 12 月的降雨分布相似, 差距主要体现在 5-9 月, 这 5 个月降雨总量最多的即为丰水年, 降水量最少的即为欠水年。可以看出, 奉节地区 3 种降雨年型是由各年 5-9 月的实际降雨量决定的。

由图 1(b) 可以看出, 万州丰水年降雨量最大值出现在 7 月, 为 356.8 mm, 占全年降雨量的 22.62%; 平水年最大降雨量在 8 月, 为 247.7 mm, 占全年的 21.74%; 欠水年最大降雨量出现在 6 月, 占全年的 19.56%。3 种降雨年型各月降雨量的差异主要体现在 7-9 月。

由图 1(c) 可以看出, 影响沙坪坝 3 种降雨年型的年降雨量差异的最明显月份为 7 月。丰水年仅 7 月的降雨量就为 553.4 mm, 占全年的 38.45%, 而同期平水年的降雨量仅为 101.7 mm, 占全年的 9.97%, 欠水年更少为 26.5 mm, 占全年的 3.25%。

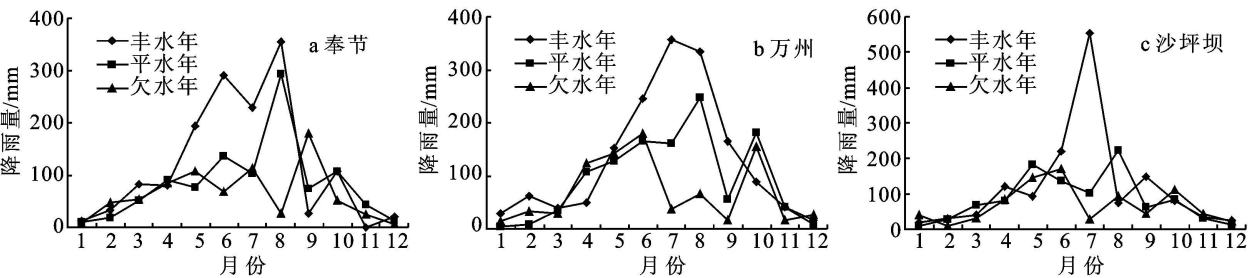


图 1 3 种降雨年型 30 年的平均月降雨分布

3.2 复作模式作物系数及作物需水量

3.2.1 实验条件下复作模式作物系数 通过西南大学实验农场的田间实验测得: 小麦- 玉米- 甘薯生育期前后土壤贮水量分别为 227. 33 mm 和 234. 81 mm, 马铃薯- 玉米- 甘薯生育期前后分别为 230. 25 mm 和 241. 31 mm; 土壤水分胁迫系数中土壤实际含水量为 24. 5%, 土壤田间持水量为 31%, 土壤容重为 1. 21 g/cm<sup>3</sup>, 凋萎系数去经验值 15%。计算出作物实际耗水量、复作模式需水量和作物系数如表 1。

表 1 试验条件下复作模式作物系数

复作模式	耗水量/mm	ET <sub>c</sub> /mm	ET <sub>o</sub> /mm	K <sub>c</sub>
小麦- 玉米- 甘薯	950. 23	989. 82	934. 20	1. 06
马铃薯- 玉米- 甘薯	1158. 70	1206. 98	934. 20	1. 30

由表 1 可以看出, 在实验条件下, 马铃薯- 玉米- 甘薯的耗水量、需水量都比小麦- 玉米- 甘薯高 21. 94%, 作物系数高出 22. 64%。其主要原因是, 单作条件下甘薯的作物系数为 0. 9, 比小麦的 0. 7 高。根据上述各种主要单作物系数, 结合马铃薯- 玉米- 甘薯、小麦- 玉米- 甘薯的作物系数, 估算出其他 4 种复作模式作物系数即: 胡豆- 玉米- 甘薯为 1. 2, 油菜- 玉米- 甘薯为 1. 4, 小麦- 玉米- 大豆为 1. 24, 胡豆- 玉米- 大豆为 1. 36, 它反映了不同复作模式本身的生物学特性、当地作物产量、土壤水肥条件以及田间管理状况等, 其影响农田蒸散量。

