

# 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布

雷宏军<sup>1</sup>, 乔姗姗<sup>1</sup>, 潘红卫<sup>1\*</sup>, 商崇菊<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450045; 2. 贵州省水利科学研究院防灾减灾所, 贵阳 550002)

**摘要:** 农业用水需求时空分布规律可为区域抗旱减灾管理和灌溉水资源优化配置提供科学依据。基于贵州省及其周边国家气象站点长系列资料和 1953—2012 年贵州省 9 个市(州)水稻、玉米、冬小麦、油菜和烤烟的种植面积, 计算贵州省 9 市(州)近 60 a 净灌溉需水量及灌溉需求指数, 分析其时空分布特征。结果表明: 1) 贵州省的净灌溉需水量和灌溉需求指数分别在 314.48~742.57 mm 和 0.34~0.68 之间, 60 a 间农业净灌溉需水量的和灌溉需求指数呈波动变化, 多峰值分布的特征, 总体上峰值有所减小但波动周期延长; 2) 1993—2000 年是净灌溉需水量和灌溉需求指数总体变化的转折时期, 之前为下降期, 之后为上升期; 3) 净灌溉需水量和灌溉需求指数的季节特征明显, 分别为夏季和冬季最高; 4) 净灌溉需水量(IR)呈现东高西低的规律, 灌溉需求指数(IRI)呈现东部、西北部高, 西南部低的规律, 全省 9 市(州)可分为 3 个风险区, 东部、西北部的缺水高风险区是抗旱管理的重点区域; 5) 气候变化是贵州省净灌溉需水量和灌溉需求指数升高的主导因素, 它主要通过降水减少来实现的。研究可为贵州省农业季节性缺水问题识别、农业水利工程布局 and 种植结构调整提供支撑。

**关键词:** 灌溉; 降水; 蒸发; 需水量; 需求指数; 贵州省; 时空分布规律

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.017

中图分类号: S274.4; TV212.5<sup>+</sup>4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0115-07

雷宏军, 乔姗姗, 潘红卫, 商崇菊. 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 115—121. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.017 <http://www.tcsae.org>

Lei Hongjun, Qiao Shanshan, Pan Hongwei, Shang Chongju. Temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 115—121. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.017 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

农业是目前世界上最大的水资源消耗行业, 使用了全球 70% 的水资源, 在低收入国家则达 82%<sup>[1-2]</sup>。随着人口增长、现代化农业生产方式所占比例减少、以及饮食结构改变, 这一比例呈现增加趋势<sup>[2-3]</sup>。联合国粮农组织(United Nations Food and Agriculture Organization, FAO) 2003 年发布的一份报告显示, 为了满足粮食供应需求, 在现有用水效率基础上, 到 2030 年发展中国家灌溉用水预计将增长 14%<sup>[4]</sup>。这无疑是对世界农业灌溉和粮食生产提出了挑战。中国是发展中国家, 也是农业大国, 农业灌溉用水短缺问题也十分严峻, 一方面, 中国水资源先天不足, 亩均水资源量为 1 440 m<sup>3</sup>, 仅占世界平均水平的 1/2<sup>[5]</sup>。另一方面, 在全球气候变化背景下, 中国的气候变暖, 作物生长季的潜在蒸散量增加, 导致土壤水分的有效性下降, 从而增加农业的灌溉需水量, 农业水资源

供需矛盾加剧<sup>[6-7]</sup>。贵州省是一个水资源量丰沛的地区, 多年平均降水量 1 146 mm, 地表水资源量 1 062 亿 m<sup>3</sup>。2012 年, 全省水资源总量 974.02 亿 m<sup>3</sup>, 供水量 91.52 亿 m<sup>3</sup>; 其中, 地表水供水量 88.75 亿 m<sup>3</sup>, 约占总供水量的 97%。在地表水供水中, 蓄、引、提工程分别供水 29.29 亿 m<sup>3</sup>、34.93 亿 m<sup>3</sup>、12.19 亿 m<sup>3</sup>, 非工程供水量 12.35 亿 m<sup>3</sup>。2012 年, 全省常用耕地面积 1 754.90 km<sup>2</sup>, 有效灌溉面积 1 317.59 km<sup>2</sup>, 年内农田实际灌溉面积 759.51 km<sup>2</sup>, 农田灌溉用水量 47.95 亿 m<sup>3</sup>, 占当年总用水量的 52.4%, 综合灌溉定额 6316 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。贵州喀斯特地貌发育强烈, 地表径流与地下径流交换频繁, 耕地土层较薄且蓄水保墒能力较差, 作物极易受旱<sup>[8]</sup>。其中, 2009—2010 年的连旱, 导致贵州 1/3 以上的耕地缺乏及时有效的灌溉, 引起严重的农业减产和绝收<sup>[9-10]</sup>。缓解贵州省农业缺水问题的核心之一是破解农业季节性缺水问题。贵州省农业需水时空分布规律是识别农业季节性缺水的时空特征、进行种植结构科学调整和农业水利工程建设规划的基础。因此, 开展贵州农业需水时空分布规律研究十分紧迫和必要。

目前, 国内对农业需水方面的研究主要集中在北方地区, 涉及西南地区的相关研究较少<sup>[11-12]</sup>。已有研究在空间上多以站点为中心, 较少以市(州)为单元开展研究<sup>[13]</sup>。多数研究者分析了不同作物生育期内的作物需水量, 但在确定灌溉需水量变化趋势及时空分布时, 较少考虑作物种植结构的差异和动态变化<sup>[14-15]</sup>。Chen 等<sup>[16]</sup>

