

DOI: 10.5846/stxb201412022394

王丽, 李阳煦, 王培法, 王晓英, 罗阳欢, 吴浩. 基于生态位和模糊数学的冬小麦适宜性评价. 生态学报, 2016, 36(14): - .

Wang L, Li Y X, Wang P F, Wang X Y, Luo Y H, Wu H. Assessment of ecological suitability of winter wheat in Jiangsu province based on the niche-fitness theory and fuzzy mathematics. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): - .

基于生态位和模糊数学的冬小麦适宜性评价

王 丽^{1,*}, 李阳煦², 王培法¹, 王晓英¹, 罗阳欢¹, 吴 浩¹

1 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044

2 福州市勘测院数字城市研究中心, 福州 350003

摘要:为定量评价气象、土壤等要素对作物生长的影响, 该文利用江苏省及周边 40 个气象站 1980—2010 年日气象资料, 选取影响冬小麦品种生长发育的主要气象(如气温、降水、日照时数等)和土壤(如土壤厚度、有机质和 pH 值等)生态因子, 基于生态位理论和模糊数学的方法, 依据冬小麦生长对生态各因子的响应关系建立各生态因子适宜度模型, 借助 GIS 空间插值和空间分析, 计算江苏省冬小麦品种的种植适宜度并进行等级划分。结果表明:从单要素看, 研究区气温适宜度和日照时数适宜度都由北往南逐渐降低, 降水适宜度由南往北逐渐降低; 大部分地区土壤厚度和土壤有机质适宜, 但大部分地区的 pH 值适宜度较低; 从气候适宜度看, 江苏省气候适宜度的范围为 0.68—0.81, 中北部大部分区域适宜度大于 0.73, 全省的气候适宜度均适合种植冬小麦, 大体上呈现由北往南逐渐减小的变化; 从土壤适宜度看, 全省中部、南部与西北部大部分区域适宜度大于 0.70, 适合种植冬小麦。从综合适宜度看, 全省大部分地区适宜度为 0.50—0.86, 适宜于冬小麦生长。综合考虑农业气候资源和土壤资源对江苏省冬小麦品种种植的综合适宜性进行评价, 评价结果为充分利用江苏省农业生态资源、指导及科学制定冬小麦品种区域种植规划提供科学依据; 按作物品种分生育期多角度的精细化研究方法和建立的各因子的适宜度模型可为今后作物区域适宜性评价提供一种新的思路, 对同类研究具有一定的借鉴作用。

关键词:土壤; 地理信息系统; 作物; 模糊数学; 气候; 生态适宜度; 冬小麦品种

Assessment of ecological suitability of winter wheat in Jiangsu province based on the niche-fitness theory and fuzzy mathematics

WANG Li^{1,*}, LI Yangxu², WANG Peifa¹, WANG Xiaoying¹, LUO Yanghuan¹, WU Hao¹

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 The Research Center of Digital City, Fuzhou Investigation and Surveying Institute, Fuzhou 350003, China

Abstract: In order to quantitatively evaluate the influence of weather and soil on the growth of wheat crops, we use the day-to-day meteorological data from Jiangsu province during 1980–2010, and develop an ecological suitability model of winter wheat on the basis of the niche suitability theory and fuzzy mathematics. The growth suitability of winter wheat in Jiangsu province is evaluated and the regions in the province are delineated for different degrees of suitability with the aid of GIS spatial interpolation and analysis technologies; the different degrees of suitability assigned included the most suitable, more suitable, suitable, and not suitable. The major ecological factors affecting winter wheat growth such as temperature, precipitation, sunshine, soil depth, organic matter, and pH value were considered during the analysis. The analysis process includes four parts. First, the analysis was performed taking into account every growth period of winter wheat, to gain spatial distribution of meteorological stations during 1980–2010, using the most suitable method from the six spatial interpolation

基金项目:国家自然科学基金项目(41175077); 黔科合重大专项([2011] 6003); 2014 年度大学生实践创新训练计划江苏省级重点项目(201410300017Z)

收稿日期: 2014-12-02; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuer217@163.com

methods, including IDW, Kriging, and spline. Second, the analysis was conducted using the fuzzy mathematical models and considering the obtained ecoclimatic indices for the crop's growth period, and the suitability of temperature, precipitation, and sunlight in different growth periods. Third, the weight of each meteorological factor at the different stages, the suitability of temperature, precipitation, and sunlight for the entire life period were calculated for analysis. Lastly, the comprehensive adaptability model for winter wheat was constructed using the relative weight method which determine the weight of all factors, each high suitability degree factor multiplied to reduce its weight while each weak factor multiplied to increase its weight. The integrated suitability values of winter wheat were calculated using this comprehensive adaptability model taking into consideration the previous results that took into account the temperature, precipitation, sunshine, soil thickness, soil pH, and soil organic matter concentration. The conclusions of our research are: 1) The suitability of temperature and sunshine hours gradually decreases from north to south within the study area, while the suitability of rainfall gradually decreases from south to north. 2) The suitability of soil thickness and soil organic matter are higher for crop growth in most of the study area, while the suitability of the soil pH value is low. For climatic suitability, the suitability value of Jiangsu province varied from 0.68 to 0.81, where the suitability in middle and north area exceeds 0.73. 3) The climate of Jiangsu province is suitable for the growth of winter wheat, and the suitability value decreases from north to south. Considering soil suitability, the value for middle, south and northwest parts of study area are more than 0.7, which indicates that they are suitable for the growth of winter wheat. 4) The comprehensive suitability degree for most part of research area varies from 0.5 to 0.86, which is considered suitable for the growth of winter wheat. Our research can provide reasonable guidance to the scientific plans for the cultivation of winter wheat in Jiangsu province. Furthermore, the developed suitability model that considers crop variety and its growth stages provides a new method to the crop ecological suitability evaluation, and can be used in similar researches.

