

湖南省地形因素对水稻生产的影响

王琛智^{1,2}, 张朝^{1,2}, 张静^{1,2}, 陶福祿³, 陈一³, 丁洪⁴

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

摘要: 作为一种人工生态系统, 水稻的生产受自然条件和人为管理的共同影响。其中, 地形因素不仅决定了水稻生长必须的光热等资源的再分配, 而且还影响人类的农业管理活动。以中国水稻主产区中地形较为复杂的湖南省为研究对象, 基于多种数据, 从生态学的“格局—过程”思想出发, 讨论了地形因素对水田分布、水稻生长过程及水稻产量的影响。研究发现, 地形因素对水田分布的空间格局影响最为明显, 对水稻生长过程影响次之, 而对水稻产量影响较弱。在各地形因素中, 高程对于水稻生产的影响最为突出。研究结果还反映出地形因素造成了湖南省水田分布和热量分配在北部平原地区的不匹配, 政府部门应根据区域特征, 因地制宜采取措施, 提高该地区水稻生产效益。

关键词: 水稻生产; 地形因子; 空间自相关; 空间格局; 水稻物候

DOI: 10.11821/dlxb201809014

1 引言

作为世界上最大的水稻生产国和消费国^[1], 中国60%以上的人口以水稻为主食, 稻谷产量在中国粮食生产中居于首位。因此, 在全球变暖的背景下, 面对极端事件加剧、水资源分布失衡以及快速城市化扩张等不利因素, 全面评估影响水稻生产的各种因素, 科学指导水稻生产活动, 对于保证中国粮食安全具有非常重要的意义。

目前, 已有研究从不同尺度上讨论了气候、土壤、管理、政策等因素^[2-7]对中国水稻生产的影响。然而, 上述诸多研究关注的都是动态的自然或人为因素对水稻生产的影响, 而对于稳定少变因素的影响, 如地形, 研究尚不充分。地形因素作为影响人类生产生活的重要环境因子, 不仅直接影响到水稻生产活动的空间分布格局, 而且还通过影响区域的水、热、养分的再分配, 间接影响作物的产量和物候。相比国外已有研究^[8-10], 国内关于地形因素对水稻生产影响的研究主要关注以下两个方面: ① 地形对耕地分布及其动态变化的研究: 邱扬等讨论了黄土高原小流域耕地变化和地形的关系^[11]; 孙丽等基于地形分布指数刻画了北京延庆县耕地分布的空间特征^[12]; 韦乐章等分析了粤北山区地形因素对耕地分布动态变化的影响^[13]。② 很多研究着眼于小尺度地形对水稻生产要素的影

收稿日期: 2017-07-31; 修订日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新研究群体(41621061); 国家自然科学基金项目(31561143003, 41571493)

[Foundation: Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China, No.41621061; National Natural Science Foundation of China, No.31561143003, No.41571493]

作者简介: 王琛智(1992-), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事农业系统对全球变化的响应和适应研究。

E-mail: chen_zhiwang@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 张朝(1971-), 女, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业灾害、粮食安全以及环境风险方面的研究。

E-mail: zhangzhao@bnu.edu.cn

响。已有研究讨论了地形对光热资源分布^[14]、土壤养分分布^[15]、土壤水的传输和分布^[16]、农机设施利用^[17]等方面的影响。然而，上述第一类研究实质上更为关注地形因素对区域内土地利用变化和土地利用空间格局的影响，而农田只是作为其中一种土地利用类型被讨论；上述第二类研究更多着眼于地形对某一自然或人为因素（例如日照时长）的分析，而缺乏对直观反映作物生长表征因素例如物候期以及最终作物产量影响的分析。考虑到水稻的生产是农业生态系统的一种，因此，有必要从生态系统核心的“格局—过程”思想出发，从水稻生产空间分布、水稻生长过程以及最终产量三个方面更加全面地评估地形因素对水稻生产的影响。研究结果对于深刻理解地形因素和农业生态系统的关系，综合评价区域农业生产格局，优化作物种植布局具有非常重要的意义。

湖南是中国水稻生产大省，据国家统计局数据显示，2007-2016年湖南省水稻产量始终占我国水稻总产量的10%以上，双季稻产量始终占全国双季稻产量20%以上。相比于东北水稻种植区，湖南省地形更为复杂，地形因素与水稻生产关系也更为密切。因此，基于区域尺度和站点尺度数据，本研究以水稻生产的“环境—过程—结果”为思路，尝试全面分析湖南省地形因素对水稻生产的分布格局、生长过程以及水稻产量的影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区介绍

湖南省地处108°47'E~114°15'E、24°38'N~30°08'N，下辖13个市级行政单位（图1）。湖南地形复杂，东西南三面环山，中部丘陵起伏，北部为低缓平原，整体地貌呈现西高东低，南高北低，以洞庭湖为开口的马蹄形特征。湖南省位于亚热带湿润气候带，热量充足，此外，河网密布，水资源丰富。因此，湖南省非常适合水稻种植，尤其是双季稻种植。

2.2 研究数据介绍

为充分表征研究区地形特征，本文选择经修正的ASTER GDEM V2作为DEM数据来计算地形因子，其空间分辨率为30 m。土地利用数据选自中国科学院资源环境科学数据中心提供的2010年中国100 m分辨率土地利用现状遥感监测数据集^[18]，并依据其分类系统提取出湖南省水田栅格。此外，为研究地形因素和影响水稻生长的自然环境要素间的关系，本文基于1:100万中华人民共和国土壤图提取了湖南省土壤空间分布图^[19]。同时根据0.25°分辨率^[20]的逐日气象要素空间插值数据集获得了湖南省2010-2012年的日平均温度和日照时长。由于湖南省属于灌养区，因此在本文中不再考虑降水影响。

湖南省共计102个县级行政单位，由于县级尺度水稻产量数据获取较为困难，本文仅搜集整理了其中33个县级行政单位的2010-2012年水稻产量数据。数据来源于中国种植业信息网（<http://zzys.agri.gov.cn/>）和中国农村统计年鉴（2011-2013）^[21-23]。所选县级行政单位如图2a所示。研究中采用各县3年水稻单产产量的均值作为该县水稻产量。水

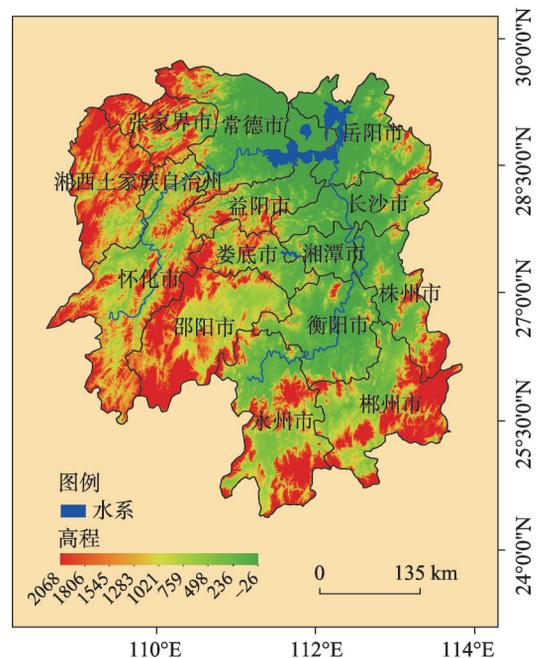


图1 湖南省地理位置及其地形特征

Fig. 1 The location of Hunan Province in China and its terrain

稻种植物候信息来自于中国气象局国家气象信息中心的农业气象站观测数据。鉴于湖南省单季稻种植面积少于双季稻, 本文仅以双季稻为研究对象。图2b中展示了湖南省有双季稻记录的农气站位置。

