

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.09.003

张凤怡,迟道才,陈涛涛.辽宁主要粮食作物生长季需水与降水耦合度分析[J].中国农业气象,2021,42(9):746-760

## 辽宁主要粮食作物生长季需水与降水耦合度分析\*

张凤怡, 迟道才, 陈涛涛\*\*

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 以辽宁省 1957–2017 年逐日气象数据和研究区作物系数为基础, 基于 SIMETAW 模型计算和分析辽宁主要粮食作物 (春玉米、大豆和水稻) 需水规律和降水对作物需水的满足程度, 以揭示气候变化对该区域粮食作物需水的影响, 探究自然降水对主要粮食作物需水的满足程度及其时空变化特征。结果表明: 辽宁春玉米、大豆和水稻全生长季需水量多年平均值分别为 511.8mm、509.4mm 和 605.1mm, 均呈不显著下降趋势。春玉米和大豆全生长季需水与降水耦合度多年平均值分别为 0.821 和 0.814, 即降水分别满足了 82.1% 和 81.4% 的需水量, 欠缺的 17.9% 和 18.6% 仍需播前灌溉或补灌, 尤其在西部地区耦合度大于 0.8 的保证率仅为 28.2% 和 21.1%。水稻全生长季耦合度为 0.464, 耦合度大于 0.4 的保证率全省仅为 69.1%, 西部地区保证率低至 36.8%。辽宁 4 个分区中, 3 种作物均在东部地区耦合度最大, 中部、南部和西部次之。3 种作物各生长阶段耦合度呈现生长中期最高, 快速生长期次之, 初期和成熟期普遍最低。春玉米和大豆生长初期需水与降水耦合度近年来显著上升, 3 种作物成熟期耦合度则呈显著下降趋势。辽宁省主要粮食作物均需注意春旱和秋旱的发生, 及时补充灌溉。在目前降水条件下, 辽宁省最适宜种植春玉米, 尤其水资源匮乏的西部地区, 根据实际情况可适当扩大春玉米种植规模。大豆最适宜在辽宁东部和中部地区种植, 水稻在东部和南部地区种植最为适宜。

**关键词:** 辽宁; 粮食作物; SIMETAW 模型; 作物需水量; 需水与降水耦合度

## Assessment of Coupling Degree between Water Requirement of Main Cereal Crops and Precipitation in Growing Season in Liaoning Province

ZHANG Feng-yi, CHI Dao-cai, CHEN Tao-tao

(College of Water Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** The purpose of this research is to provide a basis for the efficient utilization of water resources and the promotion of agricultural water suitable development in Liaoning province. Based on the daily meteorological data of Liaoning province from 1957 to 2017 and crop coefficients in the study area, the water demand rules of major grain crops (spring maize, soybean and rice) and the degree of water demand satisfied by precipitation were calculated and analyzed based on the SIMETAW model. The results showed that: (1) the annual mean water requirements of spring maize, soybean and rice in the whole growing season in Liaoning were 511.8mm, 509.4mm and 605.1mm, respectively, showing an insignificant decreasing trend. (2) The coupling degree of water demand and precipitation in the whole growing season of spring maize and soybean were 0.821 and 0.814, respectively, that is to say, precipitation satisfied 82.1% and 81.4% water demand respectively, and the remaining 17.9% and 18.6% still needed irrigation or supplementary irrigation before sowing. Especially in the western region, the guaranteed rate of

\* 收稿日期: 2021-01-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51709173); 辽宁省高校创新团队 (LT2017014); 辽宁省自然科学基金 (2019-MS-277)

\*\* 通讯作者: 陈涛涛, 副教授, 主要从事水肥调控与高效利用研究, E-mail: taotao-chen@syau.edu.cn

第一作者联系方式: 张凤怡, E-mail: zhangfy939@126.com

coupling degree was only 28.2% and 21.1% when the coupling degree was greater than 0.8. The coupling degree of rice in the whole growing season was 0.464, the guaranteed rate of coupling degree greater than 0.4 was only 69.1% in the whole province, and the guaranteed rate was as low as 36.8% in the western region. (3) In the four subregions of Liaoning, the coupling degree of the three crops was the largest in the eastern region, followed by the central, southern and western regions. The coupling degree of the three crops in each growth stage was the highest in the middle growth stage, followed by the rapid growth stage, and the lowest in the early and mature stages. In recent years, the coupling degree of spring maize and soybean at the early growth stage increased significantly, while the coupling degree of the three crops at the mature stage showed a significant downward trend. The occurrence of spring drought and autumn drought should be paid attention to and irrigation should be supplemented in time for the main grain crops in Liaoning province. Under the current precipitation conditions, it was the most suitable for planting spring maize in Liaoning province, especially in the western region where water resources were scarce, and soybean was most suitable for planting in the eastern and central areas of Liaoning province, while rice was most suitable for planting in the eastern and southern areas of Liaoning province.

**Key words:** Liaoning province; Grain crops; SIMETAW model; Crop water requirement; Coupling degree between water requirement and precipitation

农业用水占社会总用水量的比重近年来有所下降,但农业仍排用水行业首位<sup>[1]</sup>,需要严格控制农业用水总量,以水定农业生产规模、以水定种植结构、以水定产量,推动农业适水发展,更好地为国家农业生态优先、绿色优先的战略布局服务。IPCC 第五次评估报告指出,与 1986–2005 年相比,2016–2035 年全球地表平均温度将上升 0.3~0.7℃<sup>[2]</sup>,这将显著改变水资源的供给,影响作物生长和耗水模式<sup>[3]</sup>。水分是作物生长发育的重要环境因素之一,对区域农业用水的评价,要考虑不同作物对水分的需求和需水规律。

作物需水与降水耦合度是指单位时间(某一生长阶段)内,有效降水对作物需水的满足程度<sup>[4]</sup>。近年来,国内利用该指标在不同时间尺度上对不同作物不同地区进行了大量研究,并取得丰富成果。据崔日鲜等<sup>[5]</sup>报道,山东植棉区棉花在播种期和吐絮成熟期需水与降水耦合度普遍较低,播种期、苗期和吐絮成熟期耦合度在多数站点趋于减少趋势;聂堂哲等<sup>[6]</sup>研究发现,黑龙江水稻生育期内需水与降水耦合度总体呈减小趋势,而不适宜水稻种植的西部地区耦合度为增加趋势;张婷等<sup>[7]</sup>研究指出,华北和东北地区晚播燕麦的耦合度高于早播燕麦,适当晚播能使燕麦充分利用自然降雨。对不同作物需水与降水耦合度的评价已成为关注区域农业适水发展的重要内容,但目前主要以单一作物为研究对象,对同一区域多种粮食作物对比研究的报道鲜有。此外,

辽宁主要粮食作物生长季内降水与需水匹配情况及其时空演变规律尚未知,尤其辽宁省是中国粮食增产潜力较大的地区之一,也是气候变化较敏感的地区,加之研究区降水时空分布不均、干旱等气象灾害发生频率和程度日益加强<sup>[8]</sup>,区域气候变化所带来的影响严重威胁着大田作物生长,因此,有必要对辽宁主要粮食作物需水与降水耦合规律展开深入研究。

SIMETAW (Simulation of ET of Applied Water) 模型是在 Penman-Monteith 公式的基础上结合作物数据库来模拟作物蒸散量<sup>[9]</sup>。模型能够根据作物资料、气候数据和土地利用类别,提供给区域内每个分区农田逐日、逐季、逐年的水平衡估计<sup>[10]</sup>。国内外许多学者对该模型进行了不同地区的适应性检验<sup>[11–13]</sup>。前人已进一步利用 SIMETAW 模型在华北平原对夏玉米、冬小麦和棉花等作物需水量进行了时空演变规律研究<sup>[14–16]</sup>。因此,本研究利用 SIMETAW 模型对辽宁主要粮食作物需水及其与降水耦合规律进行研究,以期揭示气候变化对该区域粮食作物需水的影响,探明当地自然降水资源对主要粮食作物需水的满足程度及其时空变化特征,为调整本区域农业种植结构,充分利用天然降水,推动适水农业发展及农业绿色高效节水提供参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 区域划分

辽宁省位于中国东北地区南部,全省耕地面积

409.29 万  $\text{hm}^2$ , 占全省土地总面积的 27.65% (2016 年), 其中大部分分布在中部平原和西部低山丘陵的河谷地带。辽宁省是典型的温带大陆性季风气候, 年均降水量为 400~1000mm, 主要集中在夏季, 占全年总降水量的 60%~75%, 春、秋季雨少风大, 容易引发干旱, 其中春旱占辽宁干旱发生总数的 70% 以上<sup>[17]</sup>。根据辽宁省水文地貌综合特征, 将研究区 33 个站点划分为 4 个子区域, 即中部平原区 (10 个站点)、东部山区 (7 个站点)、西部干旱区 (8 个站点) 和南部丘陵区 (8 个站点), 分别简称中部、东部、西部和南部地区。具体站点分布情况以及辽宁分区如图 1 所示。