Key Words: soil; geographic information systems; crops; fuzzy mathematics; climate; ecological suitability; Winter Wheat Varieties

综合考察光、温、水等农业气候资源和土壤资源同作物生长发育和产量形成所必需条件的匹配性,是作物适宜性评价及作物适宜种植区划的主要手段,也是农业气象学的重要研究内容。小麦作为中国三大主要粮食之一,国内外学者对冬小麦和春小麦适宜性评价做了大量研究。如 Tuan 等^[1], Mendas 等^[2], 吴洪颜等^[3], 千怀遂等^[4], 蒲金涌等^[5], Wang Dacheng 等^[6], 王琦等^[7]对冬小麦做了适宜性的研究,李自珍等^[8]针对春小麦生态位适宜度模型进行了研究。近年来,冬小麦适宜性研究由定性向客观定量化方向发展,特别在指标的选择上,由传统的定性方法转向集成多种地理因子的综合环境指标定量数理统计方法。如钱存鸣等^[9]从江苏不同生态区选择 7 个地点,根据它们的气候条件、土壤类型和品质特点,将全省分成 3 个品质区域。王龙俊等^[10]根据生态环境因子、土壤、小麦消费习惯等将江苏省分为 4 个一级种植区,12 个二级种植区,并提出框架性区划方案。以上研究应用少数的气候资料观测站点,并不能精确反映整个江苏的小麦气候生态状况。一些学者将 GIS 技术应用到农作物精细化评价中,如代立芹等^[11]利用模糊数据方法,建立河北省冬小麦各生育期气候适宜度评价模型,并分析了 30 a 中各生育期气温、降水、日照和气候适宜度的时空变化特征。马晓群等^[12]对安徽省冬小麦品种做了生态气候适宜性分析和精细化区划。这些研究定量到了空间面上,但主要考虑了气候对冬小麦生长的影响,以气候适宜性评价为主。也有少数学者综合考虑了气候、土壤等多种资源参与评价,如李奇峰等^[13]利用 GIS 技术构建评价单元,选取气候、土壤、地形等关键的作物生态环境因子,采用空间聚类分析法构建作物生态适宜性评价体系。陆洲等^[14]采用生态距离和二次阈值分级方法解决作物生态适宜性评价中分级缺乏物理意义的问题,并以北京的冬小麦为例做了验证。上述研究为深入开展冬小麦适宜性评价提供了较好的研究思路。

江苏省是中国重要的冬小麦产区之一,而影响冬小麦生长的自然资源要素不仅包括气候因素、还有土壤

以及地形等因素,因此正确认识江苏省冬小麦种植的自然资源状况就需要尽可能全面地评价江苏省自然资源各因子与冬小麦生长需求的匹配程度。目前从模糊数学角度全面考虑气候、土壤中多个生态因子进行江苏省冬小麦种植适宜性评价的研究较少,从冬小麦具体品种层次上的研究报道也较少。本文根据模糊数学的方法和生态适宜度理论,从冬小麦品种扬麦 16 号的各生育期的气候指标出发,综合考虑农业气候资源和土壤资源对江苏省冬小麦品种的综合适宜性量化评价,实现区域空间上冬小麦品种的适宜性区划,以期充分利用江苏省生态资源、指导及科学制定冬小麦品种区域种植规划提供依据。

1 研究数据及其处理

1.1 研究数据

由国家气候中心提供的江苏省及周边 40 个气象站 1980—2010 年日观测资料,包括平均气温、降水量、日照时数数据;江苏省土壤资料如土层厚度、土壤 pH 值和土壤有机质含量,由南京土壤所提供;从 STRM 网站下载 90 m 空间分辨率的数字高程模型 DEM(digital elevation model);江苏省冬小麦扬麦 16 号品种的物候数据及产量数据,由江苏省农科院提供。

1.2 数据处理

表 1 给出了冬小麦品种扬麦 16 的 7 个生育期的划分标准。首先,将江苏省及周边 40 个气象站 30 a 的气温、降水、日照时数等气象数据按照表 1 的生育期整理,并计算各生育期 30 a 气候平均值。其次,为了保证站点气象资料空间化的精度,对 7 个生育期分别采用反距离加权平均法(invers distance weight,IDW)、普通克里金(Ordinary Kriging,OK)、协同克里金(Co-Kriging,CK)以及径向基函数(radial basis function,RBF)中的规则样条、张力样条和薄板样条 6 种空间插值方法实现空间化,并对结果进行交叉检验,使用平均绝对误差(mean absolute error)和均方根误差(root mean square error)作为评价插值精度的依据。通过 7 个生育期 6 种插值方法的结果对比可得,气温最佳的插值方法为 CK,降水最佳的插值方法为 OK,日照时数插值最佳的方法为 RBF 的规则样条插值。