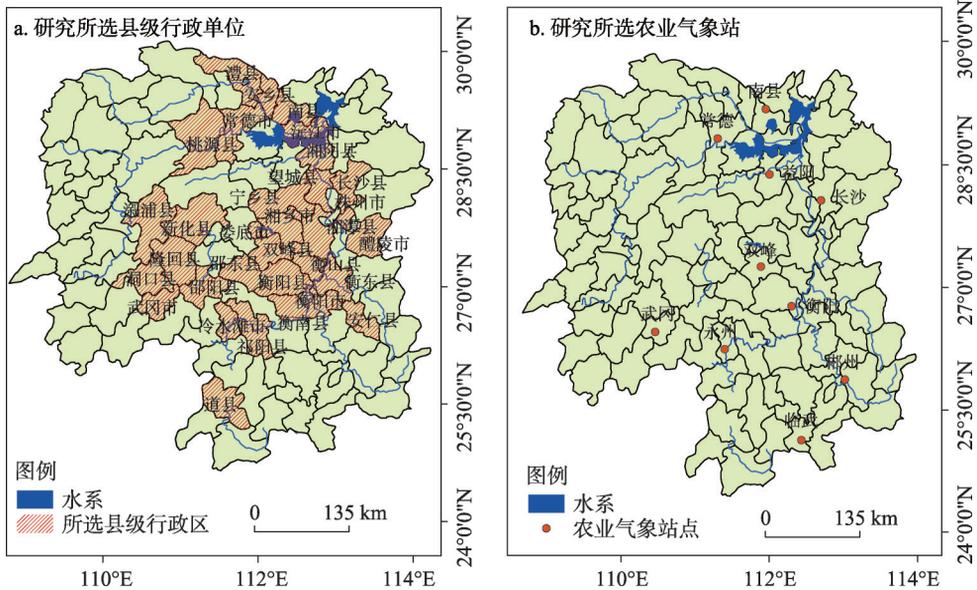


图2 所选县级单元分布和湖南省农气站分布

Fig. 2 Spatial distribution of selected counties and agricultural meteorological stations in Hunan Province

农气站记录的水稻物候期包括出苗、三叶、移栽、返青、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟和成熟共计10个阶段, 其中移栽、分蘖、抽穗和成熟为最为重要的4个阶段: 移栽期是水稻从秧田到水田转变的阶段; 分蘖期是水稻营养生长最为茂盛的时期; 抽穗期是水稻由营养生长向生殖生长过渡的阶段; 成熟期是水稻结实和收获的时期。因此, 选取了上述4个重要的水稻物候期作为研究对象。由于各地积温不同, 水稻出苗时间不同, 因此本文所提到的移栽、分蘖、抽穗和成熟为该地区某一物候期的记录日期减去该地区出苗记录日期的相对时间长度。

为减少水稻品种差异对分析的影响, 本文仅选择各农气站2010-2012年间杂交籼稻的记录。同时, 为减少不同品种熟制对结果的影响, 仅选择3年里熟制相同的记录(即统一为早熟品种或中熟品种), 将某站点3年水稻物候信息的均值作为该站点农气数据的物候信息, 部分信息如表1所示。

表1 部分湖南农业气象站双季稻物候记录(d)

Tab. 1 Some records of double cropping rice phenological information in Hunan Province (days)

站点	制度	移栽	分蘖	抽穗	成熟	分蘖—移栽	抽穗—分蘖	成熟—抽穗
常德	早稻	33	52	103	133	15	51	30
	晚稻	31	44	86	121	13	42	34
衡阳	早稻	32	44	85	116	12	41	31
	晚稻	22	31	75	114	9	44	40
武冈	早稻	28	53	93	112	17	40	29
	晚稻	32	42	73	110	11	31	37

2.3 研究方法

2.3.1 地形因子选择与提取 为有效描述和表达湖南地形特征，本文选取高程、坡度、坡向、地形起伏度、地形粗糙度和坡位共计6个地形因子。其中，高程和坡度是两个用来刻画地形特征的基本要素。坡向对于作物光照时长和接受的辐射强度有直接的影响。

地形起伏度是区域尺度刻画地形相对高程的指标，描述了区域尺度地形起伏状况，主要影响地表养分的分配情况，其计算公式如下：

$$RF_i = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中： RF_i 为*i*个栅格为中心的窗口内的相对高程差； H_{\max} 和 H_{\min} 为该窗口内的最大最小高程值。根据已有研究，结合本文数据源和研究区地形特征^[24]，选择59×59的矩形窗口，计算湖南省地形起伏度。

地表粗糙度是单位地表起伏复杂度与侵蚀程度的指标，一般用单位地表曲面面积与其在水平面上的投影面积之比来定义，代表了地表的破碎程度^[25-26]。其计算公式如下：

$$M = 1 / \cos(\theta \times \pi / 180) \quad (2)$$

式中： θ 为坡度数据。

坡位是衡量目标点所处地形垂直剖面的上下地点的指标，也是影响土壤养分的重要因素。本文中坡位依据地形位置指数（Topographic Position Index, TPI）计算得到^[27]。其基本原理是计算目标点与其领域高程平均值的差值，然后根据差值的正负大小来确定目标点的地形位置：

$$TPI = Z - Z^* \quad (3)$$

式中： Z 为研究点所处高程值； Z^* 为邻域高程值。由于TPI提取具有尺度依赖性，参考已有研究^[27]和湖南省地貌特点，选择11×11的矩形窗口计算TPI。根据目标点TPI指数与坡度，即可划分目标点的坡位。参考前人研究，分类标准^[27-28]如表2所示。根据上述结果，提取湖南省6种主要地形因子如图3所示。

已有研究指出，地形因子的提取具有尺度依赖性^[29]，其中坡度对DEM分辨率变化较为敏感^[30-31]，同时高程和坡度构成了区域地形的基本骨架^[32]。因此本文选择了湖南省8个典型样区，包括了平原、台地、丘陵和山地全部四种地貌类型，将30 m分辨率的DEM重采样至50 m、70 m、90 m和110 m计算样区的高程和坡度，来探究尺度变化对地形因子提取的影响是否显著。

2.3.2 地形因素与水田分布关系研究

水田的分布是水稻生产的基础，因此本文从省级和县级两个尺度上分别分析地形因素对水田分布的影响。

在省级尺度上，利用地形分布指数^[12]来比较水田在不同地形等级下的分布差异。水田的地形分布指数计算公式如下：

$$P = \left(\frac{S_{paddy} e}{S_{paddy}} \right) / \left(\frac{S_e}{S} \right) \quad (4)$$

式中： P 代表地形分布指数，是一个标准化无量纲的指数； e 代表某类地形因子； $S_{paddy} e$ 是*e*类地形因子某一等级水田面积； S_{paddy} 是水田总面积； S_e 是整个区域*e*类地形因子特定等

表2 坡位分类依据

Tab. 2 Classification criterion of slope position

类型	分类依据
山脊	$TPI > 1 \text{ SD}$
上坡	$0.5 \text{ SD} < TPI \leq 1 \text{ SD}$
中坡	$-0.5 \text{ SD} < TPI < 0.5 \text{ SD}$, $\text{Slope} > 5^\circ$
平坡	$-0.5 \text{ SD} < TPI < 0.5 \text{ SD}$, $\text{Slope} \leq 5^\circ$
下坡	$-1 \text{ SD} < TPI \leq -0.5 \text{ SD}$
山谷	$TPI < -1.0 \text{ SD}$