## 1.2 SIMETAW 模型输入资料和输出参数

### 1.2.1 输入资料

利用 SIMETAW 模型计算辽宁 3 种主要粮食

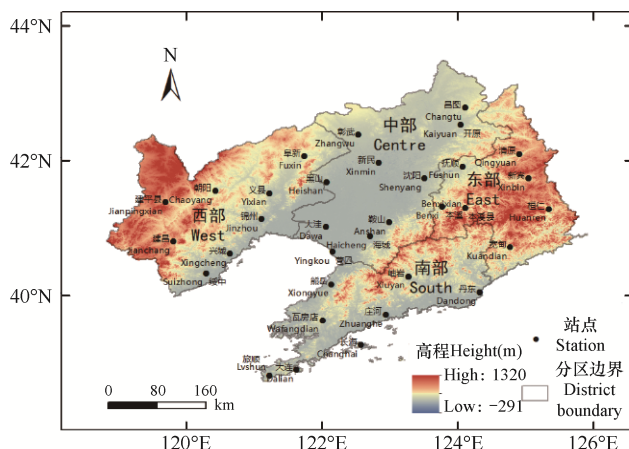


图 1 辽宁省气象站点及 DEM 分布图

Fig. 1 The spatial distribution map of the meteorological stations and DEM in Liaoning province

作物 (春玉米、大豆和水稻) 的需水量, 模型需要输入气象数据和作物数据。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<https://data.cma.cn/>) 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0), 主要收集了辽宁省 33 个气象站点 (1957–2017 年) 61a 逐日气象数据, 包含日照时数、风速、相对湿度、日降水量、最低气温、最高气温、平均气温、平均气压等资料。各气象站点的基本资料包括站点经度、纬度和高程等。

作物数据包括播种日期、收获日期、作物不同生长阶段划分信息和作物系数等。各主要粮食作物占辽宁粮食作物播种面积百分比以及生长季起止时间统计结果见表 1。其中, 水稻生长季日期不包括秧田期。调查发现, 同一作物的生长季时间在辽宁 4 个分区差异较小, 故同一作物采取相同的生长季起止日期。

根据田间调查资料, 按照 FAO-56 中划分作物 4 个生长阶段的方法<sup>[18]</sup>, 将模型内各生长阶段天数进行调整。修正后 3 种作物各个生长阶段经历天数如表 2 所示。SIMETAW 模型将作物整个生长过程分为 4 个阶段, 即生长初期、快速生长期、生长中期和成熟期, 将各阶段作物系数 ( $K_c$ ) 随生长时间线性连接, 得到各作物初期、中期和成熟期的  $K_{ci}$  即生育期内作物系数变化过程<sup>[12]</sup>。春玉米和大豆  $K_c$  使用文献[19–20]中实测数据替换模型中对大多数作物提供的 FAO 标准作物系数。水稻各阶段作物系数 ( $K_c$ ) 结合团队在辽宁地区水稻需水相关试验的研究结果<sup>[21–22]</sup>, 修正后 3 种作物  $K_c$  值如表 3 所示。

表 1 辽宁省主要粮食作物播种面积占比及其生长季 (播种–收获) 时间表

Table 1 The proportion of sown area of main grain crops and their growing season (sowing-harvest) schedule in Liaoning province

作物 Crop	面积占比 Area percent(%)	生长季起–止日期 (月–日) Start-end date of growth season(mm-dd)	生长季天数 Days of growth season(d)
春玉米 Spring maize	78.3	04–25–09–15	144
大豆 Soybean	2.1	05–01–09–15	138
水稻 Rice	13.9	05–24–09–25	125

注: 各作物占辽宁粮食作物种植总面积百分比均来自国家统计局 2016–2018 年统计数据, 取 3a 平均值; 生长季起–止日期资料来自文献[20]。

Note: The percentage of each crop in the total cultivated area of grain crops in Liaoning was obtained from the statistical data of National Bureau of Statistics from 2016 to 2018, and the average value of the three years was taken; Data of the starting and ending dates of the growth period were obtained from the literature[20].

表 2 辽宁省主要粮食作物各生长阶段天数(d)

Table 2 Days of each growth stage of main grain crops in Liaoning province(d)				
作物	生长初期	快速生长期	生长中期	成熟期
Crop	Early growth	Rapid growth	Middle growth	Mature
春玉米 Spring maize	29	48	43	24
大豆 Soybean	22	33	61	22
水稻 Rice	25	34	45	21

表 3 辽宁省主要粮食作物不同生长阶段的作物系数(K<sub>c</sub>)

Table 3 The crop coefficients(K <sub>c</sub> ) of major grain crops at different growth stages in Liaoning province				
作物	分区	K <sub>c</sub>		
		生长初期 Early growth	生长中期 Middle growth	成熟期 Mature
春玉米 Spring maize	中部 Centre	0.486	1.086	0.739
	西部 West	0.457	1.119	0.814
	南部 South	0.744	1.183	0.776
	东部 East	0.736	1.165	0.739
大豆 Soybean	中部 Centre	0.463	1.035	0.730
	西部 West	0.554	1.084	0.886
	南部 South	0.678	1.125	0.900
	东部 East	0.686	1.165	0.920
水稻 Rice	中部 Centre	0.900	1.470	1.100
	西部 West	0.900	1.470	1.100
	南部 South	0.972	1.540	0.800
	东部 East	0.972	1.540	0.800

1.2.2 输出参数

模型采用单作物系数法计算作物需水量 (ET<sub>c</sub>), 计算式为

ET<sub>c</sub>= K<sub>c</sub>·ET<sub>0</sub> (1)

式中, ET<sub>c</sub>为日作物需水量 (mm); K<sub>c</sub>为作物系数; ET<sub>0</sub>为日参考作物蒸散量, 按 Penman-Monteith 公式计算<sup>[23]</sup>。

1.3 有效降水量

有效降水量 (E<sub>r</sub>) 的计算式为

E<sub>r</sub>=α·P (2)

式中, P 为降水量 (mm); α 为降水入渗系数, 当一次降水量<5mm 时, α 为 0; 当一次降水量在 5~50mm 时, α 约为 0.9; 当一次降水量>50mm 时, α 为 0.8<sup>[24]</sup>。

1.4 需水与降水耦合度

第 i 时段内的作物需水与降水的耦合度 λ<sub>i</sub> 为<sup>[6]</sup>

λ<sub>i</sub> = { Er\_i / ET\_ci    Er\_i < Er\_ci  
1            Er\_i ≥ Er\_ci } (3)

式中, 为第 i 时段内作物需水与降水的耦合度, 无量纲; Er<sub>i</sub> 为第 i 时段内的有效降水量 (mm); ET<sub>ci</sub> 为第 i 时段作物需水量 (mm)。计算水稻需水与降水的耦合度时, 用总耗水量代替作物需水量, 即作物需水量和渗漏损失之和<sup>[25]</sup>。

全生育期作物需水与降水的耦合度 λ 为各生育阶段耦合度 λ<sub>i</sub> 以需水模数 (ET<sub>ci</sub>/ET<sub>c</sub>) 为权重的加权平均值, 计算式为

λ = ∑\_{i=1}^n (ET\_ci / ET\_c) λ\_i (4)

式中, n 为生育阶段总数; ET<sub>c</sub> 为全生育期需水量 (mm)。

## 1.5 数据分析方法

运用 Mann-Kendall 非参数检验统计法(简称 M-K 检验法)<sup>[26]</sup>, 对辽宁 33 个气象站点 1957–2017 年各作物需水相关指标进行变化趋势分析和显著性检验, 选定 95%置信度判别各指标的时间变化趋势是否通过显著性检验。利用 ArcGIS 10.4 中的 Ordinary Kriging 插值法<sup>[27]</sup>对各站点要素数据进行空间插值, 分析各指标的空间变化特征。选取辽宁 33 个气象站近 61a 春玉米、大豆和水稻生长季的需水与降水耦合度数据, 进行频率计算, 绘制不同分区各作物的皮尔逊III型概率分布曲线, 最后求得不同耦合度所对应的保证率, 保证率用百分数表示, 其值可反映某个时段内某一气象要素低于(或高于)某一数值的可能性大小。运用 R3.5.2 进行数据处理和绘图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要粮食作物生长季需水量 ( $ET_c$ ) 分析