表 1 扬麦 16 号小麦品种生育期
Table 1 Growth periods of winter wheat variety Yangmai16

生育期 Growth stage	时间段 Period	天数 Days/d	日期 Start and end date
播种期 Sowing stage	10 月下旬—11 月下旬	25	10-25—11-20
分蘖期 Tillering stage	11 月下旬—12 月中旬	30	11-20—12-20
越冬期 Over winter stage	12 月中旬—2 月上旬	50	12-20—02-10
返青期 Reviving stage	2 月中旬—3 月上旬	30	02-10—03-10
拔节期 Jointing stage	3 月中旬—4 月中旬	40	03-10—04-20
抽穗期 Heading stage	4 月下旬—5 月上旬	15	04-20—05-05
成熟期 Maturing stage	5 月中旬—6 月上旬	25	05-05—06-01

2 研究方法

2.1 适宜性评价模型

采用多准则综合评价模型计算每个评价单元的综合适宜度,作物适宜性评价模型^[15]为:

$$IFI = \sum_{i=1}^n (F_i \times W_i)$$

(1)

式中:IFI 为综合适宜度; F_i 为第 i 个评价指标的隶属度; W_i 为第 i 个评价指标的权重。

参考文献[16],将江苏省冬小麦的种植适宜性划分为最适宜(>0.75)、适宜(≥0.5—0.75)、次适宜(≥0.25—0.5)和不适宜(<0.25)4 个等级。

2.2 权重 W_i 设置

作物的生态适应性指数是由光照、气温、降水、土壤类型、有机质、pH 值、氮磷钾含量等因素共同决定的。对于某种生物,各因子的重要性不同。根据最小因素定律,生物的生长发育是由数量最缺的因子决定的^[17]。考虑到不同因子在生态适应评价中决定强度的差异,本文采用考虑限制因子的相对权重法^[18]确定各评价因子的权重。具体权重公式(2)如下:

$$W_i = \begin{cases} \frac{(1 - U_i)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - U_i)^2} & 0.2 < U_m \leq 1 \\ \frac{(1 - U_i)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - U_i)^2} \times U_m & U_m \leq 0.2, i \neq m \\ 1 - U_m & U_m \leq 0.2, i = m \end{cases} \quad (2)$$

式中, W_i 含义同上; U_i 为评价单元一个因子的隶属度; U_m 为评价单元中隶属度最小的因子的隶属度。该公式表明在评价单元格中寻找隶属度最小的因子,若是小于 0.2 明显的限制因子,则赋予较大的相对权重,否则由其他因子的限制性共同决定的。

2.3 模糊数学隶属函数

作物对某环境因子的适应有很适宜、适宜或不适宜之分,这些都为定性描述,而利用模糊数学隶属函数的方法可以将各因子对作物的适宜程度定量化,此隶属度取值为 0—1 之间,隶属度值越大表明作物在该区域的生态适应性越高。依据生态位适宜度理论模型,作物对生态资源环境的要求主要有 3 类型:适宜区间型(如气温、pH 值)、越多越好型(如土层厚度)、越低越好型(如土壤污染程度)。

2.3.1 气温隶属函数

气温存在适宜区间,作物光合作用有最低、最适和最高气温。对同一种作物来说,辐射强度的变化,会导致其同化率的变化,从而引起光合速率的气温曲线的变化。同样,不同环境气温下光合速率反应曲线也是不同的。在正常的环境气温下,净光合速率的最适气温不是一点,而是一个较宽的气温区域。作物通过光合作用,完成作物生长发育和产量形成的全过程。气温对光合作用强度的影响有两种效应:一是气温增高时光化学过程加快而使总光合作用强度加强,二是气温增高时呼吸消耗增加。因此净光合产物在初期随气温增加而加强,而在超过最适气温以后,净光合产物则随气温增加而降低。以往学者建立的线形等模型并不能充分表达气温对作物的影响变化特点,根据 Larcher(1975) 和 Mirza 等(2013)气温与作物光合作用的关系曲线,气温与光合速率反应曲线近似呈 S 型^[19-20],结合研究地区实际情况,据此建立如式(3)的气温隶属函数 S_T :

$$S_T = \begin{cases} 0 & T < T_L \text{ 或 } T > T_H \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{T_L - T_1} \left(T + \frac{T_1 + T_L}{2} \right) & T_L \leq T < T_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{T_H - T_2} \left(T - \frac{T_2 + T_H}{2} \right) & T_2 < T \leq T_H \\ 1 & T_1 \leq T \leq T_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, T 是某一生育期内的实际日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_L 、 T_H 、 T_2 、 T_1 分别为作物在该时段内生长发育的下限气温、上限气温和最适气温的上下限, $^{\circ}\text{C}$ 。此处参数依据参考资料[21-22]与江苏省农科院提供品种小麦栽培种植资料获取。