收稿日期: 2015-10-26 修订日期: 2016-04-21

基金项目: NSFC-河南联合基金项目(U1504512); 水利部公益性行业科研专项(201301039)

作者简介: 雷宏军, 男, 湖北大冶人, 博士, 副教授, 2014 年赴澳大利亚中央昆士兰大学研修, 主要从事节水灌溉理论与技术及水资源高效利用研究。郑州 华北水利水电大学水利学院, 450045。Email: hj\_lei2002@163.com  
\*通信作者: 潘红卫, 男, 河南南阳人, 博士, 讲师, 主要从事环境水利和区域水资源高效利用研究。郑州 华北水利水电大学水利学院, 450045。Email: phw103@163.com

在研究 2000s 中国水资源可持续发展的问题时,以县区为单位在日尺度上开展了供需水研究,涉及农业需水量时考虑了各县区不同作物种植结构和需水特性,较为准确地反映出农作物在其生育周期内的实际需水量。但由于其研究为全国尺度,研究目标不限于农业需水量,故在资料精度方面有待提高。本文在上述研究基础上,针对上述问题,兼顾市(州)之间的空间差异性、农作物种植结构的动态变化,以种植结构为出发点,搜集到更详细的相关资料研究贵州省农业灌溉需水时空规律,以期对当地水资源的优化配置和农业灌溉管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

贵州省是中国西南五省之一,位于副热带东亚大陆季风区,属中国亚热带高原季风气候,主要农作物为水稻、玉米、油菜、小麦、烤烟等。基本气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心资料室提供的气象观测站 1951—2012 年间的逐日资料,从中选取具有连续观测数据系列(1953—2012 年)且在贵州省四领点范围内站点实际观测资料,累计 48 个站点(见图 1),观测的气象资料包括降水、最高气温、最低气温、平均气温、日照时数、风速、相对湿度等气象要素以及经纬度和高程。

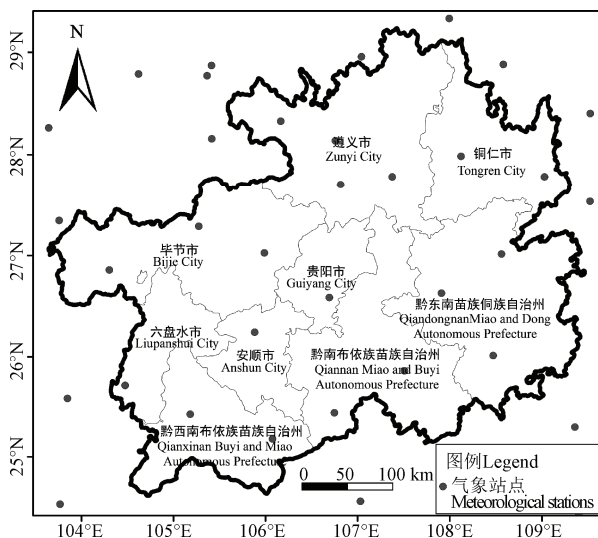


图 1 贵州省行政区划和气象站点分布图

Fig.1 Administrative divisions and meteorological stations around Guizhou Province

其次是根据贵州省灌溉试验中心站修文灌溉试验基地、重点站榕江站、重点站金沙站、重点站兴义站的试验数据提供的主要农作物水稻、玉米、油菜、小麦、烤烟的灌溉试验资料,拟定作物系数。最后是利用贵州省、各市(州)1953—2012 年统计年鉴,获取了历年各市(州)的主要农作物种植面积、农作物产量等资料。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 有效降水量

有效降水量是指全年或季节性总降雨量中为作物生产直接或间接利用及用作农田其他必须耗用的水量。它

包括作物截留的雨水、作物植株蒸腾和株间土壤蒸发(水田为株间水面蒸发)的降水、淋洗和水田渗漏等有助于作物生长和耕作作业的那部分降水。

市(州)降水量是根据 48 个国家气象站资料,利用 ARGIS 软件空间分析功能,进行泰森多边形插值得到区域上的降雨量数值。采用经验公式计算市(州)的月有效降水量  $P_e$  为

$$P_e = \alpha \cdot P. \quad (1)$$

式中  $P$  为计算时段降水总量, mm;  $\alpha$  为计算时段降水有效利用系数。根据蒋太明对贵州省典型区降水有效接纳量的研究成果<sup>[17]</sup>,得到次降水有效利用系数与次降雨量  $P'$  的关系,计算逐日有效降水量,统计得到月有效降水量,并计算获得月尺度降水有效利用系数。公式如下

$$\alpha = \begin{cases} 0 & P' < 7\text{mm} \\ -0.00006 P'^2 + 0.00683 P' + 0.43337 + \frac{3.95328}{P'} & 7\text{mm} \leq P' \leq 102\text{mm} \\ \frac{55.01}{P'} & P' > 102\text{mm} \end{cases} \quad (2)$$

#### 1.2.2 作物需水量

采用作物系数法计算作物需水量。根据贵州省水利科学研究院提供的全省范围物候图,结合贵州省灌溉试验站提供的节水灌溉试验资料确定各作物生育阶段的作物系数,见表 1。研究表明,彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式计算的参考作物腾发量(reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ )在西南地区具有较好的适用性<sup>[18]</sup>,本文采用此法计算。

