

东北地区水稻扩张的海拔优势区间分析

黄莹泽^{1,2,3}, 邱炳文^{1,2,3*}, 何玉花^{1,2,3}, 张珂^{1,2,3}, 邹凤丽^{1,2,3}

(1. 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350116;

2. 地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心, 福州 350116; 3. 数字中国研究院(福建), 福州 350116)

摘要:及时掌握水稻的时空分布信息,对调整和优化农业生产结构至关重要。论文利用综合考虑植被物候和地表水变化的水稻自动制图方法,结合海拔、地表水体因素开展2001—2017年东北地区水稻分布的时空演变研究。通过889个地面调研点位对水稻分类结果验证,总体精度达90.66%,Kappa系数为0.8128。研究表明:①21世纪初,东北地区水稻种植面积呈先略减后持续增加的趋势,2017年水稻种植面积达2001年的2.13倍。其中,水稻扩张面积的60%分布在三江平原,30%分布在松嫩平原,下辽河平原仅占不足5%。水稻扩张的海拔优势区间在200 m范围内,随着海拔的上升水稻扩张与地表水关系越来越密切。②三江平原内,水稻扩张幅度在海拔30~70 m范围内逐渐增加,使优势区间从相对高度70 m缩减至40 m内,也使得分布优势逐渐趋向于距地表水体较远的区域。而松嫩平原和下辽河平原水稻种植分布的海拔优势区间始终分别保持在相对高度100 m、40 m内。③三江平原水稻的集中分布和急剧扩张,使水稻分布优势逐渐趋向于距地表水体远的区域,这将对地下水带来更大的压力;而松嫩平原水稻分布受地表水体影响较大,分布优势随着距地表水体距离的增加而减小。研究可为农业部门评估水资源承载力、保障农业可持续发展提供数据支撑及理论参考。

关键词:水稻种植;东北地区;长时间序列;地理因素;优势区间

水稻为世界一半以上的人口提供主食^[1]。近年来,中国水稻发生翻天覆地的变化,南方水稻大幅减少,而东北地区显著增加^[2-3]。据统计,在1980—2010年间,东北地区水稻产量已从中国水稻总产量的3%增长到13%,主要由于水稻种植面积的迅速扩大^[4]。这种显著变化对粮食安全、农业可持续发展和生态服务平衡产生巨大影响^[5-6]。因此,及时掌握东北地区水稻种植分布的时空演变信息具有重要意义。

研究大量采用统计数据探讨水稻种植分布的动态变化,但忽略了每个统计单元的空间异质性,从而提供较少的空间特征,同时统计数据的获取具有时间上的滞后性^[7-9]。在这方面,遥感数据可以成为基于统计数据研究的有效补充,为大面积作物监

测提供空间和时间信息^[10]。

水稻种植受多种因素影响,学者们多关注温度、降水变化对水稻种植分布的影响^[4,11-14]。但地理因素不仅决定了水稻生产所需的光热条件,还影响水资源的再分配,进而影响水稻的生产^[9,15]。然而前人研究中大多基于水稻分类结果,结合海拔、河流和纬度^[15-18]等因素的空间分异,分析水稻种植面积在不同范围内的分布特征。虽然关注到了东北地区水稻的快速扩张以及地理分布特征,但缺乏综合性的分析,未考虑到不同地理因素之间的关系。另外,在探讨水稻的分布特征时,忽略了耕地面积大小的影响。

因此,本文拟利用综合考虑植被物候和地表水变化的水稻制图方法,快速获取2001—2017年长时

收稿日期:2019-09-23;修订日期:2020-02-15。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41471362,41771468);福建省重点科技项目(2017I0008,2017L3012)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41471362 and 41771468; Key Science and Technology Program of Fujian Province, No. 2017I0008 and 2017L3012.]