2.3.2 日照隶属函数

作物利用太阳辐射及其自身具有的光合作用功能,将太阳能转化为有机干物质。本文根据 Camilo L. Medina^[23]、黄璜^[24]的研究,把日照时数达到可照时数的 70%,即日照百分率 70% 以上的光照条件作为冬小麦

的适宜状态。日照时数的隶属函数 S_{SH} 为^[25]:

$$S_{SH} = \begin{cases} e^{-[(SH-SH_0)/b]^2} \\ 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, SH 为实际日照时数, h ; SH_0 为日照百分率为 70% 的日照时数, h ; b 为系数。

2.3.3 降水隶属函数

评价降水对作物生长的影响,按照作物产量与降水量关系曲线图^[26],建立作物的降水隶属函数 S_R ,计算公式为:

$$S_R = \begin{cases} 0 & R < R_L \text{ 或 } R > R_H \\ k \left(\frac{R - R_L}{R_1 - R_L} \right)^n & R_L \leq R < R_1 \\ k \left(\frac{R_H - R}{R_H - R_2} \right)^n & R_2 < R \leq R_H \\ 1 & R_1 \leq R \leq R_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 为某生育期内的平均降水量,mm; R_L 、 R_H 、 R_2 、 R_1 分别为作物在该时段内生长发育的下限、上限和最适需水量的上下限,mm。 $k=1$, $n=2$ 。此处参数依据参考资料[21-22]与江苏省农科院提供品种小麦栽培种植资料获取。

2.3.4 土壤 pH 值隶属函数

建立土壤 pH 值的隶属度函数 S_{pH} ,如式(6):

$$S_{pH} = \begin{cases} 0 & pH \leq pH_{SL} \text{ 或 } pH \geq pH_{SH} \\ \frac{pH - pH_{SL}}{pH_{OL} - pH_{SL}} & pH_{SL} \leq pH \leq pH_{OL} \\ 1 - \frac{pH - pH_{OH}}{pH_{SH} - pH_{OH}} & pH_{OH} < pH < pH_{SH} \\ 1 & pH_{OL} \leq pH \leq pH_{OH} \end{cases} \quad (6)$$

式中, pH 为实际土壤 pH 值; pH_{SL} 和 pH_{SH} 分别为适宜于作物生长的下限值和上限值; pH_{OL} 和 pH_{OH} 分别为作物最佳生长的下限值和上限值,此处参数依据参考资料[21-22],分别取 6.8 和 7.0。

2.3.5 土壤有机质隶属函数

土壤有机质隶属度函数 S_{OM} ^[27]:

$$S_{OM} = \begin{cases} a & \\ a + \frac{(1-a)(OM - OM_{SL})}{OM_{OL} - OM_{SL}} & OM_{SL} \leq OM \leq OM_{OL} \\ 1 & OM \geq OM_{OL} \end{cases} \quad (7)$$

式中, OM 为实际土壤有机质含量,%; OM_{SL} 和 OM_{OL} 分别为作物生长的土壤有机质含量适宜下限值及最佳下限值,%,最佳下限值取 1.3%。由于土壤有机质因子在最不利情况下,作物仍有可能生存,因此这里将生态位适宜度模型中的最低适应值由 0 换为 a , $a \in [0, 1)$ 。

2.3.6 土层厚度隶属函数

土层厚度隶属度函数 S_{SD} ^[28]:

$$S_{SD} = \begin{cases} SD / SD_{OL} & SD < SD_{OL} \\ 1 & SD \geq SD_{OL} \end{cases} \quad (8)$$

式中, SD 为实际土层厚度,cm; SD_{OL} 作物生长的土层厚度下限,取 20cm。

3 结果与分析

3.1 各要素生态适宜度评价

根据以上气温、降水量和日照时数等各隶属函数及生态指标,可计算得到不同生育期各因子的适宜度。由气候因子各生育期的适宜度与相应生育期的权重乘积累和计算得到气候因子整个生育期的适宜度。冬小麦各生育期内与生育期间气象要素的权重结合文献[11]和江苏省农科院品种小麦专家意见,得出整个生育期上各生育期的相对权重(表2),通过空间分析的栅格计算得到整个生育期的各气象因子适宜度(图1)。因为土壤各因子随生育期的变化很小,可忽略,即只算整个生育期的土壤各因子的适宜度。

表2 冬小麦各因子各生育期权重

Table 2 Weight coefficients of factors for each growth stage

各因子 Factors	播种期 Sowing stage	分蘖期 Tillering stage	越冬期 Over winter stage	返青期 Reviving stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturing stage
气温 Temperature	0.10	0.15	0.19	0.13	0.06	0.18	0.19
日照 Sunshine	0.08	0.07	0.04	0.05	0.18	0.30	0.28
降水 Precipitation	0.11	0.05	0.09	0.11	0.19	0.21	0.24

