

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

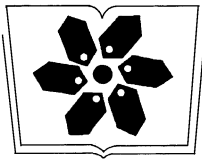
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 7 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	 赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	 王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	 徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106200886

王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 张晓煜, 李茂松. 基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化. 生态学报, 2012, 32(7): 2099-2109.

Wang M T, Qu H H, Yang X G, Zhang X Y, Li M S. Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2099-2109.

基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化

王明田^{1,5}, 曲辉辉^{2,4}, 杨晓光^{2,*}, 张晓煜², 李茂松³

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;
3. 中国农业科学院农业资源与区划研究所, 北京 100081; 4. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030;
5. 四川省农业气象中心, 成都 610071)

摘要:比较分析四川 8 个农业生态区典型站点及其主要种植模式的降水盈亏产量降低率、产量降低率风险指数、降水利用效率和降水经济效率。结果表明: (1) 四川省不同区域、不同种植模式、不同作物及其不同生育阶段基于降水盈亏的产量降低率多年均值差异较大。区域分布上, 雅安最低, 仅 23%, 攀西最高, 达 50% 以上, 其余地区 30%—40%; 种植制度上, 麦—玉—苕等旱三熟低于麦—稻等水旱轮作两熟制; 作物种类上, 冬小麦、冬油菜、秋播马铃薯等作物普遍高于水稻、玉米、棉花、红薯和大豆作物; 生育阶段上, 冬小麦、冬油菜、秋播马铃薯作物开花前后普遍较高, 各种作物生育末期较低。 (2) 基于自然降水, 攀西地区遭遇旱灾的风险极大, 麦—玉—苕等旱三熟的产量降低率风险指数相对较小; 雅安等盆地内部多数区域由于阶段性降水过多引起湿害偏重, 导致麦—稻等水旱轮作两熟制略优于旱三熟。基于降水利用效率和降水经济效率, 各地比较一致, 较优的种植制度首先是麦(油、薯)—稻两熟制, 其次才是麦(油)—玉—苕(豆)旱三熟。 (3) 综合旱涝灾害风险、降水利用效率和降水经济效率, 以及复杂地形等因素, 有较好灌溉条件的农田应以麦(油、薯)—稻水旱轮作两熟制为主, 而无水源保障的旱地则以麦(油)—玉—苕(豆)旱三熟为主。

关键词:降水盈亏产量降低率; 产量降低率风险指数; 降水利用效率; 降水经济效率; 种植制度优化

Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province

WANG Mingtian^{1,5}, QU Huihui^{2,4}, YANG Xiaoguang^{2,*}, ZHANG Xiaoyu², LI Maosong³

1 Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610071, China

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

3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

4 Heilongjiang Meteorological Research Institute, Harbin 150030, China

5 Agricultural Meteorology Center of Sichuan, Chengdu 610071, China

Abstract: In the 8 typical stations of agro-ecological zone in Sichuan Province, analysis study on the primary planting models was done to compare the yield reduction rate related with precipitation profit and loss, risk index of yield reduction rate, rainfall use efficiency (RUE) and economic efficiency of precipitation (EEP) of the primary cropping patterns. The results showed that: (1) The averaged yield reduction rates related with precipitation profit and loss significantly varied with regions, cropping patterns, crops and crop growth stages in Sichuan Province. Spatially, the lowest value of 23% appeared in Ya'an station, the highest value above 50% appeared in Panxi station, and 30%—40% in other regions; in cropping patterns, the value of dry triple cropping pattern with wheat-maize-Chinese trumpet creeper was lower than that of

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAD04B07); 全球变化研究国家重大科学研究计划(“973”计划)(2010CB951502)

收稿日期:2011-06-20; **修订日期:**2011-10-31

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

the rotation pattern with wheat-rice; in crop species, the values of winter wheat, winter rape and autumn sowing potato et al. were generally higher than that of rice, maize, cotton, sweet potato and soybean; in growth stages, the values before and after flowering of winter wheat, winter rape and autumn sowing potato were generally higher; however, values at the end stage of each crop were relatively lower. (2) Based on natural precipitation, Panzhihua and Xichang encountered the highest risk of drought, but the risk index of yield reduction rate for the dry triple cropping pattern with wheat-maize-Chinese trumpet creeper was relatively lower; due to excessive staged precipitation in most basin regions like Ya'an, the waterlogging disaster was more severe, resulting that the rotation pattern with wheat-rice was slightly superior to the dry triple cropping pattern with wheat-maize-Chinese trumpet creeper. Based on the rainfall use efficiency (RUE) and economic efficiency of precipitation (EEP), comparing results were great consistent at all stations: the superior cropping pattern was the double cropping pattern with wheat (rape or potato)-rice followed by the dry triple cropping pattern with wheat (rape)-maize-Chinese trumpet creeper (soybean). (3) Synthetically considering the risk of drought and flood, rainfall use efficiency, economic efficiency of precipitation and complex terrain factors, the double cropping rotation pattern with wheat (rape or potato)-rice was advised in croplands with well irrigation conditions, while dry triple cropping pattern with wheat (rape)-maize-Chinese trumpet creeper (soybean) was advised in dry lands without water guarantee.