第一作者简介:黄莹泽(1993—),女,河南驻马店人,硕士生,主要从事土地变化科学研究。E-mail: 939918076@qq.com

*通信作者简介:邱炳文(1973—),女,湖南浏阳人,研究员,博士,主要从事土地变化科学研究。E-mail: qiubingwen@fzu.edu.cn

引用格式:黄莹泽,邱炳文,何玉花,等. 东北地区水稻扩张的海拔优势区间分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(9): 1557-1564. [Huang Yingze, Qiu Bingwen, He Yuhua, et al. Optimal elevation interval of rice expansion in Northeast China. Progress in Geography, 2020, 39(9): 1557-1564.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.09.012

间序列东北地区水稻种植分布数据集;通过结合海拔、距地表水体距离因素,利用分布指数分析水稻种植分布的海拔优势区间,并探讨不同海拔下水稻种植分布受地表水体影响以及水稻扩张的趋势,为东北地区水稻格局变化的机制研究奠定基础,有利于调整和优化水稻生产结构、保障农业可持续发展,也可为政府部门制定与水稻种植有关的政策等提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

中国东北地区(黑龙江、吉林、辽宁三省)地处中高纬度及欧亚大陆东端,位于 $115^{\circ}52'\sim 135^{\circ}09'E$, $38^{\circ}72'\sim 53^{\circ}55'N$,耕地面积2640万 hm^2 ,约占全国总耕地面积的16.5%;土层深厚、土壤肥沃,含有较高的有机质,拥有黑龙江、嫩江、松花江、辽河等众多河流,是世界上最大的优质粳稻种植区,受热量条件限制多为一年一熟^[19]。该区大体属于温带季风气候,平均海拔300 m左右,年均温 $-4.15\sim 10.99^{\circ}C$,年降水量366.90~1080.47 mm。

1.2 数据来源

采用2001—2017年8 d最大化合成、空间分辨率为500 m的MOD09A1数据,每年46期,从NASA网站下载(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)。该数据集属于三级产品,已经被赋予定标参数并对遥感器成像过程产生的边缘畸变进行校正。利用MODIS Reprojection Tool (MRT)工具进行拼接、投影转换,提取波段数据和数据质量图层。经过去云处理后,计算双波段增强型植被指数(2-band Enhanced Vegetation Index, EVI2)和地表水分指数(Land Surface Water Index, LSWI)^[20]。

地理因素数据用于水稻的时空特征分析,其中DEM数据为90 m的SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)数据,而相对高度以各区域最低海拔为基准面来计算;与地表水体距离数据则利用国家基础地理信息提供的四级以上河流和湖泊,比例尺为1:100万,并通过计算水体的最近距离获取。2010年土地利用/覆盖数据空间分辨率为30 m,下载地址为<http://www.globallandcover.com/>。该数据通过重采样转化为500 m空间分辨率,并将其用于耕地掩膜。另外,2017年采集的889个地面调查点位,用于分类结果验证。

2 研究方法

2.1 水稻提取方法

通过综合考虑植被物候和地表水变化,建立水稻制图方法。相对于其他作物,水稻在移栽期需要灌水,LSWI值相对较高,导致分蘖期至抽穗期间LSWI的变化幅度较小^[20]。EVI2为作物提供了物候信息,因此可以基于EVI2和LSWI在分蘖期和抽穗期之间的变化幅度来识别水稻:

If($LSWI_{min} > \theta_1$ and $RCLE < \theta_2$), rice=1; else rice=0 (1)
式中:rice等于1表示水稻,等于0表示非水稻; θ_1 和 θ_2 是常数。RCLE为LSWI的变化幅度和EVI2增量的比值,公式为:

$RCLE = (LSWI_{max} - LSWI_{min}) / (EVI2_{heading} - EVI2_{tillering})$ (2)

式中:EVI2_{tillering}、EVI2_{heading}分别表示分蘖期和抽穗期的EVI2的值,LSWI_{max}、LSWI_{min}分别表示在分蘖期至抽穗期间LSWI的最大值和最小值。抽穗期是根据生长期EVI2的最大值来确定,抽穗期前40 d认为是分蘖期^[20]。在分类前,采用土地利用/覆盖图掩膜非耕地。该方法具有一定鲁棒性,在中国东南地区已成功应用^[21]。

2.2 分布指数

利用分布指数^[22]来反映水稻在不同海拔、距水体距离下的分布特征。由于该公式增加了一个缩放系数,即(S_e/S),表示不同海拔或距水体距离等级下的耕地面积与总耕地面积比,在一定程度上消除了耕地面积大小的影响,且更加突出了水稻分布相对较少区域的特征。计算指数如下:

$$P = \frac{S_{paddy} / S_{paddy}}{S_e / S} \quad (3)$$

式中: P 代表分布指数, S_{paddy} 代表不同海拔或距水体距离范围内水稻种植面积, S_{paddy} 代表水稻总面积, S_e 代表不同海拔或距水体距离范围内耕地面积, S 代表耕地总面积。 $P > 1$,说明水稻在某一海拔或距水体距离范围内的分布属于优势分布, P 越大表示优势度越高,即水稻在该范围内的分布程度较高。