气温适宜度的范围为 0.54—0.81(图 1a),由北往南逐渐降低,但在最南端如昆山、苏州等地适宜度较高;同一纬度上,东部地区的适宜度略高于西部地区;最适宜区域在江苏省北部,适宜度较低的区域在江苏省南部。由于播种期昆山、吴江地区适宜度为 1,与周边适宜度相差较大;拔节期南京、溧水、溧阳、宜兴和吴江一带气温适宜度为 1,与周边相差较大,使得将各生育期的气温取平均值

后,南京与吴江地区显得异常。

降水适宜度的范围为 0.25—0.63(图 1b),基本上呈现由南部向北部逐渐降低;高邮、东台区域略低于其南北两侧;最适宜区域在江苏省南部,如无锡、苏州等地;适宜度较低的区域在江苏省北部,如徐州、连云港。

日照时数适宜度的范围为 0.53—0.91(图 1c),江苏省大部分地区的日照时数都适宜冬小麦的生长。由北往南逐渐降低;同一纬度上,大部分西部地区的适宜度略低于东部地区;最适宜区域在江苏省北部,如连云港等;适宜度较低的区域在江苏省南部,如苏州等地。

经资料查阅,冬小麦的耕作层深度一般为 20cm 以上,土壤厚度的最低下限为 40cm,计算的土壤厚度适宜度范围较大,见图 1d。除去河流、湖泊,全省土壤厚度的适宜度大部分为 1,即厚度大于 40cm;江苏省的土壤厚度均适宜冬小麦的生长。

江苏省土壤 pH 值的适宜度的范围见图 1e,适宜度大于 0.6 的区域占全省的 61%。北部、苏中的西部和东部、苏南部分地区 pH 值适宜度较高,如徐州、宿迁、连云港、苏州等地;中部与苏南东部的部分地区适宜度为 0,土壤酸性超出冬小麦适宜范围。全省有大约 50%的面积 pH 值适宜度大于 0.8。

土壤有机质含量的值达到 1.3%为适宜^[29],根据有机质隶属函数,计算的江苏省有机质适宜度的范围见图 1f,适宜度大于 0.8 的区域占全省 64%,大于 0.6 的区域占全省 75%。大部分地区有机质含量较高,中、东南部如苏州、南通、泰州等地有机质适宜度最高;北部地区适宜度低于南部,但基本大于 0.2,属于适宜范围。所以,除水域外,江苏省大部分地区的土壤有机质适宜冬小麦生长。

3.2 气候生态适宜度评价和土壤生态适宜度评价

3.2.1 冬小麦气候生态适宜度

单从气候的角度考查江苏省冬小麦品种的适宜性,可用气候适宜度来定量评价。利用式(1),首先由各生育期的气温、降水、日照时数适宜度和冬小麦生育期内权重计算得到各生育期气候适宜度,再将不同生育期