注：SD代表TPI与邻域像元的标准偏差值，Slope代表该点坡度值。

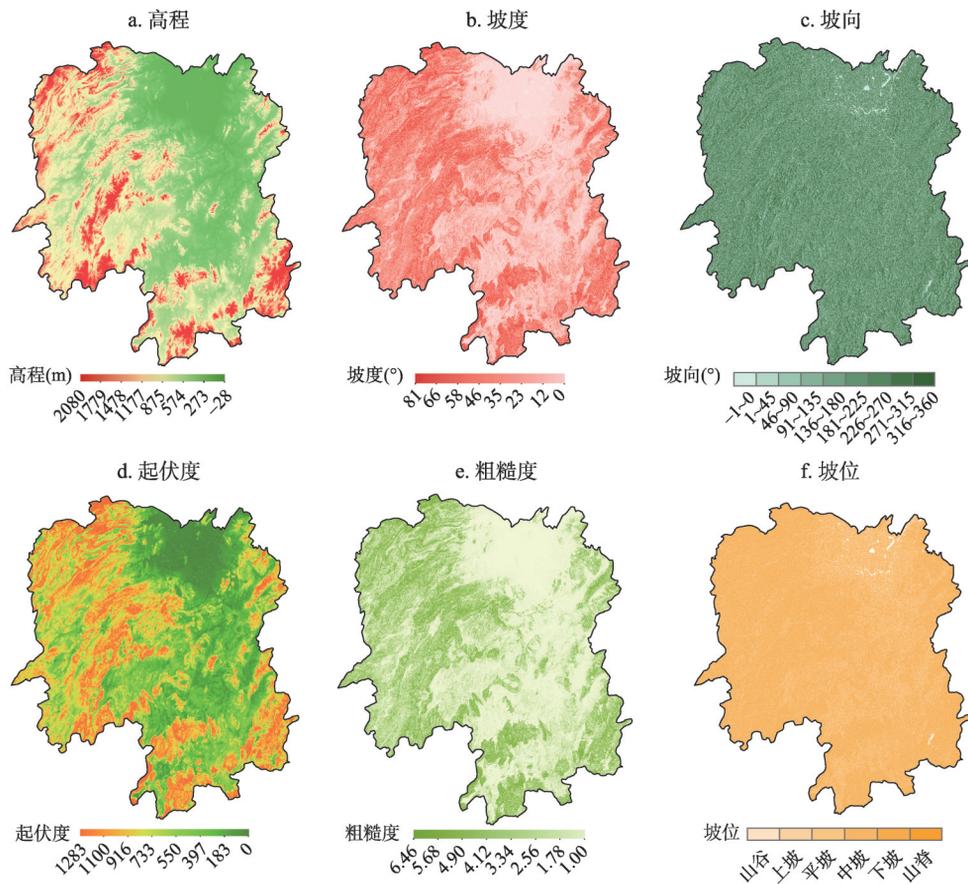


图3 湖南省主要地形因子提取结果

Fig. 3 Terrain factors of Hunan Province

级总面积； S 是区域总面积。 $P > 1$ ，说明水田在某一等级 e 类地形上的分布属于优势分布， P 越大，优势度越高，也就意味着水田在该级别地形上分布程度较高。根据已有研究^[33]和水稻生产本身的特征，将湖南省高程数据分为13级， > 1200 m和 < 100 m以下各分为一级， $100\sim 1200$ m高程每隔100 m分为一级；与之类似，将湖南省坡度也分为13级，其中 36° 以上分为一级， 36° 以下每隔 3° 分为一级。由于地形起伏度和地形粗糙度没有相关研究，因此本文中采用分位数法进行分隔，与高程和坡度相对应也分为13级。与上述4种地形因子不同，针对坡度，将其分为5级：平地、阴坡、半阴坡、阳坡和半阳坡；而坡位则分为山谷、上坡、平坡、中坡、下坡和山脊6级。这种分级能够更为明确地刻画辐射能量再分布和土壤养分（碳、氮等）再分布的影响。

在县级尺度的分析上，为能够比较不同县级行政单位的水田数量，本文用水田面积占全县面积之比作为衡量县级尺度水田数量的指标。首先统计102个县级行政单位内平均地形因子大小，然后计算县级水田面积占比与各类地形因子相关系数，选取其中相关性超过0.5的地形因子进行空间统计分析，从而在县级尺度上刻画水田的空间分布格局和地形因子的空间分布格局。由于无法量化坡向坡位在县级尺度上的平均特征，因此在县级尺度的分析上仅选择高程、坡度、起伏度和粗糙度4个因子。

在空间统计分析中，本文引入经典的Moran's I 和Getis-Ord G_i^* ^[34-35]来测度全局的空

间分布模式和热点区。分别计算水田分布和地形因子的Moran's I ，来探测地形因子和水田分布全局尺度空间关联的大小，接着计算Getis-Ord G_i^* 来识别水田分布和地形因子在不同空间位置上的高值簇（热点区）与低值簇（冷点区）。

2.3.3 地形因素与水稻生长过程关系研究 针对地形因素和水稻生长过程关系的研究分为两部分。首先是分析地形因素和影响水稻生长的环境因素之间的关系。根据逐日的平均温度和光照时长，逐格点计算湖南省水稻生育期内（4月-10月底）积温和累积光照长度，最终获得湖南省水稻生育期积温和累积光照的空间分布情况。通过比较气象要素、土壤要素、水稻分布和高程在湖南的空间分布情况来分析地形因素对水稻生长环境要素的影响。

其次是选择物候期作为直接反映水稻生长过程的指标，探究水稻生育期长度和地形之间的关系。由于水稻物候期信息是站点尺度数据，因此只需提取农气站所在栅格的地形要素信息，然后分别计算早稻和晚稻不同物候期与地形因素的相关性，选择相关性较大的因子和对应的物候期做逐步回归，最终得到水稻物候期和地形因素的回归方程。

2.3.4 地形因素与水稻产量关系研究 与分析县级尺度水田分布格局和地形因素关系类似，首先将各县水稻单产与各县地形因子均值进行相关分析，然后分别计算水稻单产和地形因子的Moran's I 和Getis-Ord G_i^* ，最终得到县级水稻产量和相应地形因子的空间分布格局。需要注意的是在讨论水稻产量与地形因素关系时，研究对象仅为具有县级水稻单产数据的33个县。

3 结果与分析

3.1 尺度效应对地形因子提取的影响

表3为不同DEM分辨率所提取的平均坡度和平均高程。从表3中可以看出，分辨率变化对地形因子提取的影响在不同地区略有不同，在平原，台地和山地地区坡度和高程的均值随着分辨率的增大有明显下降，同时整体较陡的山区的变化更为明显。这与很多已有研究一致^[28, 36]。但是在丘陵地区，例如常宁、永兴，平均坡度随着分辨率增大略有上升，这是由于分辨率增加，坡度图数据量减小，坡度极陡地区被概括趋向于平坦化，使得丘陵等次陡地区平均坡度增大。陈楠等^[37]的研究中指出黄土丘陵沟壑区也存在类似的现象，随着DEM分辨率的增加，坡度为 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的面积也增加。尽管DEM的尺度效应对平均坡度和平均高程有一定影响，但对于水稻种植较为集中的平原和台地地区，各地形因子的变化并不敏感。因此，针对本文主题，选择30 m DEM作为数据源，能够保证地形因子提取的精度。

3.2 地形因素和水田空间分布的关系

3.2.1 省级尺度水田空间分布格局 图4所示是湖南省水田在不同等级的各地形因子上的分布指数。从图4a可以看出，水田在海拔200 m以下分布指数大于1，在海拔200~300 m范围内接近1，此后随着海拔增高，指数逐渐减少，在海拔900 m以上，水田的分布指数接近于0。这一分布特征表明，湖南省水田大多分布在海拔300 m以下地区，在海拔300~900 m有零散分布，当海拔超过900 m时，几乎很少有水田分布，这与湖南省劳动力主要活动范围相匹配。从图4b可以看出，水田在坡度小于 9° 以下的分布指数大于1，随着坡度增加，指数逐渐减小并趋向于0，当地形坡度超过 24° 时，几乎没有水田分布。从图4c可以看出，水田在地形起伏度小于140 m的区域分布指数大于1，与高程和坡度类似，随着地形起伏度增加，分布指数逐渐减少，当起伏度超过400 m以上时，指数趋

表3 不同分辨率DEM对地形因子提取的影响

Tab. 3 Effect of DEM with different resolutions on terrain factors extraction

不同分辨率DEM所提取地面平均坡度(°)								
DEM 分辨率(m)	平原		台地		丘陵		山区	
	湘阴	沅江	长沙	株洲	常宁	永兴	东安	双牌
30	2.14	1.29	5.83	7.35	10.15	11.38	13.85	22.79
50	2.13	1.29	5.83	7.34	10.15	11.37	13.85	22.79
70	2.13	1.29	5.82	7.33	10.16	11.37	13.86	22.79
90	2.09	1.27	5.81	7.33	10.20	11.38	13.83	21.09
110	2.03	1.19	5.76	7.28	10.24	11.39	13.82	18.73

不同分辨率DEM所提取地面平均高程(m)								
DEM 分辨率(m)	平原		台地		丘陵		山区	
	湘阴	沅江	长沙	株洲	常宁	永兴	东安	双牌
30	32.71	29.14	77.52	94.25	195.60	245.63	549.14	389.59
50	32.70	29.14	77.51	94.22	195.01	245.56	549.09	389.76
70	32.70	29.14	77.50	94.13	195.00	245.46	548.91	390.20
90	32.70	29.14	77.52	94.09	194.26	245.46	548.74	390.76
110	32.70	29.14	77.51	94.10	194.24	245.50	548.70	390.53