3 结果分析与讨论

3.1 精度验证

通过设置阈值^[21],获取2001—2017年东北水稻种植分布信息(表1、图1)。采用地面调研点位验证2017年的结果,总体精度达90.66%,Kappa系数为

0.8128(表1)。对于478个其他作物地面调研点位,427个被识别为其他作物(89.33%);对于411个水稻地面调研点位,379个被识别为水稻(92.21%),有32个被识别为其他作物。

3.2 水稻种植分布的时空变化特征

近年来,东北地区水稻种植面积迅猛增加(图1a)。2001年水稻种植面积为2896350 hm²,而2017年约6159875 hm²,是2001年的2.13倍。具体地,2001—2017年,水稻种植面积先略减后呈持续上升的趋势(图1a)。在2001—2004年,水稻种植面积净减少约11%,主要分布在三江平原(图1b)。自2004年起,国家逐渐放弃了多年的农业税收政策,并开始实施新的全国性农业补贴政策^[23]和稻谷最低收购价政策,提高了农民从事农业生产的积极性,有研究表明新的农业补贴政策促进了废弃农田的扩张和复垦^[24]。同样,2004年后水稻种植面积迅速增加。而2004年大米价格的上涨也促进了东北地区水稻的扩张^[17]。至2017年,水稻种植面积高达2004年的2.5倍,而三江平原的水稻扩张几乎以直线形式快速增加(图1b)。

2001—2017年东北地区水稻种植变化中,80%以上的区域发生扩张。其中,在海拔<200 m范围内扩张面积占87%,主要分布在下辽河平原、三江平原和松嫩平原。Dong等^[17]研究也表明,90%的水稻扩张发生在海拔250 m以下。而且东北地区水稻扩张的海拔优势区间也在200 m范围内(图1c,分布指数 $P>1$),其中在海拔40~70 m范围内扩张优势最为突出,扩张面积占东北地区总扩张面积的40%,而耕地面积仅占总耕地面积的10%左右,主要分布在三江平原。通过分析水稻在不同海拔范围内水稻扩张与地表水体的关系发现,随着海拔的上升,扩张优势逐渐趋向于距地表水体更近的区域,说明随着海拔的上升,水稻扩张与地表水的关系更密切(图1d)。

3.3 水稻的海拔优势区间分析

水稻分布随海拔优势区间的变化而变化(图2a),但绝对海拔依赖于所在区域的地貌单元。因此,结合各区域相对高度的变化进行分析。在三江平原,2001年水稻分布的海拔优势区间在海拔30~100 m范围,但在海拔30~70 m范围内,水稻种植面积由该区域耕地面积的20%扩张至67%,从而使2017年水稻分布的海拔优势区间缩减到30~70 m,相对高度40 m以下。在松嫩平原,2001—2017年水稻分布的海拔优势区间从100~140 m稳定持续

表1 利用地面调研点位进行精度评估
Tab.1 Accuracy assessment using field survey data

项目	合计	水稻 调研点	其他作物 调研点	生产者精度
水稻调研点	411	379	32	92.21%
其他作物调研点	478	51	427	89.33%
使用者精度		88.14%	93.03%	
总体精度	90.66%			
Kappa系数	0.8128			

到200 m,即相对高度100 m以下。虽然在海拔500 m以上具有较强的分布优势,但该区域耕地面积仅占松嫩平原总耕地面积的3%左右。在下辽河平原,水稻分布在海拔0~40 m范围内表现出极强的分布优势,而在海拔40 m以上水稻分布优势迅速消失。在海拔400 m以上水稻分布优势也非常强,但该区间耕地面积仅占下辽河平原耕地面积的1%。总体来说,三江平原、松嫩平原和下辽河平原水稻分布的海拔优势区间分别分布在海拔30~70、100~200、0~40 m范围内,其中三江平原和下辽河平原的海拔优势区间分布在相对高度40 m以下,而松嫩平原在100 m以下。