3.2.2 研究区参考作物蒸散量 从图 2 中所示 3 个研究区和北碚实验区的平均年参考作物蒸散量, 可以看出 4 个地区的大小顺序是奉节> 北碚> 万州> 沙坪坝, 这与 4 个地区每天的参考作物蒸散量大小顺序相通。其中奉节年均参考作物蒸散量最大, 为 1 056 mm, 比北碚、万州和沙坪坝分别高出 13. 03%、21. 46% 和 17. 2%。

3.2.3 复作模式作物需水量 根据复作模式的作物系数和奉节、万州、沙坪坝的参考作物蒸散量, 求得研究区复作物需水量如图 3, 大小顺序为: 奉节> 万州> 沙坪坝, 并且奉节地区每种复作模式的需水量都比万州和沙坪坝分别高出: 21. 46% 和 32. 53%。就同一研究区而言, 不同复作模式的作物需水量大小和作物系数有关, 即作物系数大的复作模式, 其需水量大, 因为参考作物蒸散量相同, 其大小顺序为: 油菜- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 大豆> 马铃薯- 玉米- 甘薯> 小麦- 玉米- 大豆> 胡豆- 玉米- 甘薯> 小麦- 玉米- 甘薯。

3.3 复作条件下作物水分供需平衡特征

3.3.1 奉节复作条件下作物水分供需平衡特征 由表 2 可知, 在同一降雨年型中, 几种主要复作模式的

水分满足率随耕地坡度增加而减少。各年型中, 复作模式水分满足率的大小顺序为: 小麦- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 甘薯> 小麦- 玉米- 大豆> 马铃薯- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 大豆> 油菜- 玉米- 甘薯。在丰水年型中, 小麦- 玉米- 甘薯在 15° 以下的耕地上水分满足率都大于 1, 胡豆- 玉米- 甘薯、小麦- 玉米- 大豆和马铃薯- 玉米- 甘薯在 10° 以下的耕地上大于 1。

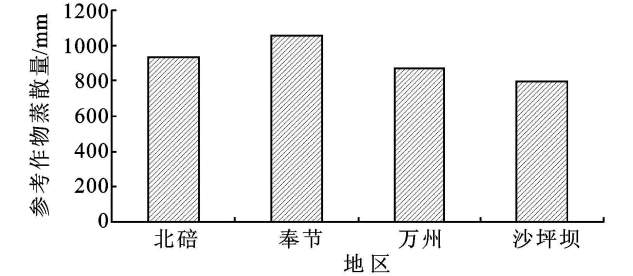
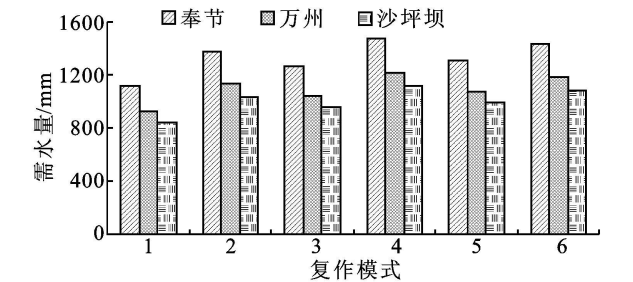


图 2 四个地区 30 年平均参考作物蒸散量



图中: 1: 小麦- 玉米- 甘薯; 2: 马铃薯- 玉米- 甘薯; 3: 胡豆- 玉米- 甘薯; 4: 油菜- 玉米- 甘薯; 5: 小麦- 玉米- 大豆; 6: 胡豆- 玉米- 大豆, 下同。

图 3 研究区主要复作模式需水量分布

3.3.2 万州复作条件下作物水分供需平衡特征 由表 3 可知, 由于几种主要复作模式的生育期都是历时一年时间, 所以在同一降水年型中, 各种模式的获得的有效降雨量相同, 所以复作模式的水分满足率随其需水量增大而减小, 且减小趋势相同, 大小顺序为: 小麦- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 甘薯> 小麦- 玉米- 大豆> 马铃薯- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 大豆> 油菜- 玉米- 甘薯, 和奉节相同。其原因是几种复作模式的作物系数不同, 作物系数大则需水量大。