#### 2.1.1 全省生长季作物需水特征

1957–2017 年辽宁省春玉米、大豆和水稻逐年生长季作物需水量 ( $ET_c$ ) 的结果表明, 3 种作物全生

长季  $ET_c$  多年平均值分别为 511.8mm、509.4mm 和 605.1mm。3 种作物全生长季  $ET_c$  均表现为下降, 但趋势不显著。春玉米、大豆和水稻 4 个生长阶段作物需水量模拟结果如表 4。由表可见, 3 种作物生长初期  $ET_c$  多年平均值分别为 74.2mm、56.8mm 和 107.2mm, 快速生长期分别为 183.8mm、126.5mm 和 172.8mm, 生长中期分别为 185.6mm、262.2mm 和 247.9mm, 成熟期分别为 75.7mm、70.3mm 和 77.0mm。总体来看, 3 种作物各生长阶段需水量, 在生长中期最大, 快速生长期次之, 春玉米成熟期  $ET_c$  与生长初期基本接近, 大豆成熟期  $ET_c$  大于生长初期, 水稻反之, 3 种作物生长中期需水量均最大, 此时, 正处于作物生长旺盛期, 同时也是水分敏感期, 应注意满足各作物的实际需水要求。M–K 趋势检验结果(表 4)表明, 在生长初期, 春玉米和大豆的需水量均呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ ), 倾向率分别为  $-1.9\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$  和  $-1.59\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 生长初期需水量的减少会在一定程度上缓解粮食作物生长初期的用水压力。

表 4 主要粮食作物生长季内作物需水量及其时间序列倾向率

Table 4 Crop water requirement ( $ET_c$ ) and the tendency rate in the time series in the growing season of main grain crops

作物 Crop	生长阶段 Growth stage	作物需水量 $ET_c(\text{mm})$	倾向率( $\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) Tendency rate of $ET_c(\text{mm}\cdot 10\text{y}^{-1})$
春玉米 Spring maize	生长初期 Early growth stage	74.2	$-1.90^*$
	快速生长期 Rapid growth stage	183.8	-1.12
	生长中期 Middle growth stage	185.6	-0.19
	成熟期 Maturity stage	75.7	-0.05
	全生长季 Whole growing season	511.8	-3.30
大豆 Soybean	生长初期 Early growth stage	56.8	$-1.59^*$
	快速生长期 Rapid growth stage	126.5	-0.94
	生长中期 Middle growth stage	262.2	-1.40
	成熟期 Maturity stage	70.3	0.07
	全生长季 Whole growing season	509.4	-2.29
水稻 Rice	生长初期 Early growth stage	107.2	-0.44
	快速生长期 Rapid growth stage	172.8	-1.93
	生长中期 Middle growth stage	247.9	0.09
	成熟期 Maturity stage	77.0	-0.02
	全生长季 Whole growing season	605.1	-3.78

注: \*表示通过  $P<0.05$  统计显著水平。下同。

Note: \* indicates the statistical significance level by  $P<0.05$ . The same as below.

2.1.2 各分区生长季作物需水特征

主要粮食作物全生长季  $ET_c$  的空间分布见图 2。由图可见，春玉米生长季需水量 530.0mm 以上的区域集中于南部分区，西部均值为 513.0mm，中部均值为 506.0mm，东部均值相对其他分区最小 (491.7mm)。大豆和水稻需水量空间分布与春玉米存在一定差异，大豆和水稻  $ET_c$  在西部分区均值最高，分别为 536.5mm 和 651.7mm，低值区主要分布在东部，分别为 488.0mm 和 544.9mm。总体来看，各粮食作物主要表现为西部地区和南部沿海地区需水量较高，东部最低。

春玉米各生长阶段  $ET_c$  空间分布特征与全生长季有所不同。由图 3 可知，生长初期和快速生长期的春玉米  $ET_c$  高值均集中在南部分区，多年平均值分别为

85.7mm 和 189.4mm，生长初期的低值主要分布在西部，为 62.9mm，快速生长期低值区在东部，为 176.2mm；生长中期和成熟期的春玉米  $ET_c$  空间分布规律较为接近，呈现由东向西逐渐递增的分布特征，高值集中在西部，分别为 191.4mm 和 80.3mm，低值主要分布在东部，分别为 176.0mm 和 66.3mm。整体上看，各个生长阶段春玉米需水量区域之间具有明显差异，4 个生长阶段的春玉米  $ET_c$  空间分布特征不尽相同。

大豆不同生长阶段需水量的空间分布规律存在一定差异。通过图 4 可知，生长初期的大豆  $ET_c$  空间分布呈现由中部向四周递增的规律，在南部分区数值较高，多年平均值为 60.6mm，低值区主要分布在中部地区，为 48.5mm；快速生长期，高值在西部分区，为 131.8mm，低值在东部地区，为 119.4mm；

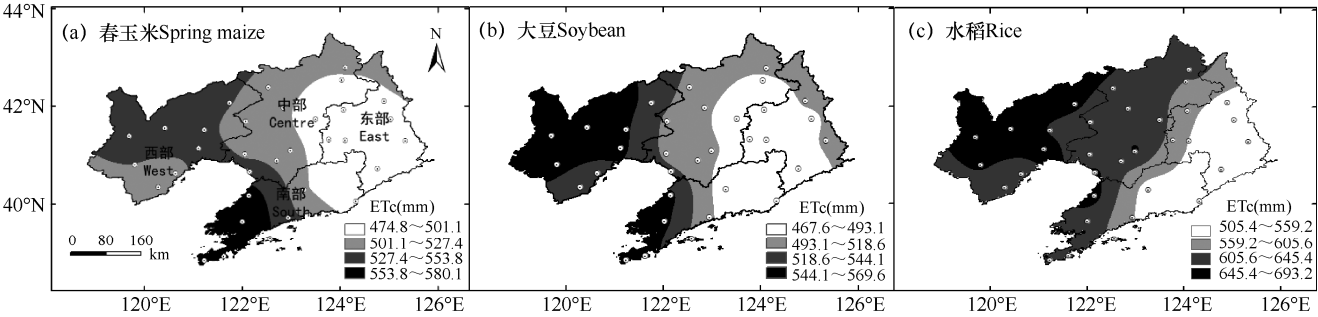


图 2 辽宁春玉米、大豆和水稻全生长季需水量的空间变化

Fig. 2 Spatial variations of  $ET_c$  of spring maize, soybean and rice in whole growing period in Liaoning province

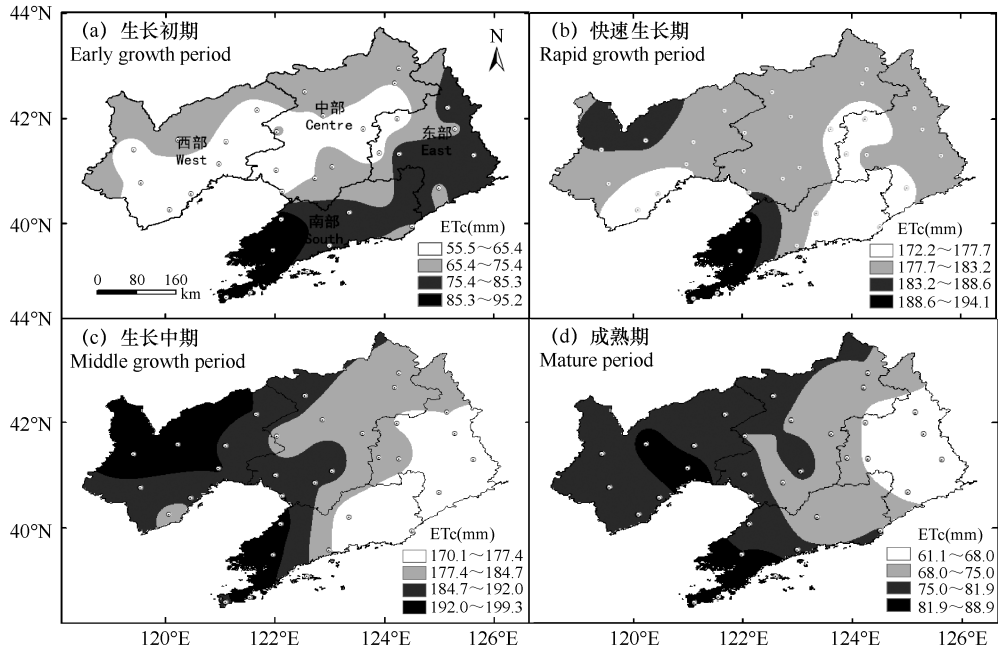


图 3 辽宁春玉米各生长阶段作物需水量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of  $ET_c$  in each growth stage of spring maize in Liaoning province