Key Words: yield reduction rate related with precipitation profit and loss; risk index of yield reduction rate; rainfall use efficiency (RUE); economic efficiency of precipitation (EEP); cropping system optimization

季节性旱涝是四川省主要农业气象灾害,比较分析四川各地降水利用情况,并据此优化种植制度,对减少旱涝灾害损失,促进四川农业可持续发展具有重要意义^[1]。

前人对降水利用的研究多集中于降水时空分布规律及其合理利用^[2-4]、降水生产潜力与降水利用效率的计算分析^[5-7]、提高降水利用的农业工程措施^[8-11]、作物高效节水栽培技术改进^[12-15]等领域,研究区域多集中在北方地区,研究对象多为单一作物或种植模式。计算降水生产潜力时主要考虑降水亏缺,即干旱对作物生长的制约,较少考虑水分过多的影响。分析降水利用效率时主要从作物叶片水平、群体水平和产量水平出发,很少从经济效益去比较。近年来,曲辉辉等人在作物需水与自然降水的适配度以及相应的防旱避灾种植制度方面做了大量工作^[16-17],为降水利用研究开辟了新的领域。

本文选择四川省典型站点的主要种植模式为研究对象,从作物需水入手,既考虑水分亏缺,即干旱对光温生产潜力造成的损失,又考虑水分过多,即湿、涝对作物生长的影响;既分析降水利用产量效率,又比较降水利用经济效率。在此基础上,评价复杂地形、气候背景下不同种植模式的优劣,为优化季节性旱涝区防灾减灾种植制度,为农业防灾减灾规划,提高作物适应气候波动的能力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域背景与种植制度选择

四川省位于青藏高原东麓,地形地貌极为复杂,境内高原、山地、丘陵、平原、河谷均有分布。独特的地理位置和复杂的地形地貌孕育出多种多样的气候类型和极其丰富的生物资源,农业种植制度与种植模式也因此而精彩纷呈。本文根据气温、干燥度等农业生态因子的时空分布特征,结合地形地势将四川省分为8个农业生态区和1个非农区(表1)。除川西北高原非农区以外,每个区域选取一个典型站点进行量化研究(图1)。选点时遵循典型性和全面性的原则。

本文以种植面积比较大的粮经作物和较常见的种



图1 四川省典型站点分布图

Fig. 1 Location of typical stations for Sichuan province

植模式为研究对象,没有考虑蔬菜、烟草、麻类等作物和少见的种植模式(表 1)。

表 1 四川省各区域的典型站点和种植制度

Table 1 Typical stations and cropping systems of each region

区域 Region	典型站点 Typical station	种植制度 Cropping systems
川西南山地干热河谷区 Dry-hot valley area of southwest Sichuan Province	攀枝花	麦—玉—苕、麦—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻
川西高原安宁河平原区 Anning River plain area of the Western Sichuan plateau	西昌	麦—玉—苕、麦—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻
盆西高原盆地过渡湿润气候区 Humid climate transition zone between the Sichuan Basin and the Tibetan Plateau.	雅安	麦—玉—苕、麦—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻
成都平原湿润气候区 The humid climate zone of Chengdu Plain	成都	麦—玉—苕、麦—玉—豆、油—玉—苕、油—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻
川中丘陵夏伏旱频发区 Summer drought frequently of Sichuan Hilly Area	遂宁	麦—玉—苕、麦—玉—豆、油—玉—苕、油—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻、油—棉
川北半湿润山地丘陵过渡区 Subhumid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the North of Sichuan	平武	麦—玉—苕、麦—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻
川南中低山丘陵湿润气候区 Humid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the South of Sichuan	宜宾	麦—玉—苕、麦—玉—豆、麦—稻、薯—稻、油—稻
川东北盆周湿润山区 Moist mountainous area in Northeast of Sichuan Basin edge	巴中	麦—玉—苕、麦—玉—豆、薯—玉—苕、麦—稻、薯—稻、油—稻

表中所述稻为一季稻,薯为马铃薯,苕为红苕

1.2 资料来源

气象资料来源于四川省气象局,包括相关站点 1961—2009 年的逐日降水量、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均气压、平均水汽压、平均相对湿度、风速以及相应的海拔高度等。作物生育期和种植制度资料来源于 1981—2009 年四川省 43 个农业气象观测站和 2 个农业气象试验站,种植模式的选择参考了农业专家的建议。耕地、灾情、农业经济等资料来源于《四川省农村统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 降水盈亏导致的产量降低率

采用黄秉维系数法^[18]计算各级生产潜力,具体计算步骤如下:

光合生产潜力

$$YQ = 0.219 \times C \times R_s \quad (1)$$

式中, YQ 为光合生产潜力 (kg/hm^2), 0.219 为黄秉维系数, C 为作物经济系数, R_s 为作物生长季内太阳总辐射 (kJ/cm^2)。

$$R_s = (ms + c) \times Q_A \quad (2)$$

式中, Q_A 为天文辐射量 (kJ/cm^2), s 为日照百分率, m 和 c 为经验常数,不同地区取值不同,四川地区取值 0.205 ^[19]。

本研究中经济系数取值^[20-26]见表 2。

表 2 作物经济系数

Table 2 Crop economic coefficients

作物种类 Crops	经济系数 Economic coefficient	作物种类 Crops	经济系数 Economic coefficient
冬小麦 Winter wheat	0.45	红薯 Sweet potato	0.75
玉米 Maize	0.45	棉花 Cotton	0.16(皮棉)
水稻 Rice	0.50	大豆 Soybeans	0.43
油菜 Rape	0.35	马铃薯 Potato	0.75

光温生产潜力

$$YT = YQ \times f(t) \quad (3)$$

式中, YT 为光温生产潜力 (kg/hm^2), YQ 为光合生产潜力 (kg/hm^2), $f(t)$ 为温度订正函数。其中 $f(t)$:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{\min}, t > t_{\max} \\ \frac{t - t_{\min}}{t_s - t_{\min}} & t_{\min} \leq t < t_s \\ \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_s} & t_s \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 为某阶段的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), $t_{\min}$ 为作物生长下限温度 ($^{\circ}\text{C}$), t_s 为作物生长最适温度 ($^{\circ}\text{C}$), $t_{\max}$ 为作物生长上限温度 ($^{\circ}\text{C}$)。本研究中应用的作物三基点温度^[20,26]如表 3 所示。