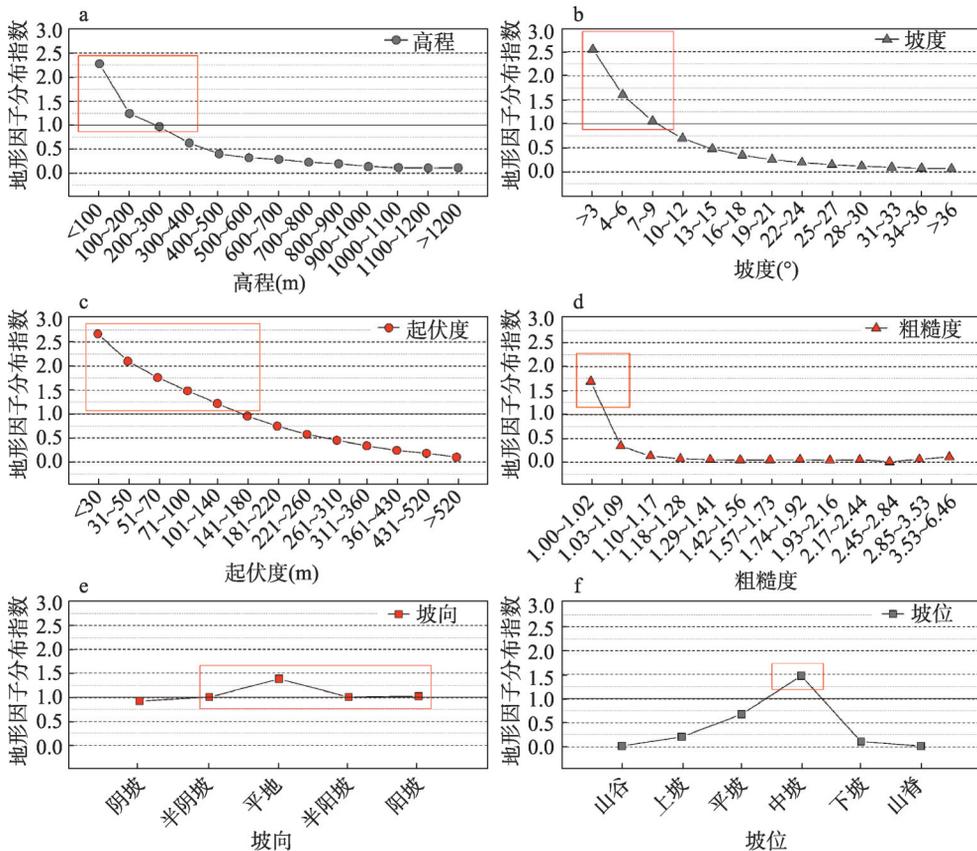


图4 湖南省水田的地形因子分布指数

Fig. 4 Terrain distribution index of rice paddy field of Hunan Province

近于0。从图4d中可以看出，水田分布对地表粗糙度要求比较高，一旦粗糙度超过1.02，水田分布会骤减，当地表粗糙度超过1.1以后，分布几乎为0。地表粗糙度反映了地表起伏的复杂程度和侵蚀程度，粗糙度越高说明地表起伏越复杂，受侵蚀程度越高。地形因素是影响土壤肥力的内驱力^[38-39]，过高的地表粗糙度可能会造成水田的水土流失进而引起土壤肥力的下降^[39]，因此粗糙度是限制水田分布的不可忽视的因素。图4e表示了不同坡向和水田分布指数之间的关系，可以看出，水田在平地地区分布更有优势。此外值得注意的是，除平地分布指数为1.5外，阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡的水田分布指数都在1.0附近，并没有明显差异，这表明水田的分布对坡向的变化并不敏感。相关研究也曾指出^[40]坡向因素对土壤养分的分布影响并不显著，这也可以用来解释水田分布对坡向因素依赖性低的现象。图4f表示了不同坡位和水田分布之间的关系，可以看出水田多分布在中坡和平坡地区，这主要是因为中坡和平地地形平坦开阔，水热充沛，有利于水稻种植和收割。

3.2.2 县域尺度水田空间分布格局

表4表明了县级尺度上，各地形因子和县级水田面积占比的相关系数。可以清晰地看出水田面积占比和4种地形因子都存在着显著的负相关关系。

从表5中能够发现湖南省水田面积占比和四种地形因子的Moran's *I*指数都大于0，水田面积占比、高程、坡度、起伏度和粗糙度的标准化Z得分均大于99%显著水平上的标准化Z得分阈值2.58，说明湖南省水田面积占比和所选的四类地形因子均呈现显著的空间自相关性，即上述各因子会表现出明显的空间聚集的分布模式。

图5展示了水田面积占比、高程、坡度、起伏度和粗糙度的各县级行政单元局域空间关联指数Getis-Ord G_i^* 。从整体上看，地形因素的空间分布热点区几乎相同，并且与水田面积占比的空间分布冷点区域接近一致，也就是说水田面积占比的空间分布格局和地形因素的空间分布格局呈现一种空间负相关特征。从图5中可以看出，对于水田面积占比，在湖南北部中部的存在一个明显的高值簇区（热点区），即在湖南北部和中部县级水田面积占比高，同时其周围县水田面积占比也较高；而在湖南西部、西南部、东南部3个方向各存在一个低值簇区（冷点区），即在这3个地区县级水田面积占比低，同时其周围县水田面积占比也较低。与之相反的是4种地形因素所呈现的空间聚集分别模式，冷点区出现在湖南省北部和中部地区而热点区出现在湖南省西部、西南部和东南部3个地区。此外，湖南西部桑植县、永顺县和保靖县等地区虽然高程因素的高值聚集并没有达到最高，但是坡度、起伏度和粗糙度都呈现出高值聚集的极高值，这反映出湖南西部地区较为复杂的地形并不仅仅由单一因素海拔所决定；与其情况相反的是湖南省南部的东安县，尽管该地区海拔较高，但是其粗糙度，起伏度和坡度并不处于高值聚集区，因此也有水田分布。综上，尽管湖南省水田分布格局和地形因素空间分布格局呈负向关联性，但是在湘西、湘南山区，还有部分差异。这些差异可能是由一个或几个地形因子造成的。

表4 地形因子和水田面积占比相关性

Tab. 4 Correlation between terrain factors and ratio of paddy field area to the whole county area

地形因子		高程	坡度	起伏度	粗糙度
水田面积占比	Pearson相关性	-0.782	-0.85	-0.811	-0.783
	P值	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

表5 县级行政单位水田面积比例和地形因子的Moran's *I*指数与检验

Tab. 5 Estimates of global Moran's *I* and their test for terrain factors and ratio of paddy field area to total area at county level

	水田面积占比	高程	坡度	起伏度	粗糙度
Moran's <i>I</i>	0.67	0.71	0.7	0.67	0.66
Z-Score	10.64	11.27	10.94	10.47	10.39
P值	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Z-Score 阈值	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58