表 1 贵州省主要作物的作物系数  $K_c$

Table 1 Crop coefficients  $K_c$  of main crops in Guizhou Province

作物 Crop	生育期 Growth stage	日期 Date	$K_c$	作物 Crop	生育期 Growth stage	日期 Date	$K_c$
水稻 Rice	返青期	06-01—06-18	1.06	玉米 Maize	苗期	04-12—05-27	0.63
	分蘖期	06-19—07-27	1.12		拔节期	05-28—07-08	1.22
	拔节孕穗期	07-28—08-17	1.16		抽雄期	07-09—08-06	0.90
	抽穗开花期	08-18—08-29	1.66		灌浆期	08-07—09-12	0.61
小麦 Wheat	乳熟期	08-30—09-13	1.57	油菜籽 Rapeseed	苗期	10-10—01-18	0.65
	黄熟期	09-14—09-30	1.33		蕾期	01-19—02-23	1.12
	播种分蘖期	11-03—12-12	0.55		花期	02-24—04-03	1.05
	越冬期	12-13—01-15	0.84		成熟期	04-04—05-20	0.51
烤烟 Tobacco	返青期	01-16—02-07	0.97	烤烟 Tobacco	缓苗期	05-20—05-27	0.97
	拔节期	02-08—03-15	1.02		伸根期	05-28—06-21	0.82
	抽穗期	03-16—04-12	1.05		现蕾期	06-22—07-21	1.13
	成熟期	04-13—05-28	0.46		成熟期	07-22—09-21	0.98

#### 1.2.3 净灌溉需水量及灌溉需求指数

中国的农业用水是指灌溉和农村牲畜用水,其中灌溉用水约占 90%以上<sup>[19]</sup>,因此确定净灌溉需水量非常重要。将作物需水量和有效降雨量的差值定义为净灌溉需水量  $IR$ ,将净灌溉需水量与作物需水量的比值定义为灌溉需求指数  $IRI$ <sup>[20-21]</sup>,以反映作物生长对灌溉的依赖程度。

$$IR = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m IR_{ij} \cdot M_{ij} / \sum_{i=1}^m M_{ij} \right), \quad (3)$$

$$IR_{ij} = \begin{cases} K_{cij} \cdot ET_{0j} - P_{ej} & K_{cij} \cdot ET_{0j} > P_{ej} \\ 0 & K_{cij} \cdot ET_{0j} \leq P_{ej} \end{cases}, \quad (4)$$

$$IRI = \frac{IR}{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m (K_{cij} \cdot ET_{0j} \cdot M_{ij}) / \sum_{i=1}^m M_{ij} \right)} \quad (5)$$

式中 IR 表示 1a 中  $n$  个计算时段 ( $n$  的取值按作物生育阶段划分) 的累计净灌溉需水量, mm;  $K_{cij}$  表示种植的第  $i$  种作物第  $j$  个计算时段的作物系数;  $ET_{0j}$  表示第  $j$  个计算时段的潜在蒸散量, mm;  $M_{ij}$  表示第  $i$  种作物第  $j$  个计算时段的种植面积,  $\text{km}^2$ ;  $IR_{ij}$  表示第  $i$  种作物第  $j$  个计算时段的净灌溉需水量, mm;  $P_{ej}$  表示第  $j$  个计算时段的有效降水量, mm; IRI 表示  $n$  个计算时段的累计灌溉需求指数。

灌溉需求指数的物理意义是表征区域的作物相对缺水程度, 能够体现缺水风险水平; 净灌溉需水量的物理意义是表示区域的作物绝对缺水量, 是区域灌区规划和水资源配置的依据。利用式 (3) ~ (5) 可计算出贵州省各市 (州) 以月为时间尺度的作物净灌溉需水量及灌溉需求指数。

2 结果与分析

2.1 农业灌溉需水变化规律

2.1.1 时间变化规律

利用上述方法, 计算出贵州省的 9 个市 (州) 及全区 1953—2012 年的净灌溉需水量和灌溉需求指数。贵州全省灌溉需求指数分布在 0.34~0.68 之间, 多年平均为 0.46 (图 2), 这与刘钰等<sup>[13]</sup>给出的云贵地区主要作物平均灌溉需求指数<0.5 的结论基本一致。全省灌溉需求指数峰值分别出现在 1962 年、1966 年、1972 年等, 与净灌溉需水量分布具有协同性, 这与历史农业灾情记录<sup>[9,16]</sup>相吻合的。全省净灌溉需水量在 314.48~742.57 mm 之

间, 随时间呈现波动起伏的变化特征, 这种变化形成了多个峰, 总体上峰值波动周期为 10 a 左右, 但随着时间的推移, 峰值有所减小, 但波动周期有所延长。1993—2000 年为转折时期, 此前农业净灌溉需水量呈降低趋势, 此后呈持续回升态势。贵州省灌溉需求指数的变化与净灌溉需水量的变化曲线相似, 也呈现波动起伏、年际变化较大、先降后升的特征, 这表明, 贵州省灌溉需求指数受净灌溉需水量的影响较大。