表 3 作物三基点温度/ $^{\circ}\text{C}$

Table 3 Crop three fundamental points temperature

作物 Crops	最低温度 Minimum temperature	最适温度 Optimal temperature	最高温度 Maximum temperature	作物 Crops	最低温度 Minimum temperature	最适温度 Optimal temperature	最高温度 Maximum temperature
小麦 Wheat	4	25	32	马铃薯 Potato	4	20	29
水稻 Rice	10	30	42	红薯 Sweet potato	15	28	33
油菜 Rape	4	20	30	棉花 Cotton	14	28	35
玉米 Maize	8	32	44	大豆 Soybeans	12	30	40

光温水生产潜力

$$YW = YT \times f(w) \quad (5)$$

式中, YW 为光温水生产潜力 (kg/hm^2), YT 为光温生产潜力 (kg/hm^2), $f(w)$ 为水分订正函数。水稻等湿生作物 $f(w)$ 函数用下式表达:

$$f(w) = \begin{cases} \frac{ET_c}{P'} & 0 \leq P' < ET_c \\ 1 & P' \geq ET_c \end{cases} \quad (6)$$

小麦、玉米等旱生作物 $f(w)$ 函数^[27]:

$$f(w) = \begin{cases} \frac{ET_c}{P'} & P' \leq ET_c \\ 1 - \frac{P' - ET_c}{3ET_c} & P' > ET_c \end{cases} \quad (7)$$

式中, ET_c 为作物需水量 (mm), P' 为作物生育期内的有效降水 (mm), 采用 FAO 推荐的潜在蒸散与降水的比率法^[28]计算。

根据当地的土壤和气候条件将作物生育期划分为若干时段并计算各时段的总降水量, 对应时段的潜在蒸散量与降水量比值的月均值即为有效降水比率。所需土壤和气候参数如表 4 所示^[29]。

本研究采用第 3 种土壤类型, 即其保水能力为 80—120 mm/m 。

经上述方法计算可得到光温生产潜力和气候生产潜力。相对来说, 自然条件下水分的逐年波动较大, 所以认为气候生产潜力偏离光温生产潜力的多少就是因降水不适造成的光温生产潜力亏缺, 因此, 相对于光温生产潜力的产量降低率为:

$$P = (YT - YW) / YT \times 100\% \quad (8)$$

式中, YT 、 YW 分别为光温生产潜力和气候生产潜力 (kg/hm^2)。

表 4 不同土壤类型和气候条件下各时段天数

Table 4 Numbers of days of each stage under different soil types and climatic conditions

作物 Crops	潜在蒸散量日均值 Potential evapotranspiration of daily mean values/(mm/d)	土壤质地及保水能力 Soil Texture and Water-holding capability/(mm/m)			
		轻(<40)	中(40—80)	重(80—120)	特重(>120)
水稻 Rice	3—12	2	3	4	7
其他作物 Other crops	>6	4	7	10	15
	<6	7	10	15	30

1.3.2 产量降低率风险指数

统一评价指标以便于分析,本文引入产量降低率风险指数^[30]。所谓产量降低率风险指数,即将产量降低率以 10% 为步长划分为若干等级,并分别求出每一等级的发生概率,再将每一等级的中值与对应的概率乘积累加之和。产量降低率风险指数越低,说明降水的限制作用越弱,光温生产潜力发挥越好,反之则说明限制作用越强,种植制度越差:

$$I = F(G, P) = \sum_{i=1}^n G_i P_i \quad (9)$$

式中, G_i 为第 i 个产量降低率等级, P_i 为对应产量降低率等级的发生概率, I 为产量降低率风险指数。

1.3.3 降水利用效率

降水利用效率(precipitation use efficiency, PUE)指单位降水量所形成的某种作物或种植模式所有主产品的经济产量,即:

$$PUE = Y/P \quad (10)$$

式中, PUE 为降水利用效率($\text{kg}/(\text{mm}/\text{hm}^2)$), Y 为单位面积的经济产量(kg/hm^2), P 为生长季内自然降水量(mm)。

1.3.4 降水经济效率

借用化肥产值率^[31]的概念,本文提出主产品降水经济效率(precipitation economic efficiency, PEE)的概念,指单位降水量所形成的某种作物或种植模式主产品的净产值,即:

$$PEE = Y/P \quad (11)$$

式中, PEE 为降水经济效率($\text{元}/(\text{mm}/\text{hm}^2)$), Y 为单位面积的主产品净产值($\text{元}/\text{hm}^2$), P 为生长季内自然降水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 产量降低率的比较分析

以西昌、成都和巴中为例剖析,西昌地区各种种植模式中,产量降低率最低的为麦—玉—苕,约为 44%;油—稻和麦—玉—豆分别为 47% 和 48%;麦(薯)—稻最高,为 56%。各种作物中,冬小麦和马铃薯的产量降低率最高,各生育阶段多在 80% 以上;其次为油菜,各生育阶段为 50%—80%;再次为水稻,各生育阶段为 16%—73%;最低的为红薯和大豆,多在 50% 以下。

成都地区的各种种植模式中,油—玉—苕(豆)产量降低率最低,为 38%;麦—玉—苕(豆)和油—稻居中,为 40%;麦(薯)—稻最高,为 42%。各种作物中,产量降低率最高的为冬小麦和马铃薯,大部分生育阶段为 50% 以上;油菜略低于二者,大部分生育阶段为 28%—66%;玉米、大豆、红薯、水稻最低,多为 50% 以下。

巴中地区各种种植模式中,麦—玉—苕的产量降低率最低,为 32%;油—稻、麦—玉—豆和薯—玉—苕分别为 33%、33% 和 34%;麦—稻约为 36%;薯—稻最高,为 39%。对于各种作物,水稻、玉米、大豆和红薯等播种较晚的作物大部分生育阶段产量降低率较低,为 30% 以下;而越冬作物油菜、冬小麦和早春马铃薯产量降低率较高,大部分生育阶段达到 50% 以上。