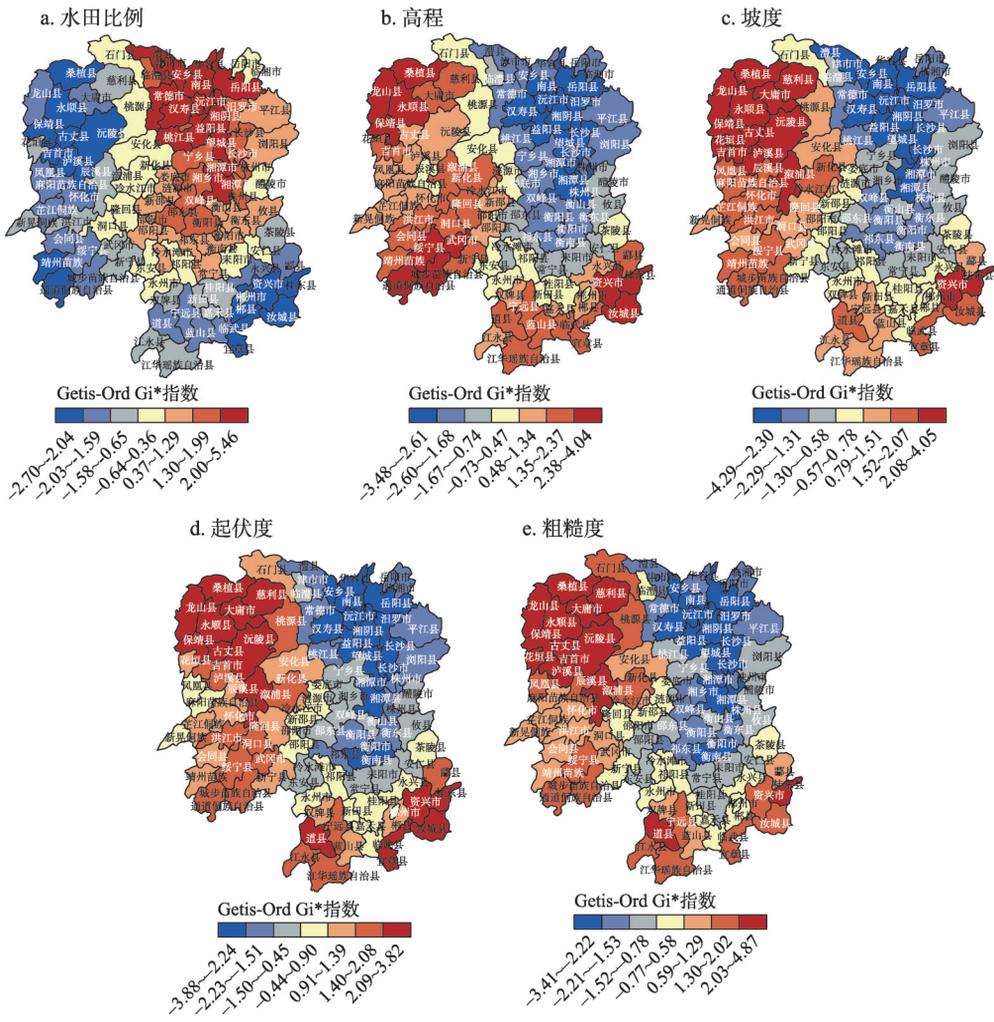


图5 湖南省各县水田面积占比和地形因素热点区分布图
Fig. 5 Hotspot map of paddy field area ratio and terrain factors of Hunan Province

3.3 地形因素和水稻生长过程的关系

地形因素对水稻生长过程的影响较为复杂，能够直接影响对水稻生长最重要的环境因素温度、光照时长的空间分布，同时也会影响土壤类型的分布^[29]。而这些因素会对水稻的生长过程例如物候期产生影响，最终影响水稻产量。因此，分析地形因素和水稻生产过程的关系一方面需要顾及地形和水稻生产基础环境因素的关系，另一方面也不应该忽视地形对水稻物候的直接影响。

3.3.1 地形因素和水稻生长环境因素的关系 基于逐日气象要素格点数据、土壤分布数据，得到了水稻生长环境要素空间分布图如图6所示。从图中可以看出水稻生育期（4月-10月底）累积光照（图6a）从湖南省东北部洞庭湖平原地区向四周逐渐减少，累积光照时长的分布和图6e湖南高程空间分布较为接近。而对比图6b和图6e能够看出，水稻生育期内积温空间分布与湖南省北部平原、中部和南部台地丘陵的空间分布几乎一致，这说明地形状况很大程度上决定地表热量的分布情况。结合土壤分布（图6c）和稻田分布（图6d）发现，湘北洞庭湖平原区主要为潮土和水稻土，中部、南部台地丘陵地区主

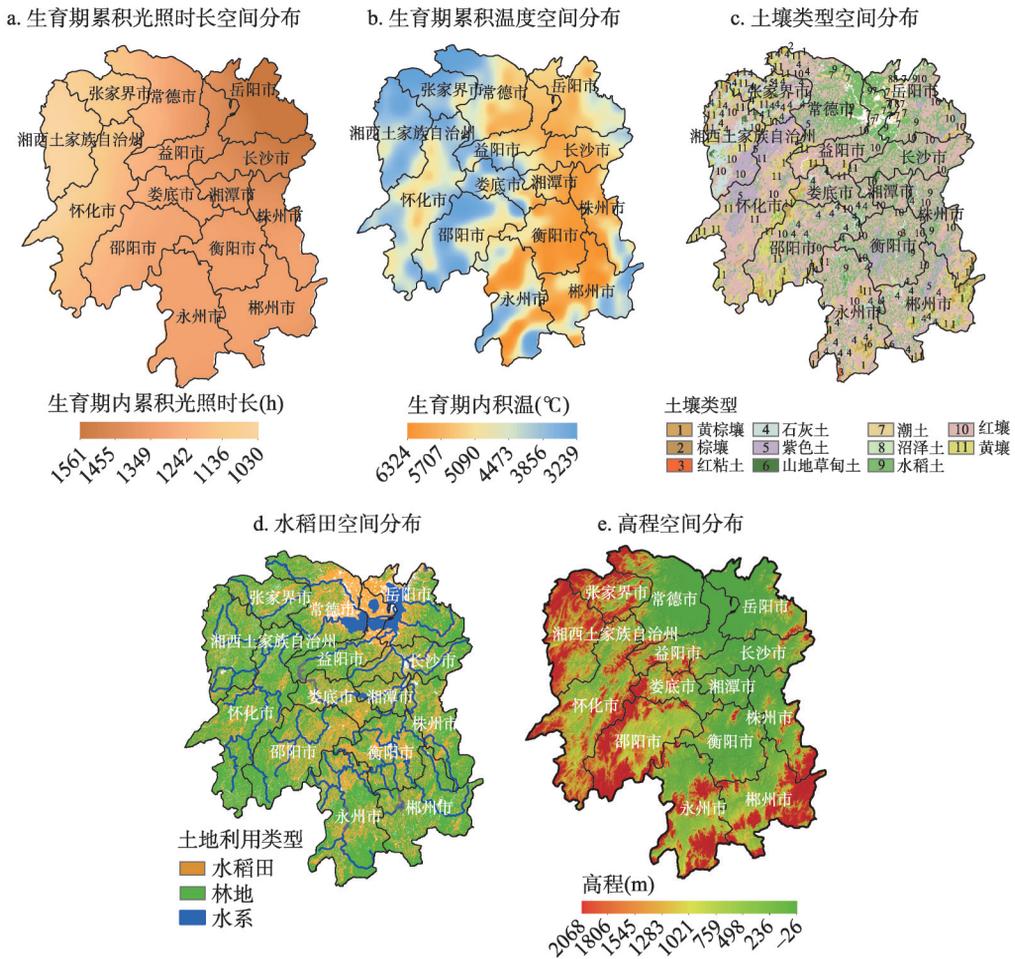


图6 湖南省水稻生长环境要素和地形空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of environmental factors of rice growth and the terrain factors in Hunan Province

要分布为水稻土和红壤。湘南丘陵山区多分布棕壤、黄棕壤和石灰土，也零散分布一些紫色土。湘西山区由于海拔较高，黄壤、棕壤、石灰土等分布较多，而鲜少水稻土。综上，地形因素通过影响气象要素和土壤类型的分布进而影响水稻生长过程。

3.3.2 地形因素和水稻物候期的关系 利用站点尺度的早晚稻物候信息与4种地形因素进行相关性分析，结果如表6所示，水稻的移栽和高程有负相关关系，即海拔越高，移栽相对长度越短。水稻的分蘖和地形坡度以及地表粗糙度都呈现负相关，也就是说地形越陡峭复杂，分蘖的相对时间越迟。

为进一步确定地形因素能否解释早稻物候期的相对变化，使用逐步回归，分别研究早稻移栽和高程的关系以及早稻分蘖和坡度、粗糙度的关系。结果发现，利用坡度、粗糙度和分蘖期回归得到的方程 R^2 为0.39，这说明虽然坡度和粗糙度同早稻分蘖存在相关关系，但是难以充分解释早稻分蘖的相对长度。而将早稻移栽和高程进行回归，最终得到早稻移栽和高程的关系如下所示：

$$y_{\text{移栽}} = -0.023 \times x_{\text{高程}} + 36.835 \quad (5)$$

回归方程的 R^2 为0.57，说明高程能够解释接近60%早稻移栽的变化。移栽期的回归

方程说明随着海拔降低,早稻移栽时间长度会延长。

表7所示为晚稻物候与地形因素的相关关系,从中可以看出,仅高程和抽穗、成熟呈现显著负相关关系,而与之对应的“抽穗—分蘖”的长度,“成熟—抽穗”的长度也和高程存在显著负相关关系。换言之,随着高程增加,抽穗、成熟提前,抽穗—分蘖、成熟—抽穗时间缩短。