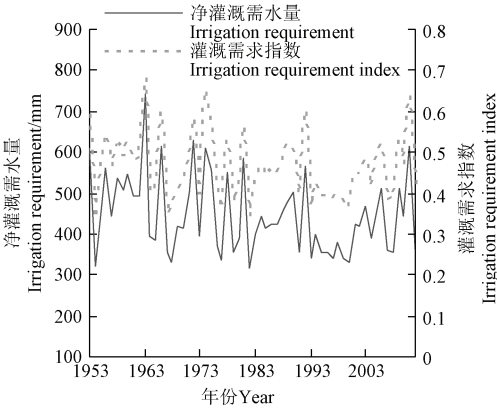


图 2 贵州省 1953—2012 年净灌溉需水量和灌溉需求指数的年际变化曲线

Fig.2 Change in irrigation requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province from 1953 to 2012

Man-Kendall 非参数趋势检验结果表明, 1953—2012 年贵州省多数市 (州) 灌溉需水变化具有多个突变点, 如 1968、1982、1993、2000 年等。从表 2 中贵州省各市 (州) 不同时段净灌溉需水量和灌溉需求指数的变化可以看出, 与其他时期相比, 1993—2002 年净灌溉需水量和灌溉需求指数的平均值骤然减少, 这与 Man-Kendall 非参数趋势检验结果一致, 与前述分析的 1993—2000 年是转折时期一致。

表 2 贵州省 1953—2012 年农业净灌溉需水量和灌溉需求指数年际平均值

Table 2 Interannual average of irrigation requirement IR and irrigation requirement index IRI in Guizhou Province from 1953 to 2012

地点 Site	1953—1962 年		1963—1972 年		1973—1982 年		1983—1992 年		1993—2002 年		2003—2012 年	
	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI
贵阳市 Guiyang	491.3	0.49	473.2	0.48	417.2	0.46	420.9	0.47	361.5	0.40	452.9	0.50
六盘水 Liupanshui	448.2	0.46	426.6	0.44	402.8	0.43	392.5	0.43	339.9	0.38	399.3	0.44
遵义市 Zunyi	461.6	0.48	470.1	0.49	426.4	0.46	416.2	0.47	365.8	0.42	447.3	0.50
安顺市 Anshun	483.1	0.48	430.0	0.44	413.0	0.43	414.4	0.45	375.8	0.39	446.8	0.46
毕节市 Bijie	465.1	0.50	480.7	0.51	424.4	0.48	439.4	0.52	360.4	0.44	440.2	0.52
铜仁市 Tongren	534.0	0.51	507.3	0.49	480.6	0.48	506.5	0.50	372.8	0.39	433.6	0.46
黔西南州 Qianxinan	492.5	0.48	436.5	0.44	432.6	0.44	426.4	0.44	350.6	0.37	418.1	0.44
黔东南州 Qian dongnan	625.6	0.53	569.5	0.49	554.8	0.50	562.3	0.51	425.0	0.40	525.3	0.49
黔南州 Qiannan	520.9	0.48	494.4	0.46	466.1	0.46	450.5	0.45	367.6	0.38	453.2	0.46
贵州省 Guizhou province	497.2	0.49	477.7	0.48	445.7	0.46	445.2	0.48	370.5	0.40	450.8	0.48

表 3 是贵州省各市 (州) 净灌溉需水量和灌溉需求指数的季节平均值。净灌溉需水量夏季最高, 占全年净灌溉需水量的 27%~59%, 其他季节较为接近; 灌溉需求指数冬季最高, 是其他季节的 1.0~3.6 倍。这是由于尽

管冬季灌溉净需水量低, 但有效降水量相对更少。因此, 夏季是贵州省农业灌溉需水的高峰期, 但冬季相对缺水率最高, 从农业水安全的角度来讲, 灌溉净需水的作用更大, 因此贵州省夏季农业缺水风险最大。



表3 贵州省1953—2012年农业净灌溉需水量和灌溉需求指数季节平均值

Table 3 Seasonal average of irrigation requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province from 1953 to 2012

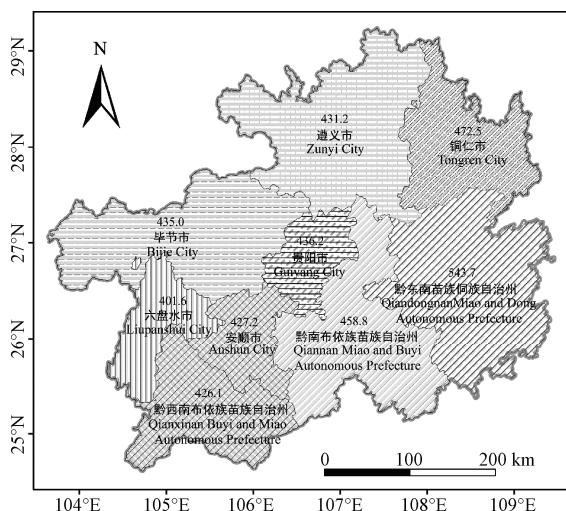
地点 Site	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI	IR/mm	IRI
贵阳市 Guiyang	87.9	0.44	198.6	0.40	67.4	0.48	82.3	0.84
六盘水市 Liupanshu	137.3	0.57	108.9	0.24	43.1	0.38	112.2	0.87
遵义市 Zunyi	67.7	0.38	231.0	0.45	65.3	0.46	67.3	0.84
安顺市 Anshun	110.1	0.50	151.7	0.31	70.7	0.49	94.8	0.87
毕节市 Bijie	129.7	0.61	158.5	0.35	44.6	0.43	102.2	0.94
铜仁市 Tongren	46.0	0.26	277.7	0.49	95.4	0.55	53.4	0.64
黔西南州 Qianxinan	133.4	0.54	123.3	0.26	54.3	0.42	115.1	0.87
黔东南州 Qiangdongnan	55.1	0.28	286.2	0.48	137.2	0.64	65.2	0.64
黔南州 Qiannan	80.0	0.38	197.8	0.37	98.2	0.57	82.7	0.76
贵州省 Guizhou	94.1	0.45	192.6	0.38	75.1	0.51	86.1	0.82