3.3.3 沙坪坝复作条件下作物水分供需平衡特征 由表 4 可知, 水分满足率变化趋势和奉节、万州基本一致。适合在平水年种植的模式为小麦- 玉米- 甘薯、胡豆- 玉米- 甘薯和小麦- 玉米- 大豆。但相对于奉节和万州, 沙坪坝欠水年型中, 几种复作模式的水分满足率偏大, 如: 胡豆- 玉米- 甘薯水分满足率比奉节增加 4. 94%, 比万州增加 39. 34%。可以看出在欠水年型中, 沙坪坝种植复作模式由于奉节和万州。在平水年型里, 沙坪坝复作模式水分满足率小于万州。

表 2 奉节主要复作模式降水满足率

水分年型	复作 模式	坡 度					
		0°	5°	10°	15°	20°	25°
丰水年	小麦- 玉米- 甘薯	1. 28	1. 23	1. 12	1. 02	0. 93	0. 83
	马铃薯- 玉米- 甘薯	1. 04	1. 00	0. 92	0. 83	0. 76	0. 68
	胡豆- 玉米- 甘薯	1. 13	1. 08	0. 99	0. 90	0. 82	0. 73
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 97	0. 93	0. 85	0. 77	0. 71	0. 63
	小麦- 玉米- 大豆	1. 09	1. 05	0. 96	0. 87	0. 80	0. 71
	胡豆- 玉米- 大豆	1. 00	0. 96	0. 88	0. 80	0. 73	0. 65
平水年	小麦- 玉米- 甘薯	0. 99	0. 95	0. 87	0. 79	0. 72	0. 64
	马铃薯- 玉米- 甘薯	0. 80	0. 77	0. 71	0. 64	0. 59	0. 52
	胡豆- 玉米- 甘薯	0. 87	0. 84	0. 77	0. 70	0. 64	0. 57
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 75	0. 72	0. 66	0. 60	0. 54	0. 48
	小麦- 玉米- 大豆	0. 84	0. 81	0. 74	0. 67	0. 61	0. 55
	胡豆- 玉米- 大豆	0. 77	0. 74	0. 68	0. 61	0. 56	0. 50
欠水年	小麦- 玉米- 甘薯	0. 69	0. 66	0. 60	0. 55	0. 50	0. 45
	马铃薯- 玉米- 甘薯	0. 56	0. 54	0. 49	0. 45	0. 41	0. 36
	胡豆- 玉米- 甘薯	0. 61	0. 58	0. 53	0. 48	0. 44	0. 39
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 52	0. 50	0. 46	0. 42	0. 38	0. 34
	小麦- 玉米- 大豆	0. 59	0. 56	0. 52	0. 47	0. 43	0. 38
	胡豆- 玉米- 大豆	0. 53	0. 51	0. 47	0. 43	0. 39	0. 35

表 3 万州主要复作模式降水满足率

水分年型	复作 模式	坡 度					
		0°	5°	10°	15°	20°	25°
丰水年	小麦- 玉米- 甘薯	1. 71	1. 64	1. 51	1. 37	1. 25	1. 11
	马铃薯- 玉米- 甘薯	1. 40	1. 34	1. 23	1. 12	1. 02	0. 91
	胡豆- 玉米- 甘薯	1. 51	1. 45	1. 33	1. 21	1. 10	0. 98
	油菜- 玉米- 甘薯	1. 3	1. 24	1. 14	1. 04	0. 95	0. 84
	小麦- 玉米- 大豆	1. 46	1. 40	1. 29	1. 17	1. 07	0. 95
	胡豆- 玉米- 大豆	1. 33	1. 28	1. 17	1. 07	0. 97	0. 87
平水年	小麦- 玉米- 甘薯	1. 24	1. 19	1. 09	0. 99	0. 90	0. 80
	马铃薯- 玉米- 甘薯	1. 01	0. 92	0. 85	0. 77	0. 71	0. 65
	胡豆- 玉米- 甘薯	1. 09	1. 05	0. 96	0. 87	0. 80	0. 71
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 94	0. 90	0. 82	0. 75	0. 68	0. 61
	小麦- 玉米- 大豆	1. 06	0. 10	0. 93	0. 85	0. 77	0. 69
	胡豆- 玉米- 大豆	0. 96	0. 93	0. 85	0. 77	0. 70	0. 63
欠水年	小麦- 玉米- 甘薯	0. 91	0. 88	0. 80	0. 73	0. 67	0. 59
	马铃薯- 玉米- 甘薯	0. 75	0. 72	0. 66	0. 60	0. 54	0. 48
	胡豆- 玉米- 甘薯	0. 81	0. 77	0. 71	0. 65	0. 59	0. 52
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 69	0. 66	0. 61	0. 55	0. 51	0. 45
	小麦- 玉米- 大豆	0. 78	0. 75	0. 69	0. 62	0. 57	0. 51
	胡豆- 玉米- 大豆	0. 71	0. 68	0. 63	0. 57	0. 52	0. 46