根据相关分析结果,分别针对晚稻抽穗、晚稻成熟、晚稻的抽穗—分蘖间隔以及成熟—抽穗间隔运用逐步回归建立方程,结果发现高程对晚稻抽穗以及抽穗—分蘖间隔的解释并不理想, R^2 分别为0.398和0.342,都没有超过0.5。而对晚稻成熟和成熟—抽穗间隔解释较好,分别如下所示:

$$y_{\text{成熟}} = -0.07 \times x_{\text{高程}} + 129.81 \quad (6)$$

成熟期回归方程的 R^2 为0.59,表明高程因素很大程度上影响成熟期的变化。

$$y_{\text{抽穗-分蘖}} = -0.028 \times x_{\text{高程}} + 41.65 \quad (7)$$

成熟—抽穗的回归方程 R^2 为0.55,表明高程因素一定程度上能反映成熟—抽穗的变化。

总体而言,坡度、粗糙度和高程都跟水稻物候期有关,其中高程和水稻物候关系最为密切。对于早稻各物候阶段,高程因素对移栽有影响,随着高程增加移栽日期提前。此外,尽管坡度和粗糙度跟分蘖期有相关关系,但是不足以解释分蘖的变化。对于晚稻各物候阶段,高程对成熟以及成熟—抽穗间隔长度有影响,随着高程增加,成熟日期提前,成熟—抽穗长度缩短。

3.4 地形因素和水稻产量的关系

根据湖南省2010-2012年33个县级水稻单产数据的均值,计算其与高程、坡度、起伏度和地表粗糙度的相关性,结果如表8所示。从表8中可以看出,湖南省33个县的水稻单产和高程、起伏度、粗糙度存在着显著的负相关性,而单产和坡度的相关性并不显著。此外,水稻单产和高程的相关系数在5%的显著性水平上为-0.584,说明两者存在着比较明显的负相关性,而单产和地形起伏度、地表粗糙度虽然有显著的负相关,但相关性并不明显。总的来说,虽然地形因素和水稻单产存在一定关系,但是较地形因素和水田分布的关系以及和水稻物候期的关系,这两者的关系更弱。

表6 早稻物候和地形因素相关性

Tab. 6 Correlation between terrain factors and early rice phenology

早稻各阶段物候期相关系数	高程	坡度	起伏度	粗糙度
移栽	-0.75**	-0.10	-0.31	-0.13
分蘖	0.00	-0.69**	-0.33	-0.64**
抽穗	0.42	-0.67	0.30	-0.55
成熟	0.45	-0.35	0.43	-0.18
分蘖—移栽	-0.05	-0.38	-0.25	-0.42
抽穗—分蘖	0.43	-0.08	0.58	0.00
成熟—抽穗	0.23	0.37	0.40	0.53

注: **表示通过95%置信度检验的相关系数, *表示通过90%置信区间检验的相关系数; 移栽、分蘖等物候阶段都是某测站该物候阶段日期减去该测站出苗阶段日期所得的相对物候期长度。表中“分蘖—移栽”, “抽穗—分蘖”, “成熟—抽穗”代表了两个时期的相对间隔长度

表7 晚稻物候和地形因素相关性

Tab. 7 Correlation between terrain factors and late rice phenology

晚稻物候阶段	高程	坡度	起伏度	粗糙度
移栽	-0.15	0.07	-0.16	0.15
分蘖	-0.21	-0.04	-0.19	0.08
抽穗	-0.64**	-0.09	-0.54	-0.13
成熟	-0.77**	0.05	-0.37	0.01
分蘖—移栽	-0.21	-0.23	-0.13	-0.10
抽穗—分蘖	-0.67**	-0.08	-0.55	-0.25
成熟—抽穗	-0.67**	0.24	0.03	0.22

注: **表示通过95%置信度检验的相关系数, *表示通过90%置信区间检验的相关系数; 移栽、分蘖等物候阶段都是某测站该物候阶段日期减去该测站出苗阶段日期所得的相对物候期长度。表中“分蘖—移栽”, “抽穗—分蘖”, “成熟—抽穗”代表了两个时期的相对间隔长度

表9展示了水稻单产和高程的Moran's *I*指数。从表9中可以看出,33个县的水稻单产和高程的Moran's *I*都大于0,同时Z得分都超过了对应显著性水平上的阈值。这表明33个所选县的水稻单产和高程都呈现出聚集的空间分布格局。但是相比县级尺度的水田面积占比,县级水稻产量空间自相关的显著性水平及Z得分均较低,这说明与水田面积占比的空间分布格局相比,水稻产量空间格局的聚集性较弱。

图7是研究中所选县的水稻产量和高程的空间关联指数Getis-Ord *G_i^**分布。与图5类似,县级水稻产量的高值热点区和高程的冷点区的空间分布相一致,而水稻产量的冷点区和高程的热点区空间分布相一致,但是单产和高程的空间分布对应程度较弱。空间分布的对应在部分县存在着异常情况。首先洞庭湖北部的南县,尽管其处于高程冷点区,但是水稻单产也表现出低值。其次洞庭湖南部的湘阴县和益阳县均处于高程冷点区,但是水稻产量也没有表现出明显的高值聚集特征。最后是处于湖南中北部低缓丘陵带向湖南西部山区过渡的桃源县,不仅处于高程的热点区,也处于水稻单产的热点区。这说明水稻产量空间格局不仅受到地形因素的影响,而且其他因素(如环境条件、人工管理措施等)的影响可能更为突出,从而产生类似桃源县这种特殊的单产热点区。

表8 水稻单产和地形因素相关关系

Tab. 8 Correlation between terrain factors and rice yield

		高程	坡度	起伏度	粗糙度
水稻单产(kg)	Pearson 相关性	-0.584	-0.312	-0.381	-0.382
	<i>P</i> 值	< 0.05	> 0.1	< 0.1	< 0.1

表9 县级水稻单产数据和高程的Moran's *I*指数及检验

Tab. 9 Estimates of global Moran's *I* and their test for terrain factors and rice yield at county level

空间自相关分析指标	水稻产量	高程
Moran's <i>I</i>	0.54	0.83
Z-Score	2.27	3.37
<i>P</i> 值	< 0.05	< 0.01
Z-Score 阈值	1.96	2.58

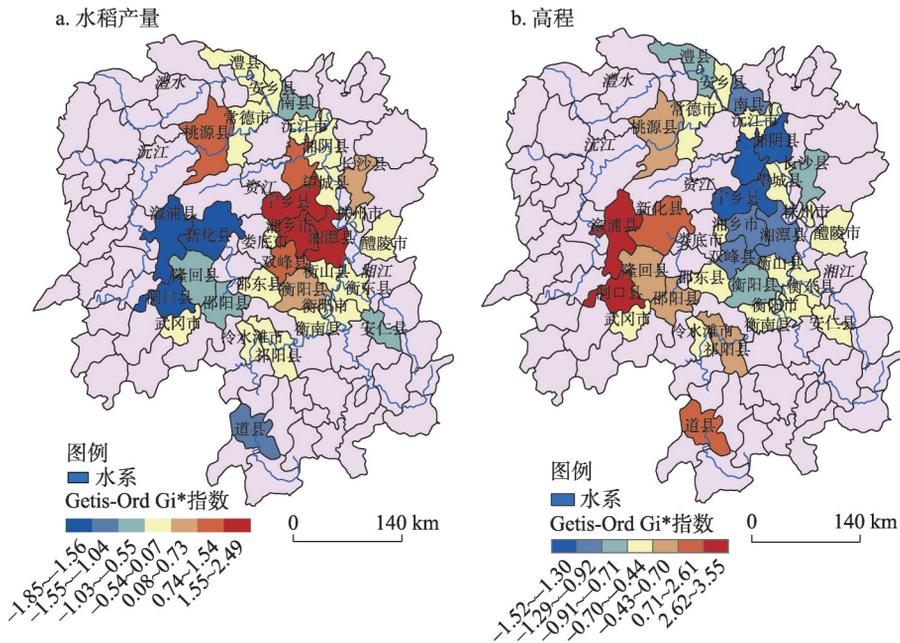


图7 湖南省县级水稻产量和高程因素热点区

Fig. 7 Hotspot map of rice yield at county level and hotspot map of elevation

4 讨论

4.1 地形因素对湖南省水田分布格局的影响

地形因素对湖南省水田空间格局的影响在省级尺度和县域尺度上都呈现出较为显著的特征。在省级尺度上,湖南省水田主要分布在海拔300 m以下,坡度小于 9° ,起伏度小于140 m的北部平原和中部低山丘陵的平坡地区。同时,湖南省的水田分布对于坡位和地表粗糙度较为敏感而对坡向因素较不敏感。虽然已有研究强调了湖南省坡向对植被的影响^[41],但本文结果说明水稻的生产对坡向并没有特殊要求,人工管理可以减少坡向对土壤养分造成空间各向异性所带来的问题^[42]。在县域尺度上,县级行政单位的水田面积占比和高程、坡度、起伏度以及粗糙度都呈现负相关关系,此外,水田面积占比和上述4类地形因素都存在着较为显著的空间自相关性,在空间分布上都呈现出高度聚集的空间格局;同时水田面积占比的空间分布格局与地形因子分布格局表现出了明显的负向关联性。