与西昌等 3 个站点的分析方法相同,对四川各典型站点进行分析,结果如下:四川各地、各种种植模式产量

降低率多年均值差异较大,雨城雅安最低,仅 23%;干热河谷区的攀枝花最高,为 56%;西昌也较高,达 50% 上下;其余多数地区为 30%—40%。说明攀西地区种植业受自然降水不足的影响很大,必须加强以防旱减灾,提升灌溉能力为主的农田水利建设,而雅安的雨水比较充足。种植制度方面,麦—玉—苕等旱三熟的产量降低率低于油—稻等水旱轮作两熟制。各种作物之间,全省基本一致,即冬小麦、油菜和早春马铃薯等小春作物受自然降水不足的影响较大,而水稻、玉米、大豆、红薯等大春作物受降水影响较小。各站点作物生育阶段之间的产量降低率相差十分悬殊,产量降低率最高值多发生在冬小麦分蘖—开花期、油菜现蕾—开花期及马铃薯的生育中前期,最高值可达 95% 以上,主要由频繁发生的冬春干旱所致;各种作物的生育末期受水分制约较小,产量降低率较低,大部分低于 10%。

2.2 产量降低率的风险分析

表 5 显示,四川各地、各种种植模式间产量降低率风险指数差异很大,变化范围为 0.2—0.7。攀枝花地区高温低湿少降水,产量降低率风险指数普遍较高,多数在 0.6 以上,其中麦—玉—苕相对较优,最差的为薯—稻。西昌与攀枝花相似,风险指数大多在 0.5 以上,较优的种植模式为麦—玉—苕,最差的为薯—稻。雅安由于降水充沛,风险指数全川最低,最优模式为油—稻,麦—玉—苕相对较差。成都较优模式为麦(油、薯)—稻,油—玉—豆较差。遂宁的麦—稻和油—玉—苕较优,油—玉—豆较差。平武的薯—稻和麦—玉—苕较优,麦—玉—豆较差。宜宾较优模式为麦—玉—苕,较差的为薯(麦)—稻。巴中油(薯)—稻较优,麦—玉—豆较差。

表 5 四川省各种种植制度产量降低率风险指数

Table 5 Risk index of reducing rates of yield of each cropping systems in Sichuan province

种植制度 Cropping systems	典型站点 Typical station							
	攀枝花	西昌	雅安	成都	遂宁	平武	宜宾	巴中
麦—玉—苕 W-M-SP	0.58(1)	0.43(1)	0.37(5)	0.39(4)	0.28(3)	0.39(2)	0.21(1)	0.34(4)
麦—玉—豆 W-M-S	0.66(2)	0.55(4)	0.34(4)	0.43(6)	0.31(4)	0.43(5)	0.28(2)	0.41(6)
薯—玉—苕 P-M-SP	—	—	—	—	—	—	—	0.33(2)
油—玉—苕 Ra-M-SP	—	—	—	0.40(5)	0.28(2)	—	—	—
油—玉—豆 Ra-M-S	—	—	—	0.44(7)	0.40(8)	—	—	—
麦—稻 W-Ri	0.67(4)	0.52(3)	0.22(2)	0.35(1)	0.28(1)	0.41(4)	0.31(4)	0.35(5)
薯—稻 P-Ri	0.70(5)	0.59(5)	0.22(3)	0.36(2)	0.38(7)	0.38(1)	0.32(5)	0.33(2)
油—稻 Ra-Ri	0.66(3)	0.52(2)	0.20(1)	0.36(2)	0.37(5)	0.40(3)	0.30(3)	0.33(1)
油—棉 Ra-C	—	—	—	—	0.38(6)	—	—	—

表中括号内数字为当地各种种植制度按产量降低率风险指数由低到高的排列次序;W:冬小麦,M:玉米,SP:红苕,S:大豆,P:马铃薯,Ra:油菜,Ri:水稻,C:棉花

表 6 显示:仅仅依靠自然降水,攀西和宜宾农区较优的种植制度是旱三熟,即麦(油)—玉—苕(豆);其余地区水旱轮作两熟制较好。进一步研究发现,雅安、成都、平武、巴中等地,尤其是雅安,麦—玉—苕等旱三熟的产量降低率风险指数反而高于水旱轮作两熟制,其原因不是水分不足,而是阶段性降水过多引起湿害造成的。

2.3 降水利用效率的比较分析

本节仅考虑单位降水量对作物经济产量形成的作用,文中所用产量数据如表 7 所示。

表 8 显示:四川省不同区域各种种植模式降水利用效率差异很大,变化范围为 2.9—21.6 (kg/mm/hm²)。攀枝花由于降水总量小,降水利用效率普遍高于其它地区,而雅安刚好相反。各种种植模式之间,攀枝花降水利用效率最高的为薯(麦)—稻,麦—玉—苕最低。西昌最高的为薯—稻,最低为麦—玉—苕和油—稻。雅安最高为麦(薯)—稻,最低为麦—玉—苕。成都最高为麦—稻,油—玉—苕最低。遂宁最高为麦(薯)—稻,最低为油—棉。平武和宜宾麦(薯)—稻最高,最低为麦—玉—苕。巴中麦—稻最高,油—稻最低。另外,水旱轮作两熟制的降水利用效率普遍高于旱三熟。

表 6 四川省各区域基于产量降低率风险指数的种植制度优化

Table 6 Optimized cropping system based on the risk index of deficiency rate of potential yield of each region