3. 4 复作条件下水分生态适应性研究

由图 4 可知,这种复作模式在 3 个研究区水分生态适应性指数的大小顺序为: 沙坪坝> 万州> 奉节。由于复作模式生育期为一整年,所以水分生态适应指数和复作模式需水量有关,且 3 个研究区的不同作物有相同的变化趋势。就同一研究区来看,不同复作模式的水分生态适应性指数大小顺序为: 小麦- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 甘薯> 小麦- 玉米- 大豆> 马

铃薯- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 大豆> 油菜- 玉米- 甘薯,此顺序和复作模式降水满足率一致。且小麦- 玉米- 甘薯在奉节地区高出油菜- 玉米- 甘薯 20%,在万州地区高出 17. 44%,在沙坪坝地区高出 17. 24%。小麦- 玉米- 甘薯在沙坪坝的水分生态适应性指数最高为 1. 02,油菜- 玉米- 甘薯在奉节最低为 0. 73。

表 4 沙坪坝主要复作模式降水满足率

水分年型	复作模式	坡度					
		0°	5°	10°	15°	20°	25°
丰水年	小麦- 玉米- 甘薯	1. 70	1. 64	1. 50	1. 36	1. 24	1. 11
	马铃薯- 玉米- 甘薯	1. 39	1. 33	1. 22	1. 11	1. 01	0. 90
	胡豆- 玉米- 甘薯	1. 51	1. 44	1. 32	1. 20	1. 10	0. 98
	油菜- 玉米- 甘薯	1. 29	1. 24	1. 14	1. 03	0. 94	0. 84
	小麦- 玉米- 大豆	1. 46	1. 40	1. 28	1. 17	1. 06	0. 95
	胡豆- 玉米- 大豆	1. 33	1. 27	1. 17	1. 06	0. 97	0. 86
平水年	小麦- 玉米- 甘薯	1. 21	1. 16	1. 06	0. 97	0. 88	0. 78
	马铃薯- 玉米- 甘薯	0. 98	0. 95	0. 87	0. 79	0. 72	0. 64
	胡豆- 玉米- 甘薯	1. 07	1. 02	0. 94	0. 85	0. 78	0. 69
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 91	0. 88	0. 80	0. 73	0. 67	0. 59
	小麦- 玉米- 大豆	1. 03	0. 99	0. 91	0. 83	0. 75	0. 67
	胡豆- 玉米- 大豆	0. 94	0. 90	0. 83	0. 75	0. 69	0. 61
欠水年	小麦- 玉米- 甘薯	0. 96	0. 93	0. 85	0. 77	0. 70	0. 63
	马铃薯- 玉米- 甘薯	0. 79	0. 76	0. 69	0. 63	0. 57	0. 51
	胡豆- 玉米- 甘薯	0. 85	0. 82	0. 75	0. 68	0. 62	0. 55
	油菜- 玉米- 甘薯	0. 73	0. 70	0. 64	0. 58	0. 53	0. 47
	小麦- 玉米- 大豆	0. 82	0. 79	0. 73	0. 66	0. 60	0. 54
	胡豆- 玉米- 大豆	0. 75	0. 72	0. 66	0. 60	0. 55	0. 49