海拔影响水资源的再分配,因此对水稻分布也具有一定影响。在海拔优势区间内,三江平原和下辽河平原水稻种植面积的大幅扩张和集中分布使其受地表水体的限制较小,而松嫩平原水稻分布与地表水体关系更密切(图2b)。2001—2017年,三江平原水稻分布的海拔优势区间从相对高度70 m缩减至40 m以下。该区间内水稻种植面积扩张至区间耕地面积的66%,占东北地区总扩张面积的50%。它的大幅扩张和集中分布使得水稻分布优势在距地表水体距离较近区域逐渐减弱,从侧面反映了水稻灌溉更多地依赖于地下水,这势必对地下水资源造成严重威胁。在下辽河平原的相对高度40 m以下,水稻扩张面积仅占东北地区水稻扩张面积的3%,但分布着下辽河平原水稻总面积的80%左右。它的集中分布使水稻分布指数在与地表水体距离0~9 km范围内随其增加而增加的趋势始终保持不变,在0~3 km内水稻分布处于劣势,说明了水稻分布受地表水影响较小。而松嫩平原水稻分布的海拔优势区间分布在相对高度100 m内,范围较大。虽然水稻种植面积也占松嫩平原总面积的80%,但不足区间耕地面积的10%,而该区间耕地面积是松嫩平原总耕地面积的66%。因此,在松嫩平原优势区间内水稻分布较分散。但与地表水体关系较密切,与三江平原和下辽河平原相比,水稻分