生长中期大豆  $ET_c$  空间分布特征为由东南向西北逐渐递增, 高值分布在西部地区, 为 271.6mm, 低值区主要出现在东部, 为 253.0mm; 成熟期的大豆  $ET_c$  空间分布特征为由东北向西南逐渐递增, 高值主要在南部, 为 75.6mm, 低值区主要出现在东部, 为

63.2mm。由上可知, 各个生长阶段大豆需水量区域之间具有较大差异, 4 个生长阶段高值区域主要分布在西、南部地区, 低值主要在中、东部区域。

水稻 4 个生长阶段需水量的空间分布规律与全生长季的分布规律较为相似, 由图 5 可知, 生长初

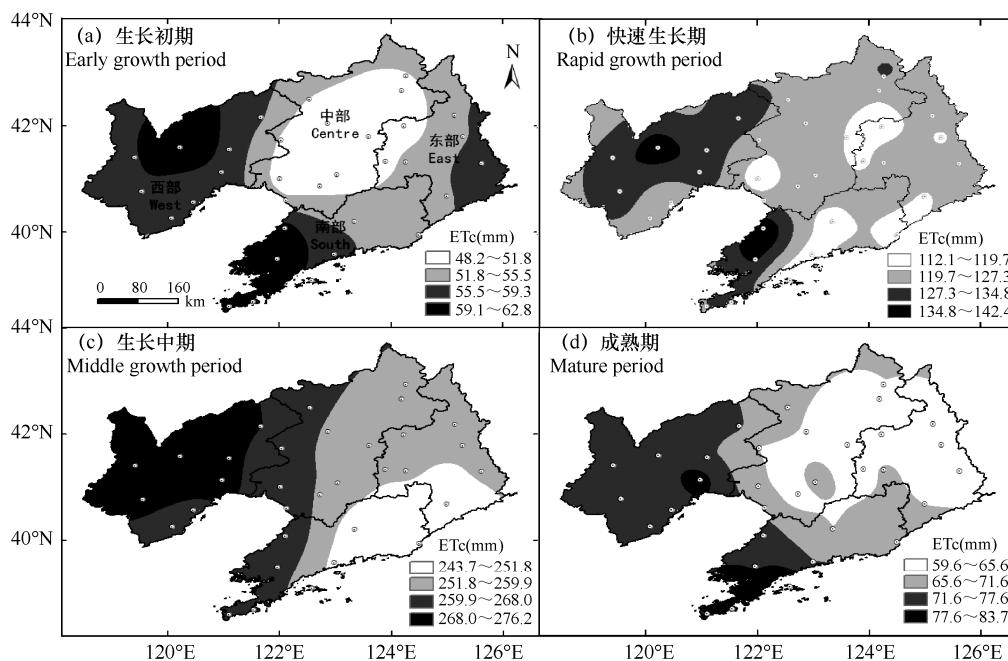


图 4 辽宁大豆各生长阶段作物需水量空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of  $ET_c$  in each growth stage of soybean in Liaoning province

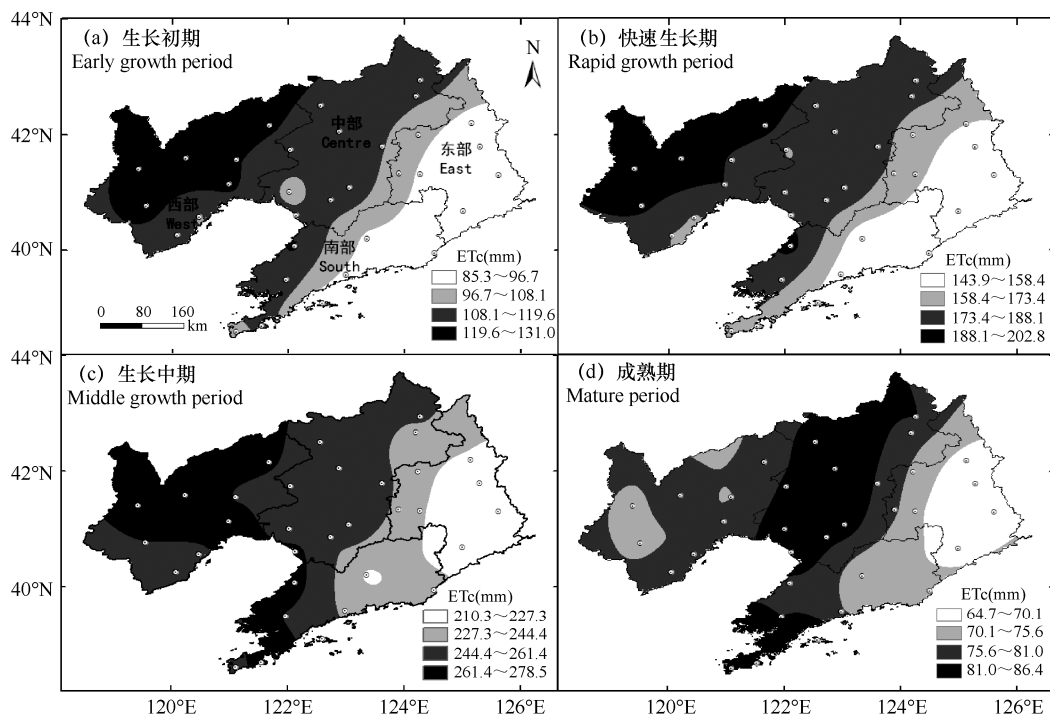


图 5 辽宁水稻各生长阶段作物需水量空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of  $ET_c$  in each growth stage of rice in Liaoning province

期、快速生长期和生长中期水稻  $ET_c$  空间分布呈现由东向西逐渐增加的规律, 西部分区即高值集中区, 多年平均值分别为 120.0mm、188.4mm 和 264.8mm, 东部分区即低值集中区的多年平均值分别为 93.7mm、158.4mm 和 224.9mm; 成熟期水稻  $ET_c$  的空间分布与其他 3 个生长阶段的特征不同, 呈现由东向西先增加后逐渐减少的特征, 高值主要在中部地区, 平均为 84.0mm, 低值区在东部地区, 平均为 69.5mm。整体可见, 水稻需水量不同生长阶段区域分布有一定差异, 但 4 个阶段之间空间分布特征差异不大。

## 2.2 主要粮食作物生长季需水与降水的耦合分析

### 2.2.1 全生长季需水与降水耦合度分析

从整个辽宁省范围看, 春玉米、大豆和水稻全生长季需水与降水耦合度 ( $\lambda$ ) 的多年平均值分别为 0.821、0.814 和 0.464, 春玉米最高, 其次为大豆, 水稻的降水耦合度最低 (图 6)。3 种作物  $\lambda$  均呈不显著的下降趋势。从历年耦合度情况看, 春玉米全生长季  $\lambda$  有 14a (占比 23%) 为 1,  $\lambda \geq 0.8$  的年份占比为 57.4%, 大豆全生长季  $\lambda$  有 13a (占比 21.3%) 为 1,  $\lambda \geq 0.8$  的年份占比达 52.5%, 水稻全生长季  $\lambda \geq 0.6$  的年份占比为 13.1%。因此, 从全生长季需水与降水耦合的角度看, 整个辽宁省种植春玉米的需水满足度最高, 其次为大豆, 水稻最低。

辽宁 4 个分区 3 种作物耦合度情况见表 5。由表可见, 春玉米、大豆和水稻全生长季均为东部地区  $\lambda$

多年平均值最大, 分别为 0.974、0.966 和 0.544, 即东部降水对各粮食作物需水的满足程度最高, 中部、南部次之, 西部耦合度值最低 (0.690、0.650 和 0.378)。可见, 东部地区主要粮食作物充分利用当地降水的节水潜力很大, 西部则最小。