4.2 地形因素对水稻生长环境因子的影响

水稻是喜好温湿的短日照作物。由于湖南省水稻多使用移栽方式栽培,水稻生长并不缺水,因此温度和光照是影响该地区水稻生产的直接因素。地形因素直接影响到温度和光照在空间上的分配情况:生育期内积温和累积光照时长的空间分布均与湖南省整体海拔情况一致。尽管北部洞庭湖平原地区地势平坦,适合水稻大面积种植。但积温分布表明,湘中和湘东长沙、湘潭、株洲和衡阳等地的温度条件更好。已有研究指出,湘潭和株洲的水稻单产水平高于湘北常德岳阳地区^[43]。同时,其余环境要素的作用也不可忽略:湘西地区的怀化市,地貌类型多为丘陵台地,平均海拔400~800 m,该地区生育期积温超过 5000°C ,满足种植双季稻的基本条件,但是怀化地区却少有水稻分布。其原因除了生育期累积光照时长不充足外,怀化地区土壤条件也不利于水稻生长:怀化地区主要分布为紫色土和黄棕壤,相比更易栽培水稻的水稻土和红壤^[44],紫色土成土母质疏松,需要修筑梯田才能满足移栽需求。因此,地形因素对水稻生长过程的影响,其实质是通过影响若干水稻生长环境因子的空间格局分布实现的。

4.3 地形因素对水稻物候期的影响

相比气象要素和土壤类型,水稻物候期的长度能够更为直接的反映水稻的生长过程。研究结果表明,高程、坡度、粗糙度和双季稻物候期有一定关系。其中,高程对早稻移栽、晚稻成熟以及晚稻抽穗一成熟的间隔长度有影响。对于早稻移栽期,在海拔较高的地区,由于受到光热条件的限制,如果移栽期过晚,将会导致难以正常收获早稻并影响种植晚稻,因此海拔越高,移栽期越早。而高程对晚稻的影响主要体现在成熟期,因为高海拔地区温度较低,为避免低温使得水稻抽穗一成熟阶段不够充分,灌浆不够彻底^[45],高海拔地区收获时间相比平原地区要早,这也能从另一方面解释高海拔地区水稻单产较低的现象。

4.4 地形因素对水稻产量的影响

湖南省地形因素对水稻产量的影响相比对水田分布和对物候期的影响较弱,在4种地形因子中,仅高程因素和水稻单产存在着显著的负相关性。与水田分布类似,水稻单产产量也呈现空间聚集的分布格局,同时也表现出与高程空间格局的负向关联性。但是,对比水田分布的空间格局和高程的空间分布格局,本文发现水稻单产的空间分布格局存在一些“异常区”:水稻单产较高地区往往是水田分布次高的地区和高程的中值区(如宁乡县、湘乡县、桃源县),这是由于这些区域光温条件和人工管理条件较水田分布

密集的平原(如洞庭湖地区)更优。综合地形因素对水田分布和水稻生长过程的影响能够看出,湖南省水稻产量面临的问题主要是稻田分布空间格局和稻田单产空间格局的不匹配问题:湘北环洞庭湖平原地区水田集中连片分布较广,但由于热量分配问题,其单产较湘中、湘东丘陵地区低,难以实现水稻的高效规模化生产。因此,在北部平原地区,应该根据光热条件特点选择耐春寒型早稻品种和耐秋寒型晚稻品种,同时加强田间管理措施,提高田间单产,实现对产量在空间格局上的优化配置。

4.5 不足与展望

需要指出的是,本文仍然存在一些局限性。首先,县级尺度的水稻产量数据仍不够全面。本文在探究水稻产量和地形因素关系时仅收集到33个县的单产数据,进一步研究需要结合地方统计数据,完善县级产量数据;其次是对水稻生产过程中的非环境因素缺乏考虑,化肥使用量,农药用量,农机使用等田间管理因素也会影响水稻生产以及最终产量,但是在县级尺度这些数据仍难以获取,未来考虑和地方农业部门合作,获得更为细致详实的田间管理数据进一步分析田间管理和地形因素的关系。

5 结论

基于站点尺度和区域尺度的多源数据,本文综合运用空间分析和统计方法,以“环境—过程—结果”为主线,探讨了地形因素对水田分布、水稻生产过程和水稻单产的影响。研究表明,地形因素直接影响了湖南省水田分布的空间格局,同时影响了水稻生长所必需的光温条件和土壤等要素的空间格局,进而影响了水稻的生产过程。而在这个过程中,地形因素造成了湖南水稻生产资源分配在空间格局上的不匹配:湘北平原区水田分布集中,但由于热量条件限制,水稻单产低于中部丘陵地区,难以突出水稻生产的规模化效益。因此相关政府部门应因地制宜地采取措施,根据区域特点确定相应的种植品种和种植模式,实现水稻生产资源的优化配置。

参考文献(References)

- [1] Bao Yunxuan, Liu Wei, Gao Ping, et al. Study on characteristics of rice heat damages in jiangsu province under the background of climate warming and its influence on the rice yield. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2): 289-296. [包云轩, 刘维, 高苹, 等. 气候变暖背景下江苏省水稻热害发生规律及其对产量的影响. *中国农业气象*, 2012, 33(2): 289-296.]
- [2] Wang Chen'ai, Wang Bolun, Zhang Wenxiang, et al. Effects of water stress of soil on rice yield and quality. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1): 131-137. [王成瑗, 王伯伦, 张文香, 等. 土壤水分胁迫对水稻产量和品质的影响. *作物学报*, 2006, 32(1): 131-137.]
- [3] Zhang J, Yao F, Hao C, et al. Impacts of temperature on rice yields of different rice cultivation systems in southern China over the past 40 years. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2015, 87/88: 153-159.
- [4] Wang P, Zhang Z, Song X, et al. Temperature variations and rice yields in China: Historical contributions and future trends. *Climatic Change*, 2014, 124(4): 777-789.
- [5] Peng S, Tang Q Y, Zou Y. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3-8.
- [6] He Fan, Huang Jiangliang, Cui Kehui, et al. Effect of real-time and site-specific nitrogen management on rice yield and quality. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 123-132. [贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 123-132.]
- [7] Yu Guoping, Zhu Hongying. Status analysis and development countermeasures of rice production in China. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(6): 122-126. [虞国平, 朱鸿英. 我国水稻生产现状及发展对策研究. *现代农业科技*, 2009(6): 122-126.]