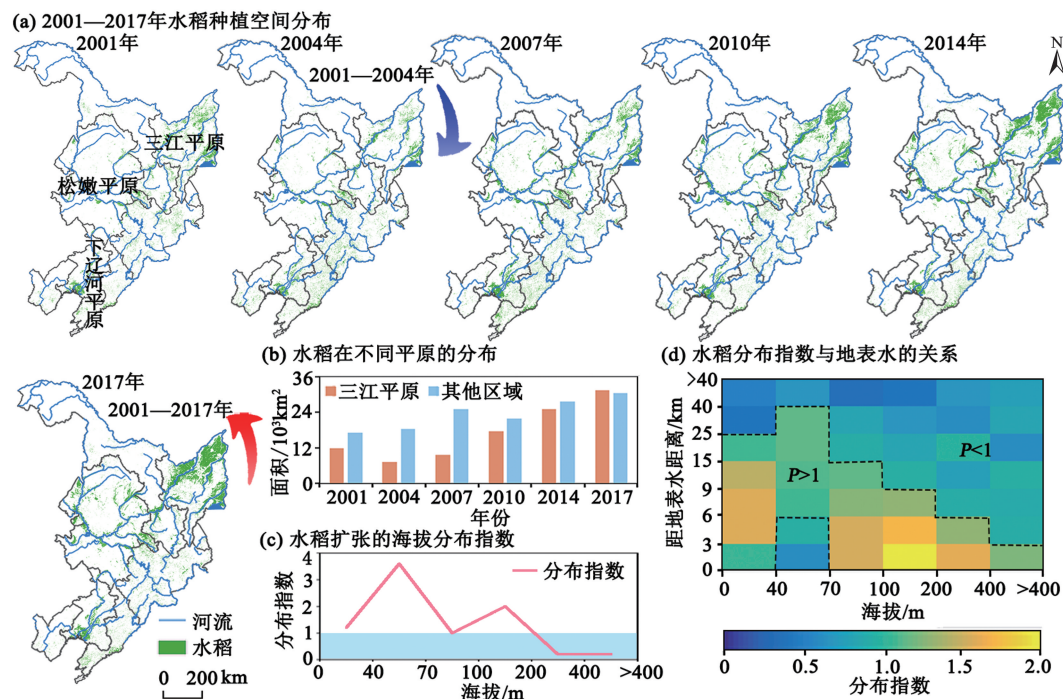


图1 2001—2017年水稻种植分布的时空特征

Fig.1 Spatiotemporal characteristics of rice distribution, 2001–2017

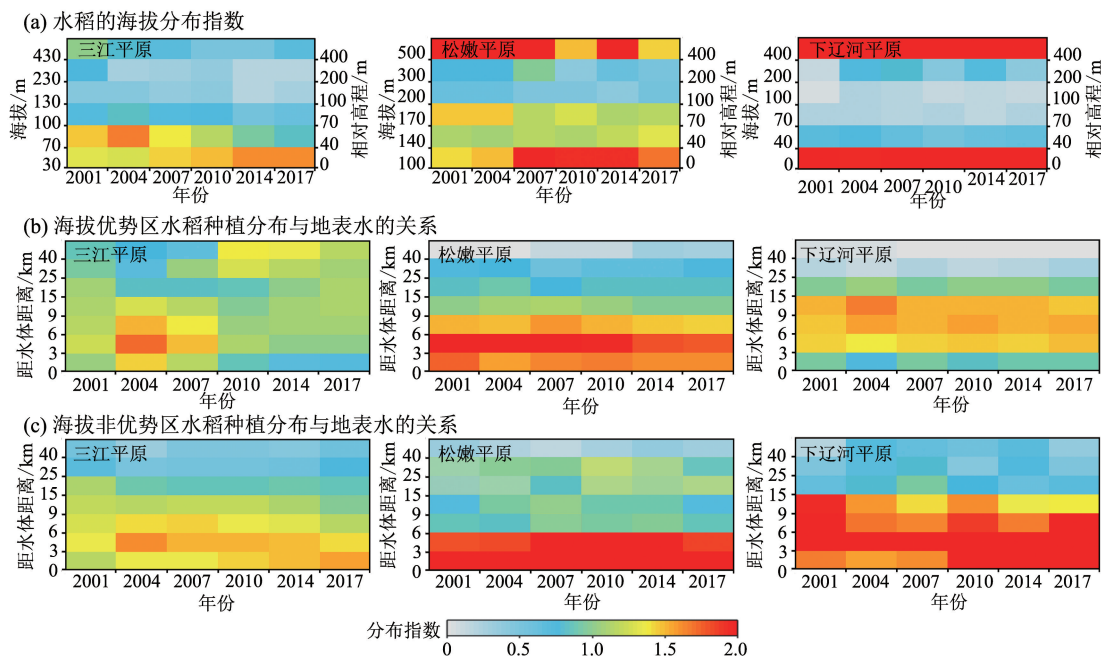


图2 2001—2017年水稻的分布指数差异性

Fig.2 Differences in distribution index of rice, 2001–2017

布优势在与地表水体距离0~3 km范围内最强。因此,三江平原和下辽河平原水稻种植面积的大幅扩张和集中分布使其受地表水体的限制较小,而松嫩平原在海拔优势区间内受地表水体影响较大,这与

该区域为开发利用盐碱地,在地表水体丰富地区实施了“以稻治碱”的措施有一定关系^[25]。

在海拔非优势区中,同样是松嫩平原水稻分布与地表水体关系更密切。与三江平原和下辽河平

原相比,在距地表水体距离0~6 km范围内,2001—2017年松嫩平原水稻分布指数非常稳定,始终保持在2.0左右,而在6 km以外水稻分布几乎不占优势,反映了与地表水体的密切关系(图2c)。通过分析海拔优势区间和非优势区间内水稻分布与地表水体的关系发现,水稻分布在非优势区间内与地表水体距离的关系更密切,但松嫩平原水稻分布在整个海拔区间内都表现出与地表水体的密切关系。

3.4 水稻的扩张趋势分析

2001—2017年东北地区水稻种植面积变化中,三江平原水稻种植面积急剧扩张,占东北地区总扩张面积的60%,而耕地面积不足东北地区总耕地面积的20%,地势低平、土壤肥沃为水稻扩张提供了优越的地理条件。在三江平原,水稻形成了“片状”分布的形式,并不断向东北方向发展(图3a, A),使东北地区水稻重心从哈尔滨市尚志市(44.84°N、128.52°E)偏移到方正县(45.82°N、129.10°E),约124 km。近年来全球气温变暖,积温相对增加,水稻种植北界发生北移东扩,为水稻不断向东北方向发展提供了适宜的温度条件^[11,26]。另外,温室膜的使用以及耐冷性水稻新品种的培育也提高了水稻农业的适应性^[27]。但三江平原水稻种植集中分布和急剧扩张不容忽视,水稻扩张在与地表水体距离15 km以外更占优势(图3b, $P>1$),并不受地表水体的

限制,为满足灌溉条件需依赖于农田水利建设。而有效灌溉面积是反映农田水利建设的重要指标,据统计,2001—2017年黑龙江省有效灌溉面积增加3.5倍,这势必对水资源利用等产生一定影响。目前地下水超采问题已日益严重,为保障农业可持续发展,相关部门应充分评估水资源承载力,再考虑水稻产业的发展,并采用新型灌溉模式提高水资源利用率等。