### 2.2.2 全生长季需水与降水耦合度不同分区概率分布

不同耦合度所对应的保证率及其地域差异, 可以说明辽宁 3 种粮食作物不同水平耦合度出现的可靠程度。由表 5 可见, 春玉米和大豆全生育期  $\lambda \geq 0.4$  的保证率在不同分区间差异较小, 均大于 91%, 即辽宁地区春玉米和大豆出现耦合度小于 0.4 的概率较小; 春玉米和大豆  $\lambda \geq 0.6$  的保证率低值均在西部地区, 分别为 66.2% 和 57.44%, 高值均在东部地区, 分别为 100% 和 99.93%; 春玉米和大豆  $\lambda \geq 0.8$  的保证率不同分区间差异较大, 其中, 最高值均在东部地区, 分别为 96% 和 88.23%, 其他 3 个分区保证率均低于 55%。水稻多年平均  $\lambda$  为 0.464, 全区域水稻  $\lambda \geq 0.4$  的保证率仅为 69.10%。水稻  $\lambda \geq 0.4$  的保证率不同分区间差异较大, 范围在 36.79%~86.16%, 东部地区最高, 南部、中部和西部次之; 水稻全生育期  $\lambda \geq 0.6$  的保证率除东部 (31.28%) 和南部 (21.12%), 其他分区均小于 20%; 水稻  $\lambda \geq 0.8$  的保证率均低于 10%。

综上可知, 将 3 种粮食作物全生育期  $\lambda$  不同水平对应的保证率结果对比分析发现, 同一作物相同  $\lambda$  值对应的保证率, 均表现为东部地区保证率最高, 西部地区普遍偏低, 表明东部分区降水满足 3 种粮食作物需水程度高的可能性很大, 而西部分区降水满足作物需水程度低的可能性大; 在保证率最低的西部分区, 3 种粮食作物同一水平  $\lambda$  对应的保证率表现为春玉米 > 大豆 > 水稻, 说明辽西地区作为辽宁降水最少的区域, 更适合种植的粮食作物是春玉米。

### 2.2.3 各生长阶段需水与降水耦合度分析

全省主要作物各生长阶段需水与降水耦合度情况见表 6。由表可见, 春玉米、大豆和水稻生长初期多年平均  $\lambda$  分别为 0.471、0.470 和 0.239, 快速生长期  $\lambda$  分别为 0.645、0.505 和 0.499, 生长中期  $\lambda$  分别为 0.841、0.844 和 0.579, 成熟期  $\lambda$  分别为 0.604、0.598 和 0.296。因此, 从不同生长阶段的  $\lambda$  值来看, 辽宁省 3 种粮食作物各生长阶段的降水均不能满足作物生长需水要求, 其中, 生长初期降水耦合度最低, 说明初期阶段降水对粮食作物需水的满足程度最小, 需关注当地春旱的发生, 及时补充灌溉水。

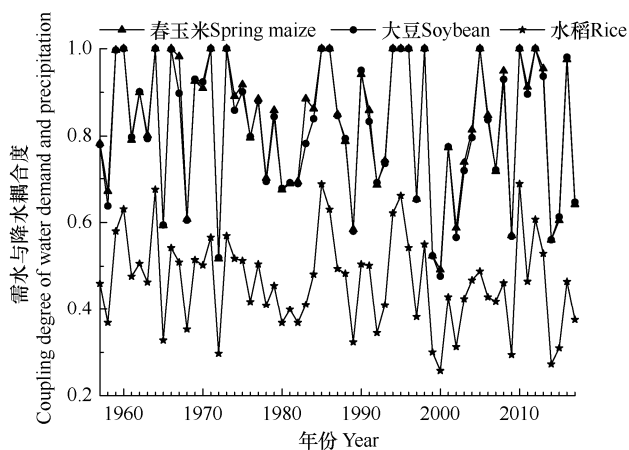


图 6 1957–2017 年辽宁主要粮食作物全生育期需水与降水耦合度的年际变化

Fig. 6 Interannual variation of coupling degree between water requirement and precipitation ( $\lambda$ ) in the whole growth period of major grain crops in Liaoning province in 1957–2017



表 5 辽宁主要粮食作物全生长季不同水平的需水与降水耦合度( $\lambda$ )的保证率Table 5 Guaranteed rates under different level of coupling degrees between water requirement and precipitation ( $\lambda$ ) in major grain crops during whole growth period in Liaoning province

作物 Crop	分区 Region	耦合度 $\lambda$	保证率 Guarantee rate(%)		
			$\lambda \geq 0.4$	$\lambda \geq 0.6$	$\lambda \geq 0.8$
春玉米 Spring maize	中部 Centre	0.825	98.78	86.29	47.64
	西部 West	0.690	93.35	66.20	28.17
	南部 South	0.795	98.54	86.15	49.93
	东部 East	0.974	100.00	100.00	96.00
	全区域 Whole region	0.821	99.49	91.03	54.79
大豆 Soybean	中部 Centre	0.826	98.47	84.22	45.11
	西部 West	0.650	91.18	57.44	21.12
	南部 South	0.807	98.99	88.11	52.04
	东部 East	0.966	100.00	99.93	88.23
	全区域 Whole region	0.814	99.45	90.28	52.39
水稻 Rice	中部 Centre	0.429	56.05	9.49	0.64
	西部 West	0.374	36.79	3.39	0.11
	南部 South	0.510	74.38	21.12	1.21
	东部 East	0.544	86.16	31.28	6.47
	全区域 Whole region	0.464	69.10	11.41	0.30

表 6 主要粮食作物生长季内需水与降水耦合度( $\lambda$ )的时间序列倾向率和 M-K 显著性检验Table 6 The M-K significance test and tendency rate in the time series of coupling degree between water requirement and precipitation ( $\lambda$ ) in each growth stage of main grain crops

作物 Crop	生长阶段 Growth stage	耦合度 $\lambda$	倾向率( $10a^{-1}$ )Tendency rate of $\lambda$ ( $10y^{-1}$ )
春玉米 Spring maize	生长初期 Early growth stage	0.471	0.037*
	快速生长期 Rapid growth stage	0.645	0.007
	生长中期 Middle growth stage	0.841	-0.011
	成熟期 Maturity stage	0.604	-0.030*
	全生长季 Whole growing season	0.821	-0.006
大豆 Soybean	生长初期 Early growth stage	0.470	0.047*
	快速生长期 Rapid growth stage	0.505	0.009
	生长中期 Middle growth stage	0.844	-0.012
	成熟期 Maturity stage	0.598	-0.048*
	全生长季 Whole growing season	0.814	-0.005
水稻 Rice	生长初期 Early growth stage	0.239	0.001
	快速生长期 Rapid growth stage	0.499	-0.008
	生长中期 Middle growth stage	0.579	-0.021
	成熟期 Maturity stage	0.296	-0.029*
	全生长季 Whole growing season	0.464	-0.012

M-K 趋势检验结果显示(表 6), 生长初期的春玉米  $\lambda$  和大豆  $\lambda$  呈显著上升趋势 ( $P < 0.05$ ), 上升速率分别为  $0.037 \cdot 10a^{-1}$  和  $0.047 \cdot 10a^{-1}$ , 成熟期 3 种作物

$\lambda$  的下降趋势均达到  $P < 0.05$  显著水平, 倾向率分别为  $-0.030 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-0.048 \cdot 10a^{-1}$  和  $-0.029 \cdot 10a^{-1}$ , 其他 2 个阶段 3 种作物  $\lambda$  均无明显变化。综上可知, 生长

初期 3 种作物耦合度呈上升趋势, 尤其是春玉米和大豆初期  $\lambda$  显著上升, 表明辽宁地区春旱的发生正逐渐减少, 这有利于 3 种作物在初期的生长, 然而, 3 种作物成熟期  $\lambda$  值均显著下降, 说明该时期降水对 3 种作物的需水将更难以满足, 对作物的成熟非常不利, 旱情程度会直接影响产量高低, 需增加适时有效的灌溉。

#### 2.2.4 各生长阶段需水与降水耦合度的空间分布特征

春玉米不同生长阶段需水与降水耦合度空间分布见图 7。由图可见, 春玉米各个生长阶段  $\lambda$  的空间差异很大, 4 个生长阶段春玉米  $\lambda$  在空间上均呈现“由东向西逐渐递减”的规律。生长初期、快速生长期、生长中期和成熟期春玉米  $\lambda$  的高值均集中于东部地区, 多年平均值分别为 0.558、0.764、0.936 和 0.733; 生长初期和快速生长期低值主要分布在南部地区, 分别为 0.419 和 0.602; 生长中期和成熟期的春玉米  $\lambda$  低值主要分布在西部地区, 分别为 0.743 和 0.467。整体上看, 春玉米生长初期的各分区耦合度均明显低于其他 3 个阶段, 说明春玉米在生长初期不同分区的降水对作物需水的满足程度均最低, 生长中期耦合度在不同分区均达到峰值, 该阶段各分区降水满足春玉米需水程度最高。