注：春季指3—5月；夏季指6—8月；秋季指9—11月；冬季指12—2月。

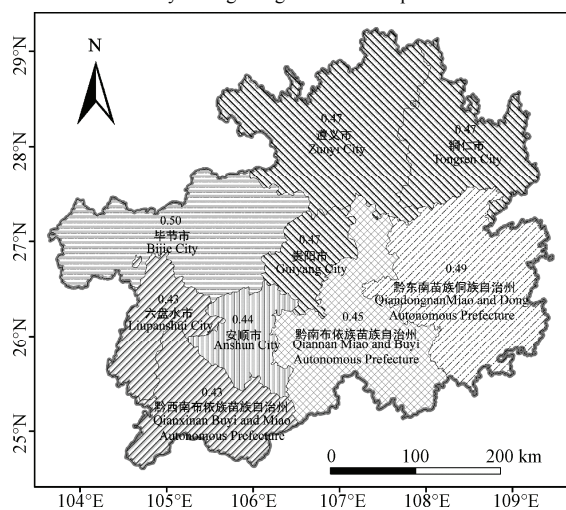
Note: Spring, summer, autumn, and winter means duration from March to May, June to August, September to November, and December to February.

### 2.1.2 空间变化规律

图3a给出了贵州省多年平均净灌溉需水量。各市(州)比较来看,净灌溉需水量呈东高西低的规律。贵州省灌溉需求指数(见图3b)呈现东部和西北部高,西南低的变化规律。



a. 多年平均净灌溉需水量 (单位: mm)  
a. Yearly average irrigation water requirement



b. 多年平均灌溉需求指数  
b. Yearly average irrigation requirement index

图3 贵州省1953—2012年多年平均净灌溉需水量和灌溉需求指数空间分布

Fig.3 Distribution of yearly average irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province from 1953 to 2012

各市(州)中,黔东南州的多年平均净灌溉需水量最高,超过了500 mm;而毕节市的多年平均灌溉需求指数值最大,达0.50,也就是说,毕节市对灌溉水的多年平均需求占全生育需水量的50%。根据净灌溉需水量和灌溉需求指数的分布规律,全省9个市(州)可以分为3个组:铜仁市、毕节市、黔东南州为一组,为干旱缺水风险较高区;六盘水市、黔西南州和安顺市为一组,为干旱缺水风险较低区;其他市(州)为一组,为干旱缺水风险一般区。此分组结果对贵州省抗旱规划和灌溉工程建设具有一定的指导意义。东部和西北部的缺水高风险区应作为抗旱管理的重点区域。

## 2.2 影响因素分析

### 2.2.1 自然因素

降水和蒸发是影响作物水分供耗的2个重要自然因素。图4给出了有效降水量和作物需水量变化趋势。1953—2012年贵州全省范围内有效降水量呈波动起伏但总体下降趋势;作物需水量也呈波动起伏的变化趋势,从1953到2012年,作物需水量有一定的减少趋势,但与有效降水量相比,变化幅度相对较小。这表明,贵州省近60 a降水变化明显,在气候变化因素中降水比蒸散发更显著。