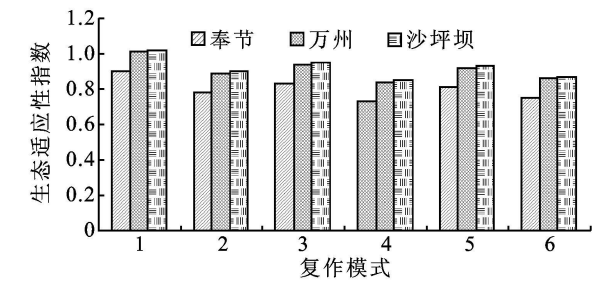


图 4 研究区主要复作模式水分生态适应性指数分布

4 结 论

奉节地区 3 种降雨年型是由各年 5- 9 月的实际降雨量决定的。丰水年 5- 9 月的降水总量为 1 093. 9 mm, 占全年降雨量的 76. 48%; 平水年 5- 9 月的降水总量为 684. 7 mm, 占全年总和的 67. 34%; 而欠水年同期只有 494. 1 mm, 但全年总降雨量的 64. 39%。万州 3 种降雨年型各月降雨量的差异主要体现在 7- 9 月, 丰水年 7- 9 月的降雨量为 854. 3 mm, 占全年的 54. 16%; 平水年 7- 9 月的降雨量为 462. 5 mm, 占全年的 54. 16%, 而欠水年此期的降雨量为 462. 5 mm, 占全年的 40. 59%。沙坪坝 3 种降雨年型的年降雨量差异的最明显月份为 7 月。丰水年仅 7 月的降雨量就为 553. 4 mm, 占全年的 38. 45%, 而同期平水年的降雨量仅为 101. 7 mm, 欠水年更少为 26. 5 mm。就相同的复作模式而言, 不同研究区作物需水量的大小顺序为: 奉节> 万州> 沙坪坝; 同一研究区不同复作模式作物需水量大小顺序为: 油菜- 玉米- 甘薯> 胡豆- 玉米- 大豆> 马铃薯- 玉米- 甘薯> 小麦- 玉米- 大豆> 胡豆- 玉米-

甘薯> 小麦- 玉米- 甘薯, 其大小是由代表作物种类、产量特征、土壤水肥状况及田间管理状况的作物系数影响决定的。复作模式的生育期为全年, 同一研究区里, 几种复作模式的水分满足率大小和降水年型有关, 其大小顺序是丰水年> 平水年> 欠水年。奉节只有丰水年适宜在坡度较小的耕地上种植小麦- 玉米- 甘薯、胡豆- 玉米- 甘薯和小麦- 玉米- 大豆。万州丰水年里可以在平整的土地上种植各种复作模式, 平水年里适宜种植小麦- 玉米- 甘薯。沙坪坝平水年里适宜种植小麦- 玉米- 甘薯、胡豆- 玉米- 甘薯和小麦- 玉米- 大豆。针对高温伏旱区的伏旱发生频率高, 持续时间长, 降雨时空分布不均的特点, 通过积极调整种植结构, 调节播种时间, 采用保护性耕作, 抗旱品种培育、生物抗旱技术, 大力修建蓄水工程, 发展设施农业等措施改善水资源利用状况, 提高农业的可持续发展能力。

重庆地形、地貌复杂多样, 最高点海拔达 2 796. 8 m, 最低处海拔仅 73. 1 m, 其中山地占 59. 8%, 丘陵占 30. 2%, 平坝占 10%。本研究选取了奉节、万州、沙坪坝 3 个研究区, 分别代表低山温和区、低山丘陵区、河谷平坝浅丘温热区。还没能完全覆盖重庆所有高温伏旱区的类型, 在以后的研究中可以扩充研究对象。本研究分析了高温伏旱区旱作系统作物水分供需平衡和水分生态适应性, 都是结合降水资源来研究, 高温伏旱的另一方面温度, 考虑的比较少, 有待于更全面和深入的研究, 能够得出更符合该地的作物种植模式。