- [8] Persson A, Pilesjö P, Eklundh L. Spatial influence of topographical factors on yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Central Sweden. *Precision Agriculture*, 2005, 6(4): 341-357.
- [9] Kravchenko A N, Bullock D G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Semigroup Forum*, 2000, 92(92): 75-83.
- [10] Cihra A J. Slope position and grain yield of soft white winter wheat. *Agronomy Journal*, 1984, 76(2): 193-196.
- [11] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatio-temporal distribution of land use in relation to topography in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 20-29. [邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用的时空分布及其与地形因子的关系. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 20-29.]
- [12] Sun Li, Chen Huanwei, Pan Jiawen. Analysis of the land use spatiotemporal variation based on DEM: Beijing Yanqing County as an example. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(6): 762-766. [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. *山地学报*, 2004, 22(6): 762-766.]
- [13] Wei Lezhang, Deng Nanrui, Wu Zhifeng, et al. Effects of topography on distribution and change of farmland in mountainous area of North Guangdong Province, China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(1): 76-83. [韦乐章, 邓南荣, 吴志峰, 等. 粤北山区地形因素对耕地分布及其动态变化的影响. *山地学报*, 2008, 26(1): 76-83.]
- [14] Yang Xin. DEM based simulation on solar radiation and temperature and its application in agriculture [D]. Xi'an: Northwest University, 2004. [杨昕. 基于DEM的地面光热资源模拟与农业应用[D]. 西安: 西北大学, 2004.]
- [15] Wang Yunqiang, Zhang Xingchang, Li Shunji, et al. Spatial variability and the relationships of soil mineral N and topographic factors in a small watershed. *Environmental Science*, 2007, 28(7): 1567-1572. [王云强, 张兴昌, 李顺姬, 等. 小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究. *环境科学*, 2007, 28(7): 1567-1572.]
- [16] Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The influence of topography land use on soil moisture spatial-temporal pattern in the hilly area of Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 334-342. [黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 334-342.]
- [17] Zhou Jing, Chen Yuping, Ruan Dongyan. Effect of terrain condition on regional imbalance development of agricultural mechanization. *Chinese Rural Economy*, 2013(9): 63-77. [周晶, 陈玉萍, 阮冬燕. 地形条件对农业机械化发展区域不平衡的影响: 基于湖北省县级面板数据的实证分析. *中国农村经济*, 2013(9): 63-77.]
- [18] Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [19] National Soil Survey Office. 1: 1, 000, 000 Soil Mapping of China. Xi'an: Geological Publishing House, 1995. [全国土壤普查办公室. 1: 100万中华人民共和国土壤图. 西安: 地质出版社, 1995.]
- [20] Yuan W P, Xu B, Chen Z Q, et al. Validation of China-wide interpolated daily climate variables from 1960 to 2011. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015, 119(3/4): 689-700.
- [21] Department of Rural Survey, NBS. *China Rural Statistical Yearbook (2013)*. Beijing: China Statistics Press, 2013. [国家统计局农村社会经济调查司. *中国农村统计年鉴(2013)*. 北京: 中国统计出版社, 2013.]
- [22] Department of Rural Survey, NBS. *China Rural Statistical Yearbook (2012)*. Beijing: China Statistics Press, 2012. [国家统计局农村社会经济调查司. *中国农村统计年鉴(2012)*. 北京: 中国统计出版社, 2012.]
- [23] Department of Rural Survey, NBS. *China Rural Statistical Yearbook (2011)*. Beijing: China Statistics Press, 2011. [国家统计局农村社会经济调查司. *中国农村统计年鉴(2011)*. 北京: 中国统计出版社, 2011.]
- [24] Zhang Wei, Li Ainong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in China based on DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(4): 8-12. [张伟, 李爱农. 基于DEM的中国地形起伏度适宜计算尺度研究. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(4): 8-12.]
- [25] Jia Tengbin, Wu Faqi, Zhao Longshan, et al. Micro-relief slope surface complexity characteristics of sloping farm land under different tillage practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 152-156. [贾腾斌, 吴发启, 赵龙山, 等. 坡耕地上耕作形成的微地形复杂度特征与分析. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 152-156.]
- [26] Tang Guo'an, Liu Xuejun, Lv Guonian. *Digital Elevation Model and Principles and Methodology in Geographical Analysis*. Beijing: Science Press, 2006. [汤国安, 刘学军, 闫国年. *数字高程模型及地学分析的原理与方法*. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [27] Weiss A. *Topographic Position and Landforms Analysis*. San Diego, CA: ESRI User Conference, 2001.
- [28] Gong Miao. The uncertainty of topographic wetness index derived from DEM in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015. [龚秒. 基于DEM的地形湿度指数不确定性研究: 以陕北黄土高原为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.]

- [29] Tang Guo'an. Progress of DEM and digital terrain analysis in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305-1325. [汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展. *地理学报*. 2014, 69(9): 1305-1325]
- [30] Tang Guo'an, Zhao Mudan, Li Tianwen, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEM in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824-830. [汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM提取黄土高原地面坡度的不确定性. *地理学报*. 2003, 58(6): 824-830.]
- [31] Yang Cunjian, Zhao Xilin, Zhou Qilin, et al. Analysis of scale effect characteristics of DEM and slope in hilly areas. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(6): 814-818. [杨存建, 赵曦琳, 周其林, 等. 丘陵地区DEM与坡度的尺度效应分析. *地球信息科学学报*, 2013, 15(6): 814-818.]
- [32] Zhou Qiming, Liu Xuejun. *Digital Terrain Analysis*. Beijing: Science Press, 2006. [周启鸣, 刘学军. *数字地形分析*. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [33] Liang Fachao, Liu Liming. Analysis on distribution characteristics of land use types based on terrain gradient: A case of Liuyang City in Hunan Province. *Resource Science*, 2010, 32(11): 2138-2144. [梁发超, 刘黎明. 基于地形梯度的土地利用类型分布特征分析: 以湖南省浏阳市为例. *资源科学*, 2010, 32(11): 2138-2144.]
- [34] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [35] Jin Cheng, Lu Yuqi. Evolvement of spatial pattern of economy in Jiangsu Province at county level. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(6): 713-724. [靳诚, 陆玉麒. 基于县域单元的江苏省经济空间格局演化. *地理学报*, 2009, 64(6): 713-724.]
- [36] Niu Liang. Relationship between slope and resolution: A case study on hill zones in Loess Plateau [D]. Xi'an: Northwest University, 2010. [牛亮. 坡度与分辨率关系研究: 以黄土丘陵区为例[D]. 西安: 西北大学, 2010.]
- [37] Chen Nan, Tang Guoan, Zhu Hongchun. The study on the uncertainty of slope information derived from DEM with different spatial resolutions. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3): 153-156. [陈楠, 汤国安, 朱红春. 不同空间分辨率DEM提取坡度不确定性研究. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 153-156.]
- [38] Zhang Sumei, Wang Zongming, Zhang Bai, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 188-194. [张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 188-194.]
- [39] Zhan Linqing. Study on variability of paddy soil nutrients and evaluation of paddy soil fertility [D]. Chongqing: Southeast University, 2009. [詹林庆. 水田土壤养分变异特征及肥力评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.]
- [40] Zhang Jizong, Chai Yanliang, Feng Lixiao, et al. GIS-based study on spatial variability of soil characteristics in north-west plateau of Hebei. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2008, 31(5): 24-28. [张继宗, 柴彦亮, 冯立肖, 等. 基于GIS的冀西北高原土壤性状空间变异性研究. *河北农业大学学报*, 2008, 31(5): 24-28.]
- [41] Wang Zhiheng, Chen Anping, Fang Jingyun. Richness of seed plants in relation with topography in Hunan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 889-894. [王志恒, 陈安平, 方精云. 湖南省种子植物物种丰富度与地形的关系. *地理学报*, 2004, 59(6): 889-894.]
- [42] Zhang Shunping, Qiao Jie, Sun Xiangyang, et al. Effects of slope aspect and slope position on spatial distribution of soil nutrients of paulownia fortunei plantation. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2015(1): 109-116. [张顺平, 乔杰, 孙向阳, 等. 坡向, 坡位对泡桐人工林土壤养分空间分布的影响. *中南林业科技大学学报*, 2015(1): 109-116.]
- [43] Qing Xianguo, Ai Zhiyong. On regional distribution of rice cultivation in Hunan Province. *Research on Agricultural Modernization*, 2007, 28(6): 704-708. [青先国, 艾治勇. 湖南水稻种植区域化布局研究. *农业现代化研究*. 2007, 28(6): 704-708.]
- [44] Xi Chengfan. *Soil Taxonomy*. Beijing: China Agricultural Press, 1994. [席承藩. *土壤分类学*. 北京: 中国农业出版社, 1994.]
- [45] Liu Xiaofei, Zhang Zhao, Shuai Jiabing, et al. Effect of chilling injury on rice yield in Heilongjiang Province. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1223-1232. [刘晓菲, 张朝, 帅嘉冰, 等. 黑龙江省冷害对水稻产量的影响. *地理学报*, 2012, 67(9): 1223-1232.]

The effect of terrain factors on rice production: A case study in Hunan Province

WANG Chenzhi^{1,2}, ZHANG Zhao^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, TAO Fulu³, CHEN Yi³, DING Hu⁴

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Rice is the staple food in China and its production is impacted jointly by natural environment and human activities. In this process, terrain condition not only determines the spatial pattern of environmental factors, such as water, heat and radiation, but also affects the agricultural management measures. Although many studies focused on the impact of one or several specific factors on crop production, few studies investigated the direct influence of terrain condition on rice production. Therefore, we selected Hunan Province, one of major rice producing areas in China with complex terrain conditions, as the study area. Based on the remote sensing data and statistical data, we applied the spatial statistical analysis to explore the effects of terrain factors on the rice production from the following three aspects: spatial pattern of paddy field, rice production process and the final yield. We found that: (1) Terrain has