松嫩平原水稻扩张约占东北地区总扩张面积的30%,主要分布在地表水体附近,形成了沿河流的“树状”分布形式。水稻扩张优势随着距地表水体距离的增加而减少(图3b),在0~3 km范围水稻扩张优势最大,反映了与河流的密切关系。2001—2017年,松嫩平原水稻有向海拔200 m(相对高度100 m)以上扩张的趋势,而水稻扩张优势随着海拔的上升逐渐趋向于距地表水体更近的区域,从图中也可以看出水稻往往沿河流分布(图3a, C)。但是,部分地区水稻扩张远离河流(图3a, B),需要借助水利建设等工程来满足水稻灌溉条件。近年来松嫩平原水稻种植面积不足其耕地面积的10%,而松嫩平原耕地面积占东北地区总耕地面积的40%以上,虽然该区域水稻的发展在一定程度上受土壤盐碱化影响,但通过合理开发,未来将可能成为水稻产业发展最具潜力的土壤资源,特别是与地表水体距

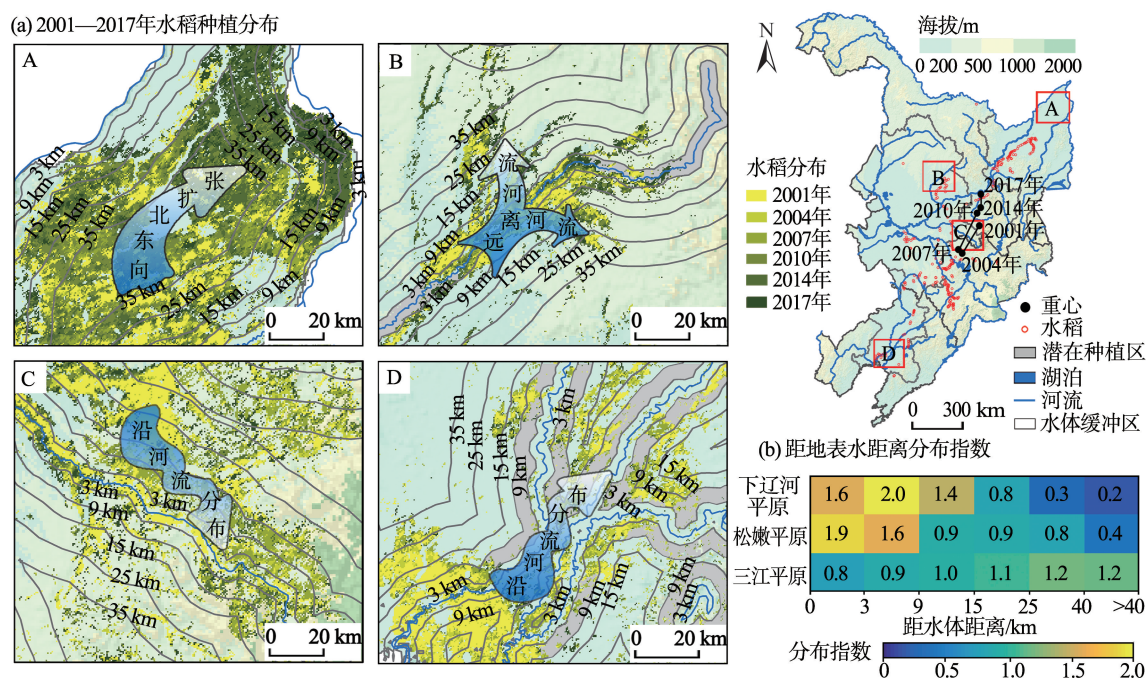


图3 2001—2017年水稻种植区域变化趋势

Fig.3 Change trend of rice planting area, 2001–2017

离0~3 km范围。

下辽河平原水稻扩张面积不足东北地区总扩张面积的5%,水稻种植区逐渐向东北方向移动,而东北方向地势相对较高,但水稻分布与河流关系也越密切(图3a, D)。在与地表水体距离3~9 km范围水稻扩张优势最大,该区域具有非常大的水稻发展潜力(图3b)。