大豆不同生长阶段需水与降水耦合度空间分布特征与春玉米大致相同。由图 8 可知, 生长初期、快速生长期、生长中期和成熟期大豆  $\lambda$  空间分布均为“由东向西逐渐递减”的特征。4 个生长阶段大豆  $\lambda$  的高值均集中于东部地区, 多年平均值分别为 0.578、0.631、0.925 和 0.704; 生长初期、快速生长期、生长中期和成熟期的大豆  $\lambda$  低值主要分布在西部地区, 分别为 0.357、0.445、0.749 和 0.458。整体上看, 各个生长阶段大豆  $\lambda$  分区之间具有明显差异, 空间分布特征同春玉米相似, 各分区在生长初期的耦合度最低, 生长中期耦合度值最高。

水稻不同生长阶段需水与降水耦合度空间分布见图 9。由图可见, 生长初期耦合度的空间差异很小, 该阶段整个辽宁地区水稻  $\lambda$  的范围在 0.167~0.407, 仅在东南部极少站点耦合度大于 0.287。快速生长期、生长中期和成熟期水稻  $\lambda$  的空间分布均呈现“由东南向西北逐渐递减”的特征, 后 3 个生长阶段水稻  $\lambda$  的高值均集中于东部地区, 多年平均值分别为 0.572、0.703 和 0.385, 低值主要分布在西部地区, 分别为 0.443、0.449 和 0.216。整体上看, 不同分区均在生长初期的耦合度最低, 生长中期最高, 除生长初期, 各生长阶段水稻  $\lambda$  空间差异较大。

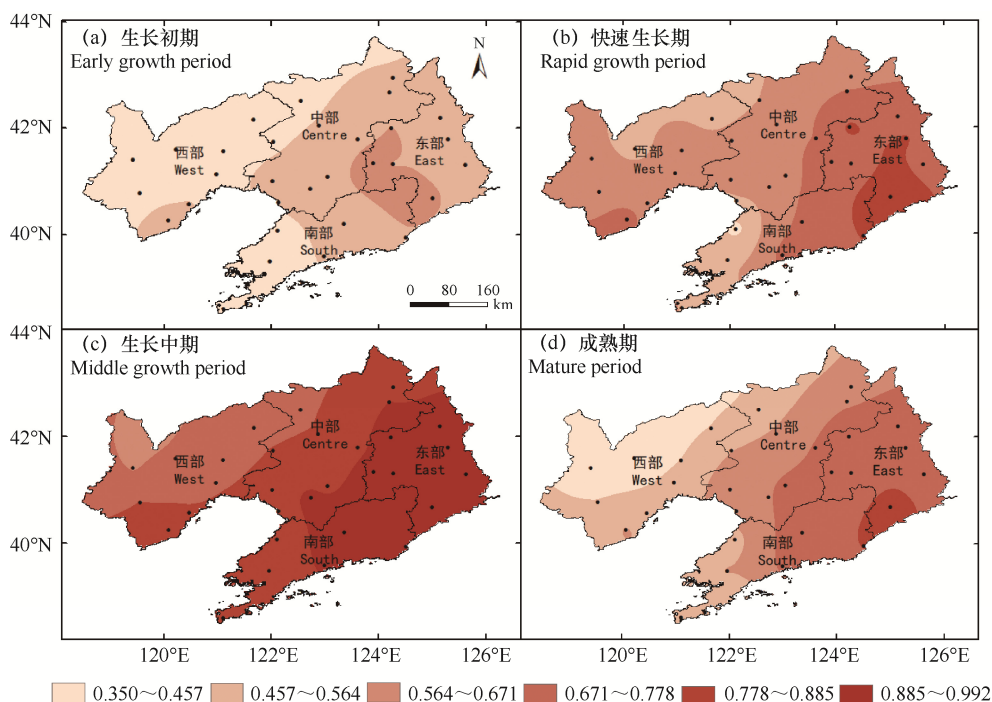


图 7 辽宁春玉米各生长阶段作物需水与降水耦合度空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of  $\lambda$  in each growth stage of spring maize in Liaoning province

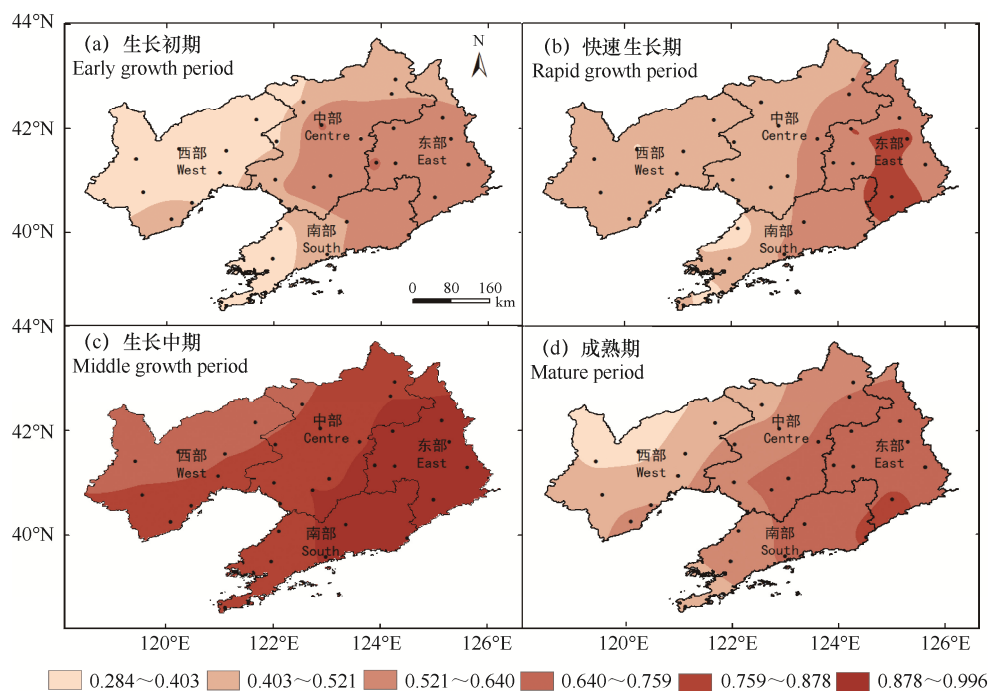


图 8 辽宁大豆各生长阶段作物需水与降水耦合度空间分布

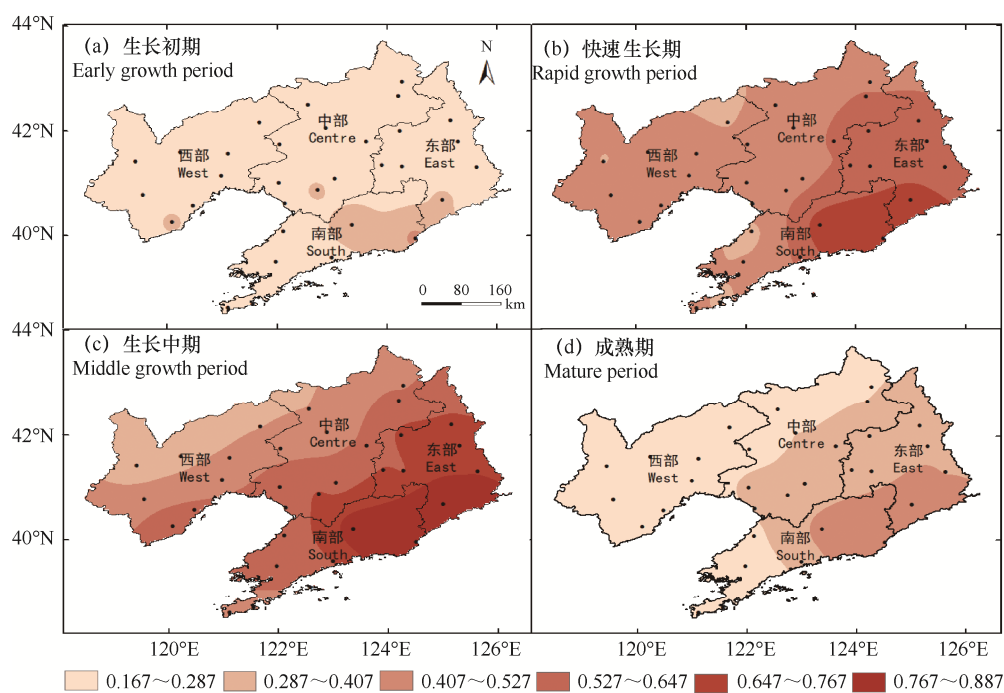
Fig. 8 Spatial distributions of  $\lambda$  in each growth stage of soybean in Liaoning province

图 9 辽宁水稻各生长阶段作物需水与降水耦合度空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of  $\lambda$  in each growth stage of rice in Liaoning province