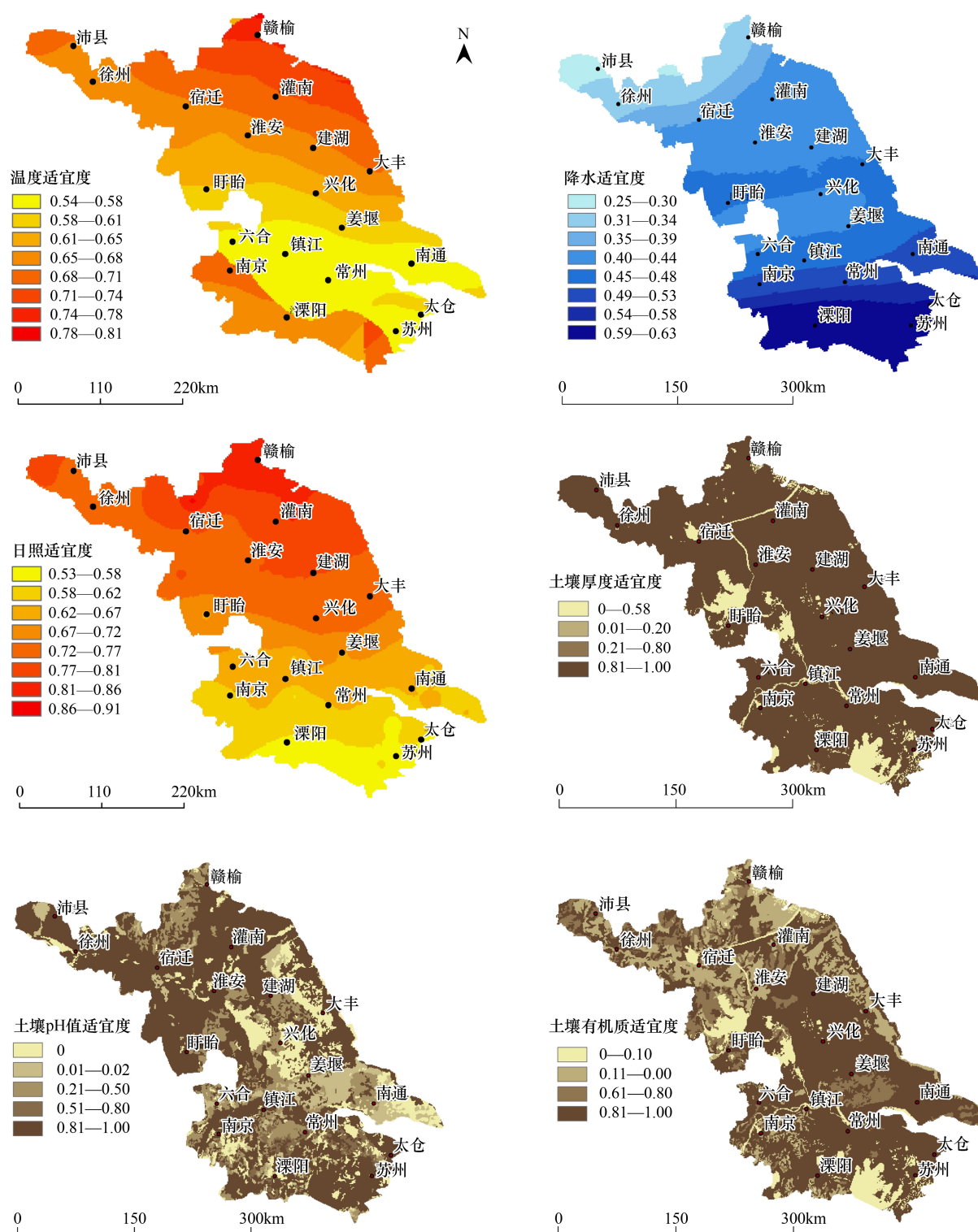


图1 江苏省各因子的适宜度分布图

Fig.1 Distribution of suitability of ecological factors

气候适宜度和相应的生育期间权重乘积求和,即得到冬小麦整个生育期的气候适宜度范围为 0.68—0.81(图 2),江苏省中北部大部分区域适宜度大于 0.73,全省的气候适宜度均适合种植冬小麦,大体上呈现由北往南逐渐减小的变化。镇江、南通一带适宜度略低于其南部与北部,但都大于 0.60。

3.2.2 冬小麦土壤生态适宜度

单从土壤的角度考查江苏省冬小麦品种的适宜性,可用土壤适宜度来定量评价。利用式(1),综合土层厚度、土壤 pH 值、土壤有机质单因子的适宜度,其中 3 因子权重赋值依据文献[30],分别为 0.29、0.19 和 0.52 计算得到江苏省冬小麦土壤适宜度分布图 3。由图 3 看出江苏省土壤适宜度为 0—1,中部、南部与西北部等大部分区域土壤适宜度大于 0.70,适合种植冬小麦,其中 0.7 以上区域占全省的 82%,适宜度大于 0.89 的区域占全省的 35.7%,主要分布在长江、淮河沿岸、太仓等区域。空间分布图上呈现南部优于北部的趋势。

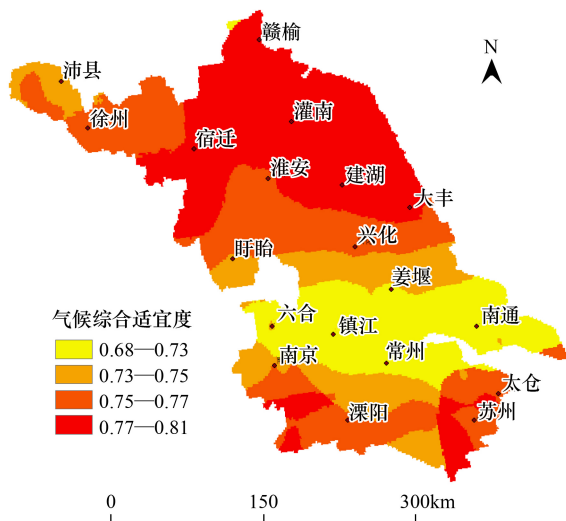


图 2 江苏省气候适宜度

Fig.2 Climatic suitability of Jiangsu province

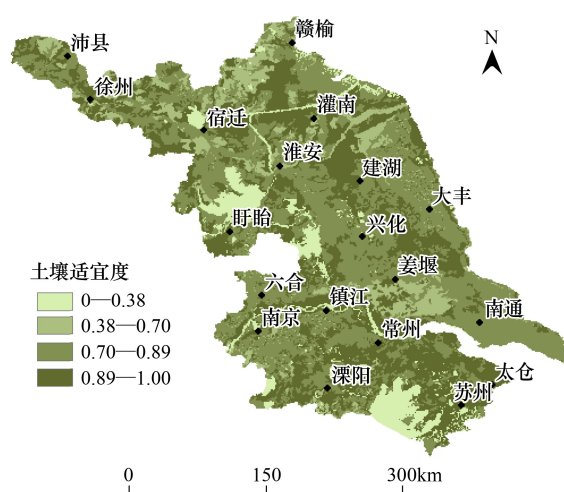


图 3 江苏省土壤适宜度

Fig.3 Soil suitability of Jiangsu province

3.3 冬小麦综合适宜度评价

冬小麦的生长是气候、土壤等多个环境因素的综合作用,因此全面考虑气候、土壤等因素的影响更为合理。根据以上气温、降水、光照、土壤类型、土壤有机质、土壤 pH 值各因子适宜度,通过权重公式(2)可得各因子的权重图层,利用式(1)计算得到冬小麦综合适宜度空间分布图 4。