区域 Region	典型站点 Typical stations	较优种植制度 Optimized cropping system
川西南山地干热河谷区 Dry-hot valley area of southwest Sichuan Province	攀枝花	冬小麦—玉米—红薯、冬小麦—玉米—大豆
川西高原安宁河平原区 Anning River plain area of the Western Sichuan plateau	西昌	冬小麦—玉米—红薯、油菜—水稻
盆西高原盆地过渡湿润气候区 Humid climate transition zone between the Sichuan Basin and the Tibetan Plateau.	雅安	油菜—水稻、冬小麦—水稻、马铃薯—水稻
成都平原湿润气候区 The humid climate zone of Chengdu Plain	成都	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻、油菜—水稻
川中丘陵夏伏旱频发区 Summer drought frequently of Sichuan Hilly Area	遂宁	冬小麦—水稻、油菜—玉米—红薯、冬小麦—玉米—红薯
川北半湿润山地丘陵过渡区 Subhumid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the North of Sichuan	平武	马铃薯—水稻、冬小麦—玉米—红薯、油菜—水稻、冬小麦—水稻
川南中低山丘陵湿润气候区 Humid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the South of Sichuan	宜宾	冬小麦—玉米—红薯、冬小麦—玉米—大豆、油菜—水稻
川东北盆地周湿润山区 Moist mountainous area in Northeast of Sichuan Basin edge	巴中	油菜—水稻、马铃薯—水稻、马铃薯—玉米—红薯

表 7 作物平均单产/(kg/hm²)

Table 7 Average crop yield per hectare

典型站点 Typical stations	作物单产 Crop yield							
	一季稻 Single-season rice	冬小麦 Winter wheat	玉米 Maize	大豆 Soybeans	红薯 Sweet potato	马铃薯 Potato	油菜 Rape	棉花 Cotton
攀枝花	7907	3499	5491	1752	3885	3590	1195	—
西昌	6924	3408	5242	2184	4105	4595	1522	—
雅安	7770	3871	5332	1462	2460	2530	1439	—
成都	7562	4311	4494	2179	2870	3100	2023	—
遂宁	8306	4258	5330	2586	5560	3285	2159	977
平武	7738	4106	4450	1867	4180	2760	2134	—
宜宾	7676	3055	4823	2196	5055	2100	1478	—
巴中	6832	4603	6326	2467	3935	2420	1587	—

本产量为四川省 2002—2004 年作物实际单产平均值

表 8 四川省不同种植制度的降水利用效率/(kg·mm⁻¹·hm⁻²)

Table 8 PUE of each cropping system in Sichuan Province

种植制度 Cropping systems	典型站点 Typical station							
	攀枝花	西昌	雅安	成都	遂宁	平武	宜宾	巴中
麦—玉—苕 W-M-SP	9.5(5)	7.9(4)	5.2(5)	8.4(5)	10.4(5)	9.8(5)	7.7(4)	8.9(4)
麦—玉—豆 W-M-S	11.2(4)	9.3(3)	6.3(3)	10.5(4)	11.4(4)	10.1(4)	7.7(4)	7.8(5)
薯—玉—苕 P-M-SP	—	—	—	—	—	—	—	9.6(3)
油—玉—苕 Ra-M-SP	—	—	—	6.4(7)	8.4(7)	—	—	—
油—玉—豆 Ra-M-S	—	—	—	7.8(6)	8.6(6)	—	—	—
麦—稻 W-Ri	21.1(2)	10.8(2)	8.1(1)	15.2(1)	15.5(1)	16.7(1)	11.0(1)	11.8(1)
薯—稻 P-Ri	21.6(1)	11.9(1)	7.4(2)	13.9(2)	14.7(2)	15.8(2)	10.6(2)	10.1(2)
油—稻 Ra-Ri	15.9(3)	7.4(5)	6.2(4)	11.3(3)	11.5(3)	13.3(3)	8.4(3)	7.7(6)
油—棉 Ra-C	—	—	—	—	2.9(8)	—	—	—

表中括号内数字为当地各种种植制度按降水利用效率由高到低的排列次序;W:冬小麦,M:玉米,SP:红苕,S:大豆,P:马铃薯,Ra:油菜,Ri:水稻,C:棉花

表 9 为基于降水利用效率的较优种植制度。从降水利用效率看,四川省各区域一年两熟优于一年三熟,麦(薯)—稻是各地最佳种植模式。

表 9 四川省各区域基于降水利用效率的种植制度优化
Table 9 Optimized cropping system based on PUE of each region

区域 Region	典型站点 Typical stations	较优种植制度 Optimized cropping system
川西南山地干热河谷区 Dry-hot valley area of southwest Sichuan Province	攀枝花	马铃薯—水稻、冬小麦—水稻
川西高原安宁河平原区 Anning River plain area of the Western Sichuan plateau	西昌	马铃薯—水稻、冬小麦—水稻
盆地高原盆地过渡湿润气候区 Humid climate transition zone between the Sichuan Basin and the Tibetan Plateau.	雅安	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻
成都平原湿润气候区 The humid climate zone of Chengdu Plain	成都	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻、油菜—水稻
川中丘陵夏伏旱频发区 Summer drought frequently of Sichuan Hilly Area	遂宁	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻、油菜—水稻、冬小麦—玉米—大豆
川北半湿润山地丘陵过渡区 Subhumid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the North of Sichuan	平武	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻、油菜—水稻
川南中低山丘陵湿润气候区 Humid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the South of Sichuan	宜宾	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻
川东北盆地湿润山区 Moist mountainous area in Northeast of Sichuan Basin edge	巴中	冬小麦—水稻、马铃薯—水稻

2.4 降水经济效率的比较分析

降水经济效率由两方面决定,一是农产品的实际经济价值,二是生长季的降水量。
据农村统计年鉴,文中作物的单位质量主产品净产值数据如表 10 所示。

表 10 主要作物目标产品净产值/(元/kg)
Table 10 Net output of main products of major crops

	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybeans	红薯 Sweet potato	马铃薯 Potato	油菜 Rape	棉花 Cotton
净产值 Net output	1.16	0.94	1.11	2.98	0.40	0.40	2.19	11.51