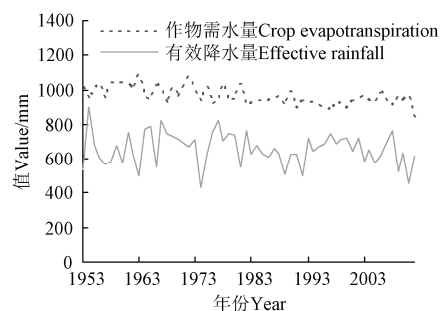
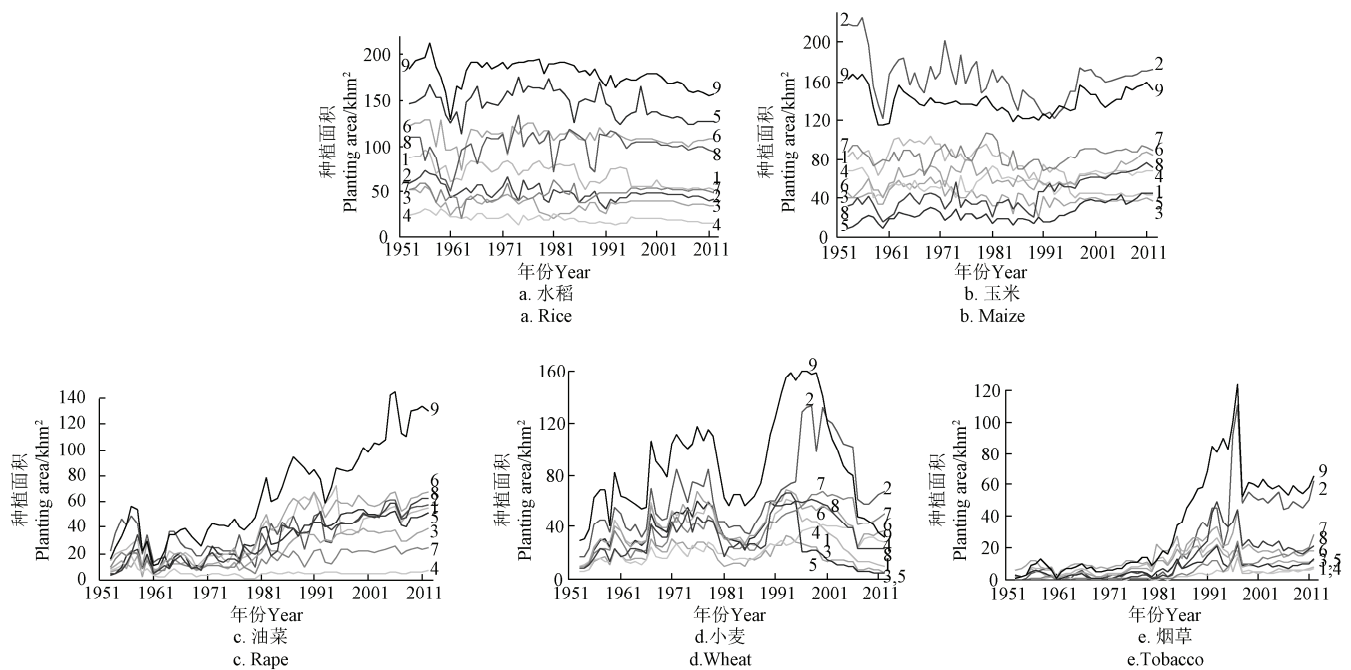


图4 贵州省1953—2012年有效降水量和作物需水量变化  
Fig.4 Change in effective rainfall and crop evapotranspiration in Guizhou Province from 1953 to 2012

### 2.2.2 人类活动

种植面积是影响区域净灌溉需水的重要人类活动因子。图5给出了近60 a贵州省5种主要作物种植面积的变化曲线。可以看出,水稻、玉米的种植面积较为稳定,没有出现种植面积的突然增加或减少;小麦、油菜、烤烟的种植面积变化较为显著,在过去的60 a间,小麦种植面积的变化呈现了3个明显的峰,分别位于1970s初、1980s初和1990s初。



注：1 安顺市，2 毕节市，3 贵阳市，4 六盘水市，5 黔东南州，6 黔南州，7 黔西南州，8 铜仁市，9 遵义市。  
Note: 1 Anshun, 2 Bijie, 3 Guiyang, 4 Liupanshui, 5 Qiandongnan, 6 Qiannan, 7 Qianxinan, 8 Tongren and 9 Zunyi City.

图 5 1953—2012 年贵州省主要作物种植面积变化曲线  
Fig.5 Cropping areas dynamics of main crops in Guizhou Province from 1953 to 2012

油菜的种植面积呈持续增加趋势，且增长较为明显；烤烟从 1980s 初期到 1990s 末种植面积增长迅速，此后相对稳定。由于水稻-玉米和小麦-油菜的种植面积相当，这表明过去 60 a 人类活动对种植面积的影响不容忽视。

2.2.3 相关性分析

为进一步分析贵州省灌溉需水变化的影响因素，对净灌溉需水量、灌溉需求指数分别与上述影响因素进行相关分析，相关系数结果列于表 4。

表 4 贵州省 1953—2012 年年作物需水量、有效降水量与净灌溉需水量、灌溉需求指数的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of yearly effective rainfall, crop evapotranspiration, irrigation requirement and irrigation requirement index from 1953 to 2012 in Guizhou Province

参数 Parameter	作物需水量 Crop evapotranspiration	有效降水量 Effective rainfall
净灌溉需水量 Irrigation requirement IR	0.667**	-0.529**
灌溉需求指数 Irrigation requirement index IRI	0.368**	-0.749**

注：\*\*表示极显著相关。  
Note: \*\* indicates extremely significant correlation.

净灌溉需水量、灌溉需求指数与有效降水量和作物需水量均呈极显著相关关系（表 4）。其中，净灌溉需水量与有效降水量之间呈负相关，与作物需水量呈正相关，灌溉需求指数与有效降水量的相关系数大于灌溉需求指数与作物需水量的相关系数，这表明有效降水量和作物需水量二者都是灌溉需求指数变化的重要影响因素，但有效降水量对灌溉需求指数的影响更大，这是由于作物需水量要远大于降水量，是影响净灌溉需水量一定时期稳定性的主因子，而有效降水量是气候变化的主要体现，

是净灌溉需水量不同阶段动态变化的主因子，因而两者均与净灌溉需水量呈极显著相关关系。而净灌溉需水量是作物需水量与有效降水量之差，由于作物需水量远高于有效降水量，因此，净灌溉需水量主要受作物需水量影响的，二者的相关性也就更高。