从图 4 中颜色深浅变化表示种植冬小麦适宜程度的高低。可以看出在各气候因子综合作用下江苏省冬小麦种植适宜度呈现北高南低。依据文献[16]将适宜性分为最适宜、适宜、次适宜和不适宜 4 个等级,同时参考研究区土地利用图和冬小麦的产量等调查资料,做出分级调整,由冬小麦产量数据将最适宜区为适宜度 0.7 以上,适宜度 0.65 为适宜区和次适宜区的分界点,江河湖泊等水域都低于 0.45,将适宜度低于 0.45 的划为不适宜区。由图 4 可看出江苏省大部分区域适宜度为 0.50—0.86,适宜种植冬小麦。最适宜的区域主要在江苏北部和中部区域,南部区域主要为适宜区,不适宜的区域主要分布在苏南的太湖、溧湖,苏中的高邮湖以及苏北的洪泽湖、长江等水域。该分级结果和吴洪颜等^[3]、金善宝^[17]学者研究结论相一致。

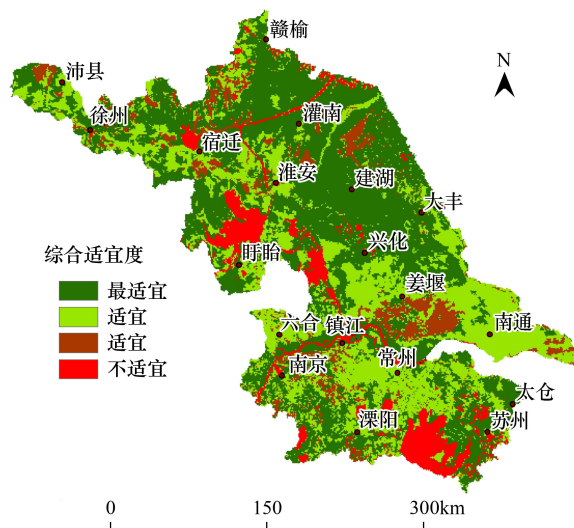


图 4 江苏省冬小麦综合适宜度分布图

Fig. 4 Comprehensive suitability for winter wheat in Jiangsu province

4 结论与讨论

本文利用多种插值方法对比选取最佳方法实现气象要素的空间化,利用模糊数学建立适宜度模型,分析江苏省冬小麦的气候、土壤适宜度情况,并将各要素的适宜度赋予权重,进行综合分析,得到江苏省冬小麦适宜种植区划。结果表明:

1)江苏省气温适宜度为 0.54—0.81,日照适宜度为 0.53—0.91,降水适宜度为 0.25—0.63,总体上气候条件较适宜冬小麦生长。气温适宜度总体上呈从北往南逐渐降低的趋势;降水适宜度总体上呈现从南往北逐渐降低的趋势;日照时数适宜度从北往南逐渐降低。

2)江苏省大部分区域的土壤厚度能满足冬小麦的生长,适宜度为 1;土壤有机质基本满足冬小麦生长,适宜度大于 0.8 的区域占全省 64%,大于 0.6 的区域占全省 75%;土壤 pH 值适宜度较适宜冬小麦生长,适宜度大于 0.6 的区域占全省的 61%。

3)江苏省冬小麦整个生育期的气候适宜度范围为 0.68—0.81,中北部大部分区域适宜度大于 0.73,全省的气候适宜度均适合种植冬小麦,大体上呈现由北往南逐渐减小的变化。江苏省土壤适宜度为 0—1,中部、南部与西北部等大部分区域土壤适宜度大于 0.7,适合种植冬小麦,其中 0.7 以上区域占全省的 82%,适宜度大于 0.89 的区域占全省的 35.7%,主要分布在长江、淮河沿岸、太仓等区域。空间分布图上呈现南部优于北部的趋势。

4)江苏省冬小麦综合适宜度看,整个江苏省基本都适宜种植冬小麦,空间上看北部与中部最适宜冬小麦生长,南部较适宜冬小麦生长,不适宜区域主要分布在江河湖泊等水体区域。

本文研究中以冬小麦优质品种扬麦 16 号为例,该品种属于春性中熟小麦品种,在各生态要素的隶属度计算时,由于缺少该品种准确的三基点资料,根据专家意见,各气候要素的三基点参考中熟小麦的三基点资料,土壤 pH 值、土层厚度以及土壤有机质含量等三基点的取值参考冬小麦大类的三基点资料。这可能与该品种的实际三基点取值有偏差,在今后资料完备时需进一步更新和完善。

致谢:感谢江苏省农科院提供的冬小麦资料;感谢范晓梅、孙德勇老师在论文摘要的翻译中提出的宝贵意见;感谢审稿专家对本论文提出宝贵的建设性修改意见。

参考文献 (References):