增施肥料, 土壤养分将日趋下降, 土壤质量严重退化<sup>[16-17]</sup>, 刀耕火种的轮闲地最终失去种植价值而被迫撂荒便是最好的例证。

因此, 针对南方喀斯特石漠化地区, 植被丧失, 土壤资源非常脆弱性的特点<sup>[16]</sup>, 对其进行生态重建, 提出几点建议: (1) 先易后难、循序渐进, 对生态重建所在地的石漠化程度、土壤肥力程度进行评估, 对严重石漠化、土壤养分亏缺严重、立地条件差的石漠化区, 应按先种草后种灌木再种乔木的顺序来推进生态重建工作。通过种草来保持水土和土壤湿度, 改善土壤环境, 为下一步种植灌木提供环境基础, 再由灌木到乔木, 如此依次展开; 而不是在其土壤环境改善之前, 直接种植乔木, 因其土壤环境恶劣、养分不足, 乔木无法生存或生而不长, 导致生态重建失败。(2) 通过人工施肥, 尤其是多施有机肥、农家肥来改良土壤的理化性质, 改良土壤的团粒结构, 提高石漠化区土壤保墒能力, 提高土壤有机质含量, 从而保证土壤养分含量处于一个相对平衡状态, 不因为季节性变化土壤养分含量而大起大落。(3) 生态重建工作不仅是为了提高喀斯特石漠化区植被覆盖度来实现保持水土, 更应从生态经济学的角度出发, 根据当地土壤条件, 选择那些既能改善石漠化生态条件又具有一定经济价值能使农民增收的优良牧草、药材、果树, 因地适宜地推进。

参考文献:

[1] 任海, 彭少麟. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[2] 黄钰铃, 惠二青, 李靖. 西南喀斯特地区石漠化成因及防治初探[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(1): 1-4.

[3] 覃家科, 李先琨, 吕仕洪, 等. 广西马山岩溶山地植被恢复过程的种类更替与小气候动态[J]. 广西科学, 2005, 12(2): 146-151.

[4] 吕仕洪, 陆树华, 欧祖兰, 等. 桂西南石漠化山地土壤种

子库的基本特征及植被恢复对策[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 6-11.

[5] 欧祖兰, 吕仕洪, 陆树华, 等. 桂西南峰丛洼地退化植被土壤种子库的初步研究[J]. 广西植物, 2006, 26(6): 643-649.

[6] 马文宝, 薛建辉, 卜晓莉, 等. 喀斯特山地森林群落土壤种子库研究综述[J]. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2618-2623.

[7] 李先琨, 何成新. 西部开发与热带亚热带岩溶脆弱生态系统恢复重建[J]. 农业系统科学与综合研究, 2002(1): 13-16.

[8] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 185-189.

[9] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.

[10] 姚长宏, 杨桂芳, 蒋忠诚, 等. 岩溶地区生态系统养分平衡研究[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 41-45.

[11] 吴士章, 朱文孝, 苏维词, 等. 喀斯特地区土壤侵蚀及养分流失定位试验研究: 以贵阳市修文县久长镇为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 202-205.

[12] 涂成龙, 林昌虎, 何腾兵, 等. 石漠化地区生态恢复过程中土壤养分变异特征[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 22-25.

[13] 杨善朝, 张军舰. SPSS 统计软件应用基础[M]. 桂林: 广西师大出版社, 2001.

[14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[15] 袁东海, 王兆骞, 郭新波, 等. 红壤小流域不同利用方式土壤钾素流失特征研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(3): 16-20.

[16] 何腾兵. 贵州喀斯特山区水土流失状况及农业建设途径[J]. 水土保持学报, 2000, 14(8): 28-34.

[17] 王国梁. 黄土丘陵区纸纺沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.

(上接第 100 页)

参考文献:

[1] 高阳华, 唐云辉, 冉荣生. 重庆市伏旱发生分布规律研究[J]. 贵州气象, 2002, 26(3): 6-11.

[2] 江玉华, 程炳岩, 邓承之, 等. 重庆市严重伏旱气候特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2005, 10(2): 25-29.

[3] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.

[4] 谢贤群, 吴凯. 麦田蒸腾需水量的计算模式[J]. 地理学

报, 1997, 52(6): 528-535.

[5] 李玉义, 周宪龙, 张海林, 等. 京郊山地旱作区作物水分生态适应性系统评价[J]. 华北农学报, 2005, 20(2): 59-62.

[6] 陈玉民, 郭国双. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.

[7] 王龙昌, 谢小玉, 王立祥, 等. 黄土丘陵区旱地作物水分生态适应性系统评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 758-762.