表 11 显示:四川各地降水经济效率差异也很大,其变化范围为 4.7—22.9 元/(mm·hm²)。地区间比较,攀枝花由于降水少,单产不低,降水经济效率普遍高于其它地区;雅安刚好相反,降水多,光热不足,单产不高,降水经济效率普遍最低。种植制度上,总体为二熟制高于三熟制,三熟制中麦(油)—玉—豆模式高于麦(油、薯)—玉—苕模式。各种植模式间:攀枝花最高为麦—稻,麦—玉—苕最低。西昌最高为麦—玉—豆,最低为麦—玉—苕。雅安最高为麦(油)—稻和麦—玉—豆,最低为麦—玉—苕。成都最高为麦(油)—稻,最低为麦

表 11 四川省各种植制度降水经济效率表/(元·mm⁻¹·hm⁻²)
Table 11 PEE of each cropping system in Sichuan Province

种植制度 Cropping systems	典型站点 Typical station							
	攀枝花	西昌	雅安	成都	遂宁	平武	宜宾	巴中
麦—玉—苕 W-M-SP	8.0(5)	6.6(5)	4.7(5)	7.3(7)	8.4(7)	8.0(5)	6.1(5)	7.5(5)
麦—玉—豆 W-M-S	15.2(4)	13.3(1)	8.2(2)	14.8(3)	16.4(2)	13.9(4)	11.2(2)	14.2(1)
薯—玉—苕 P-M-SP	—	—	—	—	—	—	—	5.7(6)
油—玉—苕 Ra-M-SP	—	—	—	7.2(6)	8.3(8)	—	—	—
油—玉—豆 Ra-M-S	—	—	—	14.2(4)	15.7(3)	—	—	—
麦—稻 W-Ri	22.9(1)	11.7(2)	8.7(1)	16.4(1)	16.7(1)	18.0(2)	12.1(1)	12.6(2)
薯—稻 P-Ri	19.9(3)	10.2(3)	7.2(4)	13.1(5)	13.8(6)	15.1(3)	10.6(4)	9.7(4)
油—稻 Ra-Ri	20.6(2)	10.0(4)	8.2(2)	15.6(2)	15.7(3)	18.3(1)	11.1(3)	10.4(3)
油—棉 Ra-C	—	—	—	—	14.7(5)	—	—	—

* 数据为 2002—2004 年均值;表中括号内数字为当地各种植制度按降水经济效率由高到低的排列次序;W:冬小麦,M:玉米,SP:红苕,S:大豆,P:马铃薯,Ra:油菜,Ri:水稻,C:棉花

(油)一玉一苕。遂宁最高为麦(油)一稻、麦(油)一玉一豆,最低为麦(油)一玉一苕。平武油(麦)一稻最高,麦一玉一苕最低。宜宾最高为麦一稻,麦一玉一苕最低。巴中最高为麦一玉一豆和麦一稻,最低为薯一玉一苕。

表 12 为基于降水经济效率的较优种植制度。从降水经济效率看,四川多数农区仍然是水旱轮作两熟制优于旱三熟,麦(油、薯)一稻是较优的水旱轮作两熟制,而麦一玉一豆则是较优的旱三熟。

表 12 四川省各区域基于降水经济效率的种植制度优化

Table 12 Optimized cropping system based on the net output rate of precipitation of each region

区域 Region	典型站点 Typical stations	较优种植制度 Optimized cropping system
川西南山地干热河谷区 Dry-hot valley area of southwest Sichuan Province	攀枝花	冬小麦—水稻、油菜—水稻、马铃薯—水稻
川西高原安宁河平原区 Anning River plain area of the Western Sichuan plateau	西昌	冬小麦—玉米—大豆、冬小麦—水稻、马铃薯—水稻
盆西高原盆地过渡湿润气候区 Humid climate transition zone between the Sichuan Basin and the Tibetan Plateau.	雅安	冬小麦—水稻、油菜—水稻、冬小麦—玉米—大豆
成都平原湿润气候区 The humid climate zone of Chengdu Plain	成都	冬小麦—水稻、油菜—水稻、冬小麦—玉米—大豆
川中丘陵夏伏旱频发区 Summer drought frequently of Sichuan Hilly Area	遂宁	冬小麦—水稻、冬小麦—玉米—大豆、油菜—水稻、油菜—玉米—大豆
川北半湿润山地丘陵过渡区 Subhumid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the North of Sichuan	平武	油菜—水稻、冬小麦—水稻、马铃薯—水稻
川南中低山丘陵湿润气候区 Humid zone between the Mountainous and Hilly Areas in the South of Sichuan	宜宾	冬小麦—水稻、冬小麦—玉米—大豆、油菜—水稻
川东北盆周湿润山区 Moist mountainous area in Northeast of Sichuan Basin edge	巴中	冬小麦—玉米—大豆、冬小麦—水稻、油菜—水稻

3 结论与讨论

通过典型农业生态区域代表站点常见种植模式降水盈亏导致的产量降低率、产量降低率风险指数及降水利用效率、降水经济效率的比较分析,主要得出以下结论:

(1)四川省不同区域、不同种植模式、不同作物及其不同生育阶段基于降水盈亏的产量降低率多年均值差异较大。区域分布上,雅安最低,攀西最高;种植制度上,旱三熟低于水旱轮作两熟制;作物种类上,冬小麦、冬油菜、秋播马铃薯等作物产量降低率普遍高于水稻、玉米、棉花和大豆作物;生育阶段上,冬小麦、冬油菜、秋播马铃薯开花前后普遍较高,各种作物生育末期产量降低率较低。说明降水盈亏对四川各地农业生产的影响差异很大,既反映出降水时空分布严重不均,季节性旱涝灾害突出的问题,又暴露出作物需水与自然降水匹配不够良好的问题,为各地开展种植制度优化、农业旱涝历史评估、编制差异化的防灾减灾规划和农田水利建设规划提供了农业气候理论依据。