- [1] Nguyen Thanh Tuan, Qiu J J, Ann Verdoodt, Li H, Eric Van Ranst. Temperature and precipitation suitability evaluation for the winter wheat and summer maize cropping system in the Huang-Huai-Hai plain of China. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(2): 275-288.
- [2] Abdelkader Mendasa, Amina Delali. Integration of multicriteria decision analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 83: 117-126.
- [3] 吴洪颜,商兆堂,程婷,黄文杰,陆志刚.基于聚类分析的江苏冬小麦农业气候区划研究. *中国农学通报*, 2012, 28(26): 119-124.
- [4] 千怀遂,焦士兴,赵峰.河南省冬小麦气候适宜性变化研究. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 503-507.
- [5] 蒲金涌,张存杰.甘肃省冬小麦水分适应性动态变化研究. *资源科学*, 2008, 30(9): 1297-1402.
- [6] Wang D C, Li C J, Song X Y, Wang J H, Yang X D, Huang W J, Wang J Y, Zhou J H. Assessment of land suitability potentials for selecting winter wheat cultivation areas in Beijing, China, using RS and GIS. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(9): 1419-1430.
- [7] 王琦,郭建茂,郑腾飞,施俊怡.基于作物模型的冬小麦气候适宜度算法研究. *中国农学通报*, 2013, 29(32): 374-378.
- [8] 李自珍,李文龙,马智慧,杨雨华.作物生态位适宜度模型及其在春小麦生长系统中的应用. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2): 45-50.
- [9] 钱存鸣,马兆私,周朝飞,葛永福,盛培英,陈志德,姚国才,柏贵华.江苏省小麦品质区划研究. *江苏农业科学*, 1990(6): 8-11.
- [10] 王龙俊,陈荣振,朱新开,杨力,姜东,陈维新,李旭.江苏省小麦区划研究初报. *江苏农业科学*, 2002(2): 15-18.
- [11] 代立芹,李春强,魏瑞江,于长文.河北省冬小麦气候适宜度及其时空变化特征分析. *中国农业气象*, 2011, 32(3): 399-406.
- [12] 马晓群,张宏群,吴文玉,戚尚恩,陈晓艺.安徽省冬小麦品种生态气候适宜性分析和精细化区划. *中国农业气象*, 2012, 33(1): 86-92.
- [13] 李奇峰,刘曦,孔箐铤,陆洲,潘瑜春,秦向阳.基于空间聚类的作物生态适宜性评价方法研究——以北京市为例. *中国农学通报*, 2011, 27

- (11):262-265.
- [14] 陆洲,秦向阳,李奇峰,于莹,臧辰龙,淮贺举.作物生态适宜性定量化评价方法及通用工具.农业工程学报,2012, 28(20):195-202.
- [15] Sudabe Jafari, Narges Zaredar. Land suitability analysis using multi attribute decision making approach. International Journal of Environmental Science and Development, 2010, 1(5): 441-445.
- [16] Madrau S, Zucca C, Urgeghe A M, Julitta F, Previtali F. Land suitability for crop options evaluation in areas affected by desertification: the case study of Feriana in Tunisia. Land Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation, 2010: 179-193.
- [17] 金善宝.中国小麦学.北京:农业出版社,1996.
- [18] 曹卫星,朱艳.作物管理知识模型.北京:中国农业出版社,2004.
- [19] 张静.作物——地域多种组合中作物生态适宜性评价与权重配置方法的研究[D].南京:南京农业大学,2005.
- [20] Mirza Hasanuzzaman, Kamrun Nahar, Masayuki Fujita. Extreme temperature responses, oxidative stress and antioxidant defense in plants. 2013 [2013-3-13]. <http://dx.doi.org/10.5772/54833>.
- [21] 胡立勇,丁艳锋.作物栽培学.北京:高等教育出版社,2008.
- [22] 杨文钰,屠乃美.作物栽培学各论.南方本(第二版).北京:中国农业出版社,2011.
- [23] Camilo L Medina, Rogéria P Souza, Eduardo C Machado, Rafael V Ribeiro, José A B Silva. Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets. Scientia Horticulturae, 2002, 96(1/4): 115-125.
- [24] 黄璜.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究.自然资源学报,1996, 11(4): 340-346.
- [25] 赖纯佳,千怀遂,段海来,宋秋洪,俞芬,张静芬,张轶秀.基于数据处理及图件的小麦-水稻种植制度的气候风险评估.农业工程学报, 2011, 27(2): 230-236.
- [26] 徐学选,高鹏,蒋定生.延安降水对农作物生长适宜性的模糊分析.水土保持研究,2000, 7(2): 73-76, 118-118.
- [27] 欧阳志云,王如松,符贵南.生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用.生态学报,1996, 16(2): 113-120.
- [28] 单英杰.基于GIS和模型的种植设计系统研究[D].南京:南京农业大学,2007.
- [29] 山东省小麦高产栽培研究协作组.山东省冬小麦稳产千斤的生育特点及栽培规范.山东农业科学,1981, (2): 1-7.
- [30] 于婧,聂艳,周勇,何佑勇.生态位适宜度方法在基于GIS的耕地多宜性评价中的应用.土壤学报,2006, 43(2): 190-196.