4 结论

本文基于东北地区水稻种植分布结果,结合海拔和水体分析水稻分布的海拔优势区间及受水体影响的差异性。研究表明,2001—2017年东北地区水稻大幅扩张,扩张面积超过100%。其中,三江平原占60%左右,使水稻重心向东北方向偏移。海拔影响东北地区水稻分布的空间格局,同时影响水稻生长所需水分条件的再分配,进而在不同海拔范围内,水稻受地表水体的影响存在很大的空间分异,东北地区水稻扩张优势发生在海拔200 m范围内,随着海拔的上升水稻扩张与地表水的关系越来越密切。21世纪初,因三江平原水稻种植面积在海拔30~70 m范围的大幅扩张,海拔优势区间从30~100 m缩减至30~70 m,由相对高度70 m缩减至40 m内,集中分布和急剧扩张使水稻分布优势逐渐远离地表水体,这势必对地下水产生严重影响,相关部门应充分评估水资源承载力,再考虑水稻产业的发展,以防增加水资源匮乏危险。而松嫩平原水稻分布优势发生在相对高度100 m内,其分布及扩张与地表水体关系更密切,虽然土壤盐碱化对水稻发展存在一定程度的影响,但通过结合新型栽培技术等,未来将可能成为最具潜力的土壤资源。本文研究为东北地区水稻格局变化的机理机制研究奠定基础,有利于调整和优化水稻生产结构、保障农业可持续发展,也可为政府部门制定相关政策等提供科学依据。

参考文献(References)

[1] Bouvet A, Toan T L. Use of ENVISAT/ASAR wide-swath data for timely rice fields mapping in the Mekong River Delta [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(4): 1090-1101.

[2] Xiao X M, Boles S, Froliking S, et al. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-tem-

poral MODIS images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(1): 95-113.

[3] Qin Y W, Xiao X M, Dong J W, et al. Mapping paddy rice planting area in cold temperate climate region through analysis of time series Landsat 8 (OLI), Landsat 7 (ETM+) and MODIS imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 105: 220-233.

[4] Xia T, Wu W B, Zhou Q B, et al. Spatio-temporal changes in the rice planting area and their relationship to climate change in northeast China: A model-based analysis [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7): 1575-1585.

[5] Foley J A, Ruth D, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, 309: 570-574.

[6] 张莉, 吴文斌, 杨鹏, 等. 黑龙江省宾县农作物格局时空变化特征分析 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3227-3237. [Zhang Li, Wu Wenbin, Yang Peng, et al. Temporal and spatial changes in crop patterns of Binxian County in Heilongjiang Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3227-3237.]

[7] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近30年中国农作物种植结构时空变化分析 [J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 840-851. [Liu Zhenhuan, Yang Peng, Wu Wenbin, et al. Spatio-temporal changes in Chinese crop patterns over the past three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 840-851.]

[8] 徐苏, 张永勇, 窦明, 等. 长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(4): 426-436. [Xu Su, Zhang Yongyong, Dou Ming, et al. Spatial distribution of land use change in the Yangtze River Basin and the impact on runoff. *Progress in Geography*, 2017, 36(4): 426-436.]

[9] 王琛智, 张朝, 张静, 等. 湖南省地形因素对水稻生产的影响 [J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 184-200. [Wang Chen-zhi, Zhang Chao, Zhang Jing, et al. The effect of terrain factors on rice production: A case study in Hunan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 184-200.]

[10] Hu Q, Wu W B, Xia T, et al. Exploring the use of Google Earth imagery and object-based methods in land use/cover mapping [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11): 6026-6042.

[11] 陈浩, 李正国, 唐鹏钦, 等. 气候变化背景下东北水稻的时空分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2571-2579. [Chen Hao, Li Zhengguo, Tang Pengqin, et al. Rice area change in Northeast China and its correlation with climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*