(2)基于自然降水,攀西地区遭遇旱灾的风险极大,麦一玉一苕等旱三熟的产量降低率风险指数相对较小;雅安等盆地内部多数区域麦一稻等水旱轮作两熟制略优于旱三熟。基于降水利用效率和降水经济效率,各地比较一致,较优的种植制度首先是麦(油、薯)一稻水旱轮作两熟制,其次才是麦(油)一玉一苕(豆)旱三熟。本项研究为确立攀西农区以防旱减灾为主,雅安等盆地内部农区旱涝并重的防灾减灾思想,以及优化种植制度,改良作物布局,促进农民增收提供了农业气候理论依据。

(3)兼顾旱涝灾害风险、降水利用效率和农民增收愿望,以及复杂的地形等因素,四川各农区一方面要继续加强农田水利建设,提升灌溉能力,增加保灌面积;另一方面要不断优化防灾减灾种植制度,地势较低且平坦,有较好灌溉条件的农田以麦(油、薯)一稻水旱轮作两熟制为主,而无水源保障的旱地则以麦(油)一玉一苕(豆)旱三熟为主。

研究结果与生产实际的吻合度超出了作者预期,但受多种条件限制,本研究还存在以下不足或值得进一

步商讨之处:

(1)研究方法中的部分公式和参数来自前人的研究,引用于四川地区,多数应该是适用的,但有些可能需要做本地化修正,如旱生作物的水分订正函数、表4中的土壤和气候参数等,由此会对计算结果产生一定的误差。

(2)本文仅考虑了当地自然降水对农作物生长发育的影响,忽略了江河上游来水、地下水、塘库调蓄水能力及灌溉条件等因素对作物生长发育和种植制度的影响。事实上,各地都有一定的灌溉能力,如攀西地区的种植区往往具有一定的灌溉条件,否则其产量不可能那么高,相应的降水利用效率和降水经济效率也就没有那么高。另外,自然降水不足决定了攀西地区的产量降低率及其风险指数较高,农业生产常常面临干旱威胁;而用实际产量及其单价综合分析,得出攀西地区的降水利用效率和降水经济效率反而最高,正好说明灌溉能力建设对攀西农业的重要性;同时,雅安等雨水过多的区域干旱影响小,而降水利用效率却最低,主要原因是地面径流等因素导致水资源浪费过多,以及湿害严重。

(3)作物单产和单价仅为连续3a的平均值,而且假定在多年内均未发生变化,与实际情况会有一定出入,并由此对降水经济效率的评价结果会带来一定的误差。

(4)本文对研究区域的种植制度进行了特定条件下的优化,但没有考虑农业生产成本、区域间农业气候和社会经济的比较优势以及生态效益对种植制度的影响,部分地区的种植制度与实际生产必然有一定的偏差。

References:

- [1] Zhan Z Y. China's Meteorological Disasters Ceremony (Sichuan). Beijing: China Meteorological Press, 2006: 1-3.
- [2] Zhang J. Precipitation regularity and its high-efficiency utilization techniques on Weibei highland. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(2): 28-31.
- [3] Zhu Z W, Hua Z F. Characteristics analysis of winter precipitation in north China. Hydrology, 2010, 30(4): 84-89.
- [4] Chen J J, Chen H, Ma Z G, Lin J. Characters of temporal and spatial distribution of agro-meteorological climate resources and their impacts on agricultural production in Fujian Province. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(1): 1-4.
- [5] Cui D C. Climatic resources utilization coefficient of cereal crops in China and development measures. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(2): 25-32.
- [6] Cui W H, Xin Y J, Tong Y J, Wang C J, Zhang Q H, Pan S S. The study of availability and productive capacity of precipitation in the east area of Inner Mongolia. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(5): 592-595.
- [7] Kang X Y, Ma H J. Evaluation and classification of climate productive potential in Hebei Province. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(1): 37-41.
- [8] Sun J S, Kang S Z. Present situation of water resources usage and developing countermeasures of water-saving irrigation in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(2): 1-5.
- [9] Zheng C, Wang G G, Wei C F. On optimal allocation of agricultural water in hilly regions of Sichuan Basin. Ecological Economy, 2007, (10): 247-251.
- [10] Liu C H. Research on applying technique of effectively using precipitation in dry farming. Shanxi Hydrotechnics, 2007, (1): 17-19.
- [11] Wang H L, Wang H X, Liu H J, Zhang C X. Studies on relevant issues on high efficient use of agricultural water. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2010, 8(1): 82-87.
- [12] Feng H, Zhao X N, Wu P T. Analysis on influencing factors and improving approaches of crop utilization efficiency for rainfall in farmland at the loess plateau. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(5): 30-35.
- [13] Liu G C, Yang Q F, Liu S X, Wang C B, Lin S M. Highly efficient water use mechanisms of whole plastic-film mulching and planting in catchment furrows on ridges of dry-land seed-melon. CROPS, 2010, (3): 72-77.
- [14] Gu M. China's Semi-Arid Region Agriculture High Efficient Utilization of Rainfall. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001.
- [15] Wang H L, Zhou Z X, Hu L W, Liu Z Z. Ditch planting ridge covering membrane method study of improving precipitation utilization. Chinese Journal of Agrometeorology, 1990, 11(3): 49-52.
- [16] Zhang Q P, Yang X G, Xue C Y, Yan W X, Yang J, Zhang T Y, Bauman B A M, Wang H Q. Analysis of coupling degree between crop water requirement of aerobic rice and rainfall in Beijing areas. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(10): 51-56.
- [17] Qui H H, Yang X G, Zhang X Y, Huang W H, Li M S, Li J Y. Optimized cropping systems to prevent and avoid the drought disaster based on the adaptation between precipitation and crop water requirement in Hunan province. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4257-4265.