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

辽宁省主要粮食作物（春玉米、大豆和水稻）全生长季需水量多年平均值分别为 511.8mm、

509.4mm 和 605.1mm，与目前已有结论较符合<sup>[21, 28]</sup>。3 种粮食作物需水量的空间差异性较大，主要表现为西部和西南沿海区高，东部最低，呈现这一分布特征的原因可能是辽宁日照时数呈由西向东递减的趋

势,加之西部和沿海地区风速大<sup>[29]</sup>。随着全球气候变暖,辽宁地区生长季气温多年来呈上升趋势<sup>[30]</sup>,一般认为作物需水量也会随之增加,但本研究得出近60a来辽宁春玉米、大豆和水稻全生长季需水量均呈下降趋势,这是由于影响作物需水的气候因素复杂,一些区域气温对作物蒸散的影响小于相对湿度、日照时数等气候因素的影响<sup>[31]</sup>。本文的研究结果与其他相关研究有相似之处,曹永强等<sup>[32]</sup>研究得出辽西北春玉米需水量整体呈下降趋势,胡惠杰等<sup>[33]</sup>发现1961—2010东北大豆生长季需水量呈下降趋势。作物需水量的下降在一定程度上缓解了农业用水压力,但于文博等<sup>[34]</sup>报道辽宁降水同样呈减少趋势,因此,有关辽宁降水对作物需水的满足程度有必要进一步研究。

辽宁春玉米、大豆和水稻全生长季需水与降水耦合度值均在东部地区最大,即东部降水对各作物需水的满足程度最高,中部、南部次之,西部最低。在耦合度最低的西部地区,3种作物同一水平 $\lambda$ 对应的保证率表现为:春玉米>大豆>水稻,说明辽西地区更适合种植的粮食作物是春玉米。目前关于辽宁粮食作物需水与降水耦合方面的研究较少,研究对象多是春玉米,且主要从作物水分盈亏角度来进行研究,但相关结论与本研究较符合。王贺然等<sup>[35]</sup>从水分盈亏角度得出辽宁地区的降水不能满足玉米各生长阶段需水要求,尤其播种期到苗期,自然降水的供应能力最差,春季到初夏亏水最严重。魏新光等<sup>[36]</sup>研究表明辽宁玉米的水分盈亏量由西北至东南逐渐增加,西部地区缺水现象普遍存在。在目前降水条件下,辽宁省最适宜种植春玉米,尤其水资源匮乏的辽宁西部地区,根据实际情况可适当扩大春玉米种植规模,大豆最适宜在辽宁东部和中部地区种植,水稻在东部和南部地区种植最为适宜。

辽宁各分区主要粮食作物在生长初期的需水与降水耦合度明显低于其他3个阶段,生长初期的降水对各作物需水的满足程度最低,该阶段若水分不足,或中途落干,会很难达到苗全苗壮,应关注土壤墒情及时补充灌溉水。各分区粮食作物在生长中期耦合度均达到峰值,即辽宁粮食作物生长中期的降水满足作物需水程度最高。生长初期3种作物需水与降水耦合度呈上升趋势,尤其是春玉米和大豆初期耦合度显著上升,表明辽宁地区春旱的发生有所缓解。从全生长季角度看,近年来辽宁主要粮食

作物需水与降水耦合度呈下降趋势,即自然降水对作物需水的满足程度在逐年减小,这同王贺然等<sup>[35]</sup>报道辽宁春玉米全生长季缺水情况有加重趋势的结论较一致,特别是3种作物成熟期耦合度均呈显著下降趋势,该时期降水对各粮食作物的需水将更难以满足,这一时期若干旱缺水,百粒重下降,旱情程度会影响产量的高低,需适时灌水保持土壤适宜的墒度。

结合研究成果可知,辽宁粮食作物需依靠适时灌溉来保障粮食稳产,而农业用水形势也更加严峻,主要粮食作物需注意春旱和秋旱的发生,及时补充灌溉。辽宁中部和东部分区降水满足当地粮食作物需水的程度较高,尤其中部平原地区作为本省重要的商品粮基地,应充分利用其适宜气候条件和平坦的土地优势,发展粮食生产,发挥其作为保障辽宁粮食生产安全的主力军作用。本研究在计算水稻需水与降水耦合度时考虑了渗漏量,但目前各地稻田渗漏资料不太全面细致,覆盖不了所有研究站点和年份,在之后研究中应充分调研当地渗漏情况,使理论更贴近实际。后续研究可充分考虑作物产量、价格以及土地适宜性等多种条件,为辽宁粮食作物种植比例调整和种植模式的优化提出更全面、科学的对策。

### 3.2 结论

(1) 辽宁主要粮食作物(春玉米、大豆和水稻)全生长季需水量( $ET_c$ )多年平均值分别为511.8mm、509.4mm和605.1mm。3种作物全生长季 $ET_c$ 空间上表现为西部地区和南部沿海地区需水量较高,东部最低。3种作物各生长阶段需水量,在生长中期最大,快速生长期次之,春玉米成熟期 $ET_c$ 与生长初期基本接近,大豆成熟期 $ET_c$ 大于生长初期,水稻反之。生长初期,春玉米和大豆 $ET_c$ 均呈显著下降趋势( $P<0.05$ )。

(2) 辽宁春玉米、大豆和水稻全生长季需水与降水耦合度( $\lambda$ )多年平均值分别为0.821、0.814和0.464。3种作物全生长季 $\lambda$ 的高值区是东部地区,中部、南部和西部次之,春玉米和大豆 $\lambda$ 在东部地区高达0.974和0.966,自然降水基本满足需水要求。春玉米和大豆在西部分区耦合度为0.690和0.650,该分区耦合度大于0.8的保证率仅为28.2%和21.1%。水稻全区域 $\lambda\geq 0.4$ 的保证率仅为69.1%,西部地区保证率低至36.8%,即西部地区基本所有年份都需补

充灌溉水来保障粮食作物的稳产。

(3) 春玉米、大豆和水稻在各生长阶段的降水均不能完全满足作物生长需水要求, 其中, 生长初期 3 种作物  $\lambda$  均最低(分别为 0.471、0.470 和 0.239)。生长初期, 春玉米和大豆  $\lambda$  均呈显著上升趋势, 上升速率分别为  $0.037 \cdot 10a^{-1}$  和  $0.047 \cdot 10a^{-1}$ , 辽宁地区春旱的发生正逐渐减少。春玉米、大豆和水稻  $\lambda$  在成熟期均呈显著下降趋势, 倾向率分别为  $-0.030 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-0.048 \cdot 10a^{-1}$  和  $-0.029 \cdot 10a^{-1}$ 。

#### 参考文献 References

- [1] 鲁振元. 我国农业用水的“双线”控制管理[J]. 江西农业, 2019(10):55.  
Lu Z Y. The “double line” control and management of agricultural water in our country[J]. Jiangxi Agriculture, 2019(10):55. (in Chinese)
- [2] 中国气象局. 气候变暖事实更确凿与人类活动关系密切: 气候专家解读 IPCC 第五次评估报告第一工作组报告[OL]. 2013-10-09. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xxfw/2011xbz/xbzzy/201310/t20131009\\_228163.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xxfw/2011xbz/xbzzy/201310/t20131009_228163.html).  
China Meteorological Administration. The fact of climate warming is more clearly related to human activities: Climate experts interpret the report of Working Group I of the Fifth Assessment Report of the IPCC[OL]. 2013-10-09. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xxfw/2011xbz/xbzzy/201310/t20131009\\_228163.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xxfw/2011xbz/xbzzy/201310/t20131009_228163.html). (in Chinese)
- [3] Saadi S, Todorovic M, Tanasijevic 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.
- [4] 张祖光, 郝卫平, 李昊儒, 等. 山西省春玉米生育期干旱特征分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6): 754-761.  
Zhang Z G, Hao W P, Li H R, et al. Analysis on the drought characteristics in different growth stages of spring maize in Shanxi province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(6): 754-761. (in Chinese)
- [5] 崔日鲜, 付金东. 山东植棉区降水与棉花需水耦合度的时空变化特征分析[J]. 棉花学报, 2014, 26(1): 49-57.  
Cui R X, Fu J D. Spatial and temporal variation of coupling between rainfall and crop water requirements of cotton in Shandong[J]. Cotton Science, 2014, 26(1): 49-57. (in Chinese)
- [6] 聂堂哲, 张忠学, 齐智娟, 等. 1960-2015 年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 279-290.  
Nie T Z, Zhang Z X, Qi Z J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rice water requirement in Heilongjiang province during 1960-2015[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 279-290. (in Chinese)
- [7] 张婷, 谷中颖, 冯宇鹏, 等. 近 50 年华北和东北地区燕麦需水量变化趋势分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(z): 5-12.  
Zhang T, Gu Z Y, Feng Y P, et al. Analysis on variation trend of oat water demand in North China and Northeast China in recent 50 years[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(suppl.): 5-12. (in Chinese)
- [8] 唐亚平, 张凯, 李忠娴, 等. 1964-2008 年辽宁省旱涝时空分布特征及演变趋势[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(2): 50-55.  
Tang Y P, Zhang K, Li Z X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and evolution trend of drought and flood in Liaoning province from 1964 to 2008[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(2): 50-55. (in Chinese)
- [9] Morteza N O, Richard L S, Shu G, et al. California simulation of evapotranspiration of applied water and agricultural energy use in California[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(8): 1371-1388.
- [10] Ebrahimpour M, Ghahreman N, Orang M. Assessment of climate change impacts on reference evapotranspiration and simulation of daily weather data using SIMETAW[J]. Journal Of Irrigation And Drainage Engineering, 2014, 140(2). 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000669.
- [11] Mancosu N, Spano D, Orang M, et al. SIMETAW#: a model for agricultural water demand planning[J]. Water Resources Management, 2016, 30(2): 541-557.
- [12] 史金丽. 基于 SIMETAW 模型的河西走廊地区主要作物蒸散量研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.  
Shi J L. Studies on main crops' evapotranspiration in Hexi corridor based on the SIMETAW model[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese)
- [13] 孔箐箐, 张海林, 陈阜, 等. 基于 SIMETAW 模型的北京地区主要作物需水量估算[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 109-115.  
Kong Q X, Zhang H L, Chen F, et al. Estimation of main crop water requirement in Beijing based on SIMETAW model[J].