另外，作物需水量是潜在蒸发量和作物系数二者的综合表征，由于作物种植比例变动导致的全作物系数变化较小，因此潜在蒸发量对净灌溉需水量具有重要影响，而潜在蒸发量是气象因素作用的结果。上述分析表明，影响贵州省净灌溉需水量变化的决定性因素是气候变化。种植面积与净灌溉需水量和灌溉需求指数之间无显著相关性，这可能是由于 1953—2012 年作物蒸腾蒸发相对较为稳定（见图 4），降水变化较为剧烈。因此，净灌溉需水量和灌溉需求指数主要是降水和作物蒸腾蒸发作用的结果，故作物种植面积的变化影响很小。

3 讨论

本研究中净灌溉需水量用单位水深表示，可反映出无灌溉情况下不同地区单位种植面积的缺水率；相应地，灌溉需求指数可以理解为这种情况下的缺水率，这 2 个指标的主要意义在于能够较好地揭示降水与作物需水之间的适应性关系以及缺水风险，在评价结果表明适应性较差、风险较高时，可提出相应的水资源管理策略，如实施严格水资源管理办法，减少高耗水作物的种植面积，建设和完善农业水利工程等措施。从本研究的结果来看，贵州省的这种适应性存在空间差异，因此，对于贵州全省农业水管理是有现实指导意义的。水稻、玉米、油菜、小麦、烤烟的多年（1953—2012 年）平均作物需水量与

净灌溉需水量分别为 738.1、482.4、367.4、347.9、450.4 mm 和 362.2、142.4、208.4、213.1、102.6 mm。因此,水稻生育阶段灌溉需水量更高。从季节性缺水情况的角度来讲,贵州省水稻的缺水风险较高,是农业水管理的重点。在实际农业水资源管理中,通常要比较区域的需水量和可供水量,本研究中贵州省农业净灌溉需水量(以 mm 计)波动起伏但基本稳定(见图 2),作物种植面积的不断增长必然导致灌溉需水规模(以万  $\text{m}^3$  计)的持续增长,在这种情况下,贵州省农业对灌溉可供水量的需求是增加的。在气候变化和中国农业用水分配下降的背景下,如何做到农业水资源的合理利用显得尤为重要<sup>[22]</sup>。本文研究结果有助于指导贵州省农业水资源合理调配、农业水利工程建设和科学的抗旱减灾策略的制定。然而贵州省地貌种类较多,地势复杂,降雨量及光热资源存在空间差异,对空间变异性及周期性变化分析相对不足。此外,作物需水量影响因素还有下垫面,灌溉条件等,因此在今后的研究需进行深入探讨。

#### 4 结 论

1) 从 1953 年到 2012 年,贵州省各市(州)净灌溉需水量和灌溉需求指数呈现波动起伏的变化特征,总体上峰值有所减小但持续时间延长。

2) 1993—2000 年是净灌溉需水量和灌溉需求指数变化的转折期,之前为下降期,之后为上升期。

3) 贵州省各市(州)净灌溉需水量和灌溉需求指数分别是夏季和冬季最高,夏季净灌溉需水量占全年的 27%~59%,冬季灌溉需水指数是其他季节的 1.0~3.6 倍。

4) 贵州省净灌溉需水量呈东高西低的规律,灌溉需求指数则为东部和西北部高,西南部低的特点。贵州省可分为 3 个风险区,其中,东部和西北部地区作物需水与降水的适应性较差,缺水风险高,是抗旱减灾管理的重点区域,一方面可调整种植结构,同时可利用山区特点建设蓄水塘坝工程,缓解工程性缺水问题,同时做好抗旱预案。

5) 气候变化是影响贵州省净灌溉需水量和灌溉需求指数的主要因素,其中降水是气候变化的主导因素,在降水减少的贵州北部地区,可通过区域水资源调配的方式合理利用南部地区丰沛的水资源。

#### 【参 考 文 献】

- [1] Ding Y, Tang D, Dai H, et al. Human-water harmony index: A new approach to assess the human water relationship[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(4): 1061—1077.
- [2] 张励, 卢光盛. “水外交”视角下的中国和湄公河国家跨界水资源合作[J]. *东南亚研究*, 2015, 1: 42—50.
- [3] Kapitza S P. The statistical theory of global population growth[J]. *Formal Descriptions of Developing Systems*, 2003, 121: 11—35.
- [4] Kahsay G A, Hansen L G. The effect of climate change and adaptation policy on agricultural production in Eastern Africa[J]. *Ecological Economics*, 2016, 121: 54—64.
- [5] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. *中国科学院院刊*, 2012, 3: 352—358.  
Wang Hao, Wang Jianhua. Sustainable utilization of China's