- gy, 2016, 27(8): 2571-2579.]
- [12] Gao J, Liu Y S. Climate warming and land use change in Heilongjiang Province, Northeast China [J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 476-482.
- [13] Li Z G, Tang H J, Yang P, et al. Spatio-temporal responses of cropland phenophases to climate change in Northeast China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22: 29-45.
- [14] 余方琳, 翟石艳, 王铮, 等. 基于SPI的1960—2012年西南地区水稻生长季干旱时空特征分析 [J]. *地理科学*, 2018, 38(5): 808-817. [Yu Fanglin, Zhai Shiyang, Wang Zheng, et al. Spatial and temporal variation characteristics of drought during rice growth based on SPI in Southwest China from 1960 to 2012. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 808-817.]
- [15] Zu L J, Q S, Liu K B, et al. Rice cultivation changes and its relationships with geographical factors in Heilongjiang Province, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(10): 2274-2282.
- [16] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 142-154.
- [17] Dong J, Xiao X, Zhang G, et al. Northward expansion of paddy rice in northeastern Asia during 2000–2014 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(8): 3754-3761.
- [18] Zhang G L, Xiao X M, Biradar C M, et al. Spatiotemporal patterns of paddy rice croplands in China and India from 2000 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 82-92.
- [19] 方修琦, 盛静芬. 从黑龙江省水稻种植面积的时空变化看人类对气候变化影响的适应 [J]. *自然资源学报*, 2000, 15(3): 213-217. [Fang Xiuqi, Sheng Jingfen. Human adaptation to climate change: A case study of changes in paddy planting area in Heilongjiang Province. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(3): 213-217.]
- [20] Qiu B W, Li W J, Tang Z H, et al. Mapping paddy rice areas based on vegetation phenology and surface moisture conditions [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 56: 79-86.
- [21] Qiu B W, Lu D F, Tang Z H, et al. Mapping cropping intensity trends in China during 1982–2013 [J]. *Applied Geography*, 2017, 79: 212-222.
- [22] 孙丽, 陈焕伟, 潘家文. 运用DEM剖析土地利用类型的分布及时空变化: 以北京延庆县为例 [J]. *山地学报*, 2004, 22(6): 762-766. [Sun Li, Chen Huanwei, Pan Jiawen. Analysis of the land use spatiotemporal variation based on DEM. *Journal of Mountain Research*, 2004, 22(6): 762-766.]
- [23] Huang J K, Wang X B, Rozelle S. The subsidization of farming households in China's agriculture [J]. *Food Policy*, 2013, 41(41): 124-132.
- [24] Song K S, Wang Z M, Du J, et al. Wetland degradation: Its driving forces and environmental impacts in the Sanjiang Plain, China [J]. *Environmental Management*, 2014, 54(2): 255-271.
- [25] 王志春, 李取生, 李秀军, 等. 松嫩平原盐碱化土地治理与农业持续发展对策 [J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 161-163. [Wang Zhichun, Li Qusheng, Li Xiujun, et al. Saline-alkali land management and countermeasures of sustainable agricultural development in Songnen Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 161-163.]
- [26] Song Y L, Wang C Y, Ren G Y, et al. The relative contribution of climate and cultivar renewal to shaping rice yields in China since 1981 [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015, 120(1): 1-9.
- [27] Wei X J, Jiang L, Xu J F, et al. Genetic analyses of heading date of Japonica rice cultivars from Northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(2): 147-154.

Optimal elevation interval of rice expansion in Northeast China

HUANG Yingze^{1,2,3}, QIU Bingwen^{1,2,3*}, HE Yuhua^{1,2,3}, ZHANG Ke^{1,2,3}, ZOU Fengli^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education,

Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. National Engineering Research Center of Geospatial Information Technology, Fuzhou 350116, China;

3. The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350116, China)

Abstract: Timely acquisition for the spatiotemporal distribution information of rice planting is very important for adjusting and optimizing the structure of agricultural production. Based on the elevation and surface water data, we used a rice field mapping method that takes into consideration of vegetation phenology and surface water variations to carry out the research of spatiotemporal dynamics of paddy rice in Northeast China from 2001 to 2017. Through the verification at 899 survey sites, the overall accuracy of data reached 90.66% and the Kappa coefficient was 0.8128. The results indicate that: 1) At the beginning of the 21st century, the rice planting area in Northeast China decreased slightly at first and then increased continuously. In 2017, the rice planting area reached 2.13 times of that in 2001. About 60% of the rice planting expansion area was distributed in the Sanjiang Plain, 30% in the Songnen Plain, and less than 5% in the Lower Liaohe Plain. The dominant altitude range of rice planting expansion was within 200 m. With the increase of altitude, the relationship between rice planting expansion and surface water was getting closer. 2) Because the rice planting expansion in the Sanjiang Plain was increasingly more extensive at an altitude of 30–70 m, the dominant range was reduced from a relative altitude of 70 m to 40 m. In addition, the optimal rice planting area was gradually moving away from surface water bodies. However, the dominant altitude range of rice distribution in the Songnen Plain and the Lower Liaohe Plain was relatively stable. They were always at a relative altitude of 100 m and 40 m. 3) The concentrated distribution and rapid expansion of rice planting in the Sanjiang Plain led to the gradual shift of the optimal distribution area of rice planting away from surface water bodies, which will bring more pressure on groundwater. The distribution of rice planting in the Songnen Plain was greatly affected by surface water, and its distribution advantage decreased with increasing distance from surface water bodies. This study provides data support and a theoretical reference for the agricultural sector to assess water resources carrying capacity and ensure the sustainable development of agriculture.

Keywords: rice planting; Northeast China; long time series; geographical factor; optimal area