- [18] Edit group of Huang Bingwen Collection. Huang Bingwen Collection. Beijing: Science Press, 1993: 184-187.
- [19] Deng X R. Climate Resources in General. Wuhan: Huazhong Normal University Press, 1995: 104-107.
- [20] Cao W X. Crop Cultivation General. Beijing: Science Press, 2006: 108-153.
- [21] Cun X Q, Yang Y, Xie S Q, Ren Z J. Productivity analysis of different sweet potato varieties. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(3): 94-96.
- [22] He X Y, Liao Y P, Chen Z M, Chen S J. Effect of harvest index in rice breeding for high yield. Seed, 1999, (6): 39-41.
- [23] Li X M, Yang W F, Gao B, Fu W M. Study and application of the operational meteorology and agriculture drought indexes in China. Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition, 2007, 35(7): 111-116.
- [24] Zhang F C, Zhu Z H. Harvest Index for various crops in China. Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23(2): 83-87.
- [25] Yuan W Z, Guan C Y, Liao A L. Contribution of harvest index to seed yield of rapeseed. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 1998, 22(1): 65-69.
- [26] Wu W H. Plant Physiology. Beijing: Science Press, 2003: 371-371.
- [27] Huo Z G, Zhang Y C, Li Q S. A study on climatic productivities of crops in hilly and mountainous areas in the east of subtropics of China. Journal of Academy of Meteorology Science, 1989, 4(3): 300-310.
- [28] Dasta N G. Effective Rainfall Irrigation in Agriculture. Rome: FAO, 1974: 1-31.
- [29] Huang C Y. Agrology. Beijing: China Agricultural University Press, 2000: 74-101.
- [30] 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.
- [31] Zhang H, Wu C. The agricultural economic benefit evaluation indexes. Commercial Times, 2007, (22): 88-96.

参考文献:

- [1] 詹兆渝. 中国气象灾害大典(四川卷). 北京: 气象出版社, 2006: 1-3.
- [2] 张静. 渭北旱塬降水规律及其高效利用的技术选择. 水土保持通报, 2000, 20(2): 28-31.
- [3] 朱志伟, 花振飞. 华北地区冬季降水时空分布特征分析. 水文, 2010, 30(4): 84-89.
- [4] 陈家金, 陈惠, 马治国, 林晶. 福建农业气候资源时空分布特征及其对农业生产的影响. 中国农业气象, 2007, 28(1): 1-4.
- [5] 崔读昌. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径. 中国农业气象, 2001, 22(2): 25-32.
- [6] 崔文华, 辛亚军, 佟艳菊, 王崇军, 张清华, 潘双山. 内蒙古东部区主要作物降水利用率与生产潜力研究. 土壤通报, 2004, 35(5): 592-595.
- [7] 康西言, 马辉杰. 河北省气候生产潜力的估算与区划. 中国农业气象, 2008, 29(1): 37-41.
- [8] 孙景生, 康绍忠. 我国水资源利用现状与节水灌溉发展对策. 农业工程学报, 2000, 16(2): 1-5.
- [9] 郑畅, 王改改, 魏朝富. 四川盆地丘陵区农业用水优化配置研究. 生态经济, 2007, (10): 247-251.
- [10] 刘春晖. 旱地农业降水高效利用技术应用研究. 山西水利科技, 2007, (1): 17-19.
- [11] 王海龙, 王会肖, 刘海军, 张传霞. 农业水资源高效利用的若干问题研究. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 82-87.
- [12] 冯浩, 赵西宁, 吴普特. 黄土区农田作物降水利用效率影响因素及提高途径分析. 中国农业科技导报, 2007, 9(5): 30-35.
- [13] 刘广才, 杨祁峰, 刘生学, 王彩斌, 林淑敏. 旱地籽瓜全膜覆盖垄上沟播技术的降水利用效率. 作物杂志, 2010, (3): 72-77.
- [14] 谷茂著. 中国半干旱区降水的农业高效利用. 北京: 中国农业科技出版社, 2001.
- [15] 王华兰, 周志香, 胡良温, 刘占贞. 沟植垄盖(膜)法提高降水利用率的研究. 中国农业气象, 1990, 11(3): 49-52.
- [16] 张秋平, 杨晓光, 薛昌颖, 闫伟兄, 杨婕, 张天一, Bauman B A M, 王化琪. 北京地区旱稻作物需水与降水的耦合分析. 农业工程学报, 2007, 23(10): 51-56.
- [17] 曲辉辉, 杨晓光, 张晓煜, 黄晚华, 李茂松, 李金云. 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. 生态学报, 2010, 30(16): 4257-4265.
- [18] 《黄秉维文集》编辑小组. 自然地理综合工作六十年·黄秉维文集. 北京: 科学出版社, 1993: 184-187.
- [19] 邓先瑞. 气候资源概论. 武汉: 华中师范大学出版社, 1995: 104-107.
- [20] 曹卫星. 作物栽培学总论. 北京: 科学出版社, 2006: 108-153.
- [21] 寸湘琴, 杨燕, 谢世清, 任自江. 不同甘薯品种的生产力分析. 中国农学通报, 2004, 20(3): 94-96.
- [22] 何秀英, 廖耀平, 陈钊明, 陈顺佳. 收获指数在水稻高产育种中的作用. 种子, 1999, (6): 39-41.
- [23] 李星敏, 杨文峰, 高蓓, 付万明. 气象与农业业务化干旱指标的研究与应用现状. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 111-116.
- [24] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83-87.
- [25] 袁葵洲, 官春云, 廖爱玲. 油菜收获指数对经济产量的贡献. 湖南师范大学自然科学学报, 1998, 22(1): 65-69.
- [26] 武维华. 植物生理学. 北京: 科学出版社, 2003: 371-371.
- [27] 霍治国, 张养才, 李全胜. 亚热带东部丘陵山区作物气候生产力研究. 气象科学研究院院刊, 1989, 4(3): 300-310.
- [28] 达斯塔内 N G. 灌溉农业中的有效雨量. 罗马: 联合国粮食及农业组织, 1974: 1-31.
- [29] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 74-101.
- [30] 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.
- [31] 张华, 吴超. 农业经济效益评价指标探讨. 商业时代, 2007, (22): 88-96.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元