- water resources[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 3: 352—358. (in Chinese with English abstract)
- [6] Ojekunle Z O, Oyebamji F F, Olatunde A O, et al. Global climate change: The empirical study of the sensitivity model in China's sustainable development, part 2[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2015, 37(8): 861—869.
- [7] Saadia S, Todorovica M, Tanasijevica L, et al. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 103—115.
- [8] 任明强, 张家德, 卢正艳, 等. 贵州省喀斯特与非喀斯特农业生态地质环境质量对比研究[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 397—401.  
Ren Mingqiang, Zhang Jiade, Lu Zhengyan, et al. Contrastive studies on agro-ecological environment quality between karst and non-karst area in Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 397—401. (in Chinese with English abstract)
- [9] 贵州省人民政府防汛抗旱指挥部办公室, 贵州省水利科学研究院. 贵州省 2009—2010 年特大干旱灾害及抗旱工作评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.
- [10] 贵州省统计局, 贵州省调查总队. 贵州统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [11] 马琳, 杨艳敏, 杨永辉, 等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. *遥感学报*, 2011, 15(2): 324—339.  
Ma Lin, Yang Yanmin, Yang Yonghui, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(2): 324—339. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 155—159.  
Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Hao Weiping. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(10): 155—159. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 6—12.  
Liu Yu, Wang Lin, Ni Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(12): 6—12. (in Chinese with English abstract)
- [14] 符娜, 刘小刚, 张岩, 等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J]. *生态学杂志*, 2004, 33(7): 1895—1901.  
Fu Na, Liu Xiaogang, Zhang Yan, et al. Variation pattern of rice irrigation water requirement in Southwest of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 33(7): 1895—1901. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙璐, 高晓丽, 刘明, 等. 贵州夏玉米生育期内降水与需水量空间分布研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015(5): 14—22.  
Sun Lu, Gao Xiaoli, Liu Ming, et al. Spatial characteristics of precipitation and water requirement of summer corn in Guizhou Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(5): 4—22. (in Chinese with English abstract)
- [16] Chen X, Naresh D, Upmanu L, et al. China's water sustainability in the 21st century: A climate-informed water risk assessment covering multi-sector water demands[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18: 1653—1662.
- [17] 蒋太明. 贵州喀斯特山区黄壤水分动态及其影响因素[D]. 重庆: 西南大学, 2007.  
Jiang Taiming. Moisture Dynamic in Yellow Soil and its

- Environmental Factors in Karst Mountainous Areas of Guizhou Province[D]. Chongqing: Southwest University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [18] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近 50a 中国西南地区地表干湿状况研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104—116. Su Xiucheng, Wang Lei, Li Qilin, et al. Study of surface dry and wet conditions in southwest china in recent 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 104—116. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王道龙, 罗旭. 建设中国节水高效农业的战略对策[J]. 中国人口. 资源与环境, 2001, 11(3): 31—35. Wang Daolong, Luo Xu. Strategies on development of efficient agriculture with saving water in China[J]. China Population Resources and Environment, 2001, 11(3): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 98—105.
- Liu Yuchun, Jiang Hong'an, Li Cundong, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 98—105. (in Chinese with English abstract)
- [21] 严登华, 袁喆, 杨志勇, 等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 34—41. Yan Denghua, Yuan Zhe, Yang Zhiyong, et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River Basin[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 34—41. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李保国, 黄峰. 1998—2007 年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575—583. Li Baoguo, Huang Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 575—583. (in Chinese with English abstract)

## Temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province

Lei Hongjun<sup>1</sup>, Qiao Shanshan<sup>1</sup>, Pan Hongwei<sup>1\*</sup>, Shang Chongju<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Center for Disaster Prevention and Mitigation, Water Resources Research Institute of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Temporal and spatial distribution characteristics of agricultural water requirement are of great significance to the management of regional drought prevention, mitigation and optimal allocation of irrigation water. Guizhou is a typical region suffering from droughts all around the year and seasonal water shortage of agriculture limits the sustainable agricultural development. In order to investigate the temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province, in this study, the effective precipitation (Pe), the crop evapo-transpiration (ETc) of rice, maize, winter wheat, oilseed rape and tobacco in different growth stages were estimated by using effective precipitation coefficient, FAO Penman-Monteith equation and crop coefficient method based on the meteorological and statistical data of planting crops area between 1953 and 2012 in Guizhou Province. The annual net agricultural irrigation water requirement (IR) and irrigation requirement index (IRI) were statistically analyzed. Results showed that IR and IRI in the 9 cities of Guizhou province were in the range of 314.48-742.57 mm and 0.34-0.68, respectively. During the last 6 decades, IR and IRI had shown fluctuation characteristics with multi peaks distribution. The peak value demonstrated a decrease trend with the prolonged fluctuation period. The temporal turning stage of IR and IRI was between 1993 and 2000. Before that stage, IR and IRI declined. IR and IRI showed seasonal characteristics of the highest IR in summer and highest IRI in winter. IR showed high value in the East and low value in the West district, while the high value of IRI was in the East and Northwest district, but the low value was in the Southwest district of Guizhou Province. 9 cities could be divided into three risk regions, and the high risk in water shortage lied in the East and Northwest district, which was the focus of regional drought management. The construction of water pond project and the drought resistance plans should be made and carried out to alleviate the problem of engineering water shortage in these regions. The increments of IR and IRI were mainly attributed to the climate change, especially to the change of precipitation. The results of crop evapotranspiration (ETc) showed that the mean ETc of rice, maize, oilseed, winter wheat rape, and tobacco were 738.1, 482.4, 367.4, 347.9, and 450.4 mm, respectively. And the IR showed that the mean IR of rice, maize, oilseed, winter wheat rape, and tobacco were 362.2, 142.4, 208.4, 213.1, and 102.6 mm, respectively. Regional water resources transferred from the southern area to the northern side could be carried out to improve the basic conditions of regional agriculture production. This study can provide support for the identification of seasonal water shortage in Guizhou Province, the layout of agricultural water conservancy project, and the adjustment of planting structure and cropping pattern.

**Keywords:** irrigation; precipitation; evaporation; water requirement; requirement index; Guizhou Province; spatial and temporal distribution characteristics