- Journal of China Agricultural University,2009,14(5):109-115.(in Chinese)
- [14] Yang X L,Gao W S,Shi Q,et al.Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region[J].Agricultural Water Management,2013,124:20-27.
- [15] 逯晋松,杨雨豪,张力,等.华北棉区棉花需水量时空变化研究[J].中国农业大学学报,2018,23(10):29-40.
- Ti J S,Yang Y H,Zhang L,et al.Temporal and spatial variation of water requirement of cotton in cotton growing area of North China Region[J].Journal of China Agricultural University,2018,23(10):29-40.(in Chinese)
- [16] Yang X L,Chen F,Chu Q Q.The spatial and temporal variation of water requirement of winter wheat during 1960-2009 based SIMETAW model in Huang-Huai-Hai Farming Region[J].Sensor Letters,2013,11(6-7):1149-1155.
- [17] 单琨.玉米干旱风险分析[D].北京:中国农业科学院,2010.
- Shan K.Analysis on drought risk of maize:Liaoning province[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2010. (in Chinese)
- [18] 刘钰,Pereira L S.对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报,2000,(5):26-30.
- Liu Y,Pereira L S.Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J].Transactions of the CSAE,2000,(5): 26-30. (in Chinese)
- [19] 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.
- Chen Y M,Guo G S.Study on water demand contour map of main crops in China[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,1993.(in Chinese)
- [20] 章西林.辽宁省土地整理规划设计中各种作物灌溉制度分析[J].现代农业科技,2012,(3):277-281.
- Zhang X L.Analysis of various crop irrigation systems in land consolidation planning and design in Liaoning province[J].Modern Agricultural Science and Technology, 2012,(3):277-281.(in Chinese)
- [21] 迟道才,王殿武.北方水稻节水理论与实践[M].北京:中国农业科学技术出版社,2003:46-49.
- Chi D C,Wang D W.Theory and practice of water saving in rice in north China[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2003:46-49.(in Chinese)
- [22] 陈涛涛.斜发沸石对滨海稻田水氮耦合效应的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- Chen T T.Effects of irrigation,nitrogen and zeolite management on grain yield, water and nitrogen utilization in paddy field in coastal China[D].Shenyang:Shenyang Agricultural University,2016.(in Chinese)
- [23] 姬兴杰,朱业玉,顾万龙.河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J].中国农业气象,2013,34(1):14-22.
- Ji X J,Zhu Y Y,Gu W L.Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan province during 1971 to 2010[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(1):14-22.(in Chinese)
- [24] 魏新光,王铁良,李波,等.辽宁省玉米地水分盈亏时空分布特征及灌溉模式分区研究[J].农业工程学报,2018,34(23):119-126.
- Wei X G,Wang T L,Li B,et al.Temporal and spatial distribution characteristics of maize water surplus deficit and irrigation mode partition in Liaoning province[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(23):119-126.(in Chinese)
- [25] 邹俏俏.辽宁省水稻灌溉制度分析[J].东北水利水电, 2013,31(5):55-56.
- Zou Q Q.Analysis of rice irrigation system in Liaoning province[J].Northeast Water Conservancy and Hydropower, 2013,31(5):55-56.
- [26] 王少波,杨绍金,王建东.舞水河流域降水变化特征及趋势分析[J].节水灌溉,2015(9):79-82.
- Wang S B,Yang S J,Wang J D.Changes and trends analysis of the precipitation in Wushui river basin[J].Water Saving Irrigation,2015(9):79-82.(in Chinese)
- [27] 李立,魏晓妹,韩业珍.基于地统计学的作物需水量空间变异性分析[J].水土保持研究,2010,17(1):239-242.
- Li L,Wei X M,Han Y Z.Spatial variability on crop water requirement based on geo-statistics[J].Research of Soil and Water Conservation,2010,17(1):239-242.(in Chinese)
- [28] 慕臣英,梁红,纪瑞鹏,等.沈阳春玉米不同生育阶段需水量及缺水量变化特征[J].干旱气象,2019,37(1):127-133.
- Mu C Y,Liang H,Ji R P,et al.Variation characteristics of spring maize water requirement and water deficit in different growth stages in Shenyang[J].Journal of Arid Meteorology, 2019,37(1):127-133.(in Chinese)
- [29] 翟晴飞,敖雪,孙宝利,等.辽宁省 1981-2010 年潜在蒸散量的变化及生态需水分析[J].中国农学通报,2014,30(17): 228-235.

- Zhai Q F,Ao X,Sun B L,et al. The change of potential evapotranspiration from 1981 to 2010 and the analysis of ecological water demand[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2014,30(17):228-235.(in Chinese)
- [30] 翟献帅,苏筠,方修琦.东北地区近 30 年来温度变化的时空差异[J].中国农业资源与区划,2017,38(2):20-27.
- Zhai X S,Su Y,Fang X Q.Spatiotemporal difference of temperature change in Northeast China in lastest 30 years[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2017,38(2):20-27. (in Chinese)
- [31] 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 X Y,Li Y Z,Hao W P.Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years[J].Transactions of the CSAE,2005,21(10):155-159. (in Chinese)
- [32] 曹永强,李维佳,赵博雅.气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J].资源科学,2018,40(1):150-160.
- Cao Y Q,Li W J,Zhao B Y.Water requirement of spring maize in Northwest Liaoning province under climate change[J].Resources Science,2018,40(1):150-160.(in Chinese)
- [33] 胡惠杰,王猛,尹小刚,等.气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J].中国农业大学学报,2017, 22(2):21-31.
- Hu H J,Wang M,Yin X G,et al.Spatial and temporal changes of soybean water requirement under climate changes in the Northeast Farming Region of China[J]. Journal of China Agricultural University,2017,22(2):21-31.(in Chinese)
- [34] 于文博,王若男,刘海龙,等.1960-2014 年辽宁中西部地区农业生产期降水与干旱的分布规律[J].贵州农业科学,2017,45(9):147-152.
- Yu W B,Wang R N,Liu H L,et al.Distribution regularity of precipitation and drought in central and western regions of Liaoning province during agricultural production period from 1960 to 2014[J].Guizhou Agricultural Sciences,2017, 45(9):147-152.(in Chinese)
- [35] 王贺然,王莹,李晶,等.辽宁地区玉米气候水分盈亏的时空变化分析[J].大麦与谷类科学,2018,35(1):43-52.
- Wang H R,Wang Y,Li J,et al.Analysis of temporal and spatial variation of moisture content in maize climate in Liaoning region[J].Barley and Cereal Sciences,2018, 35(1):43-52.(in Chinese)
- [36] 魏新光,王铁良,刘春成,等.基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究[J].农业机械学报,2017, 48(06): 193-202.
- Wei X G,Wang T L,Liu C C,et al.Spatial and temporal distribution characteristics of maize water budget based on combined model in Liaoning Province[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(06):193-202. (in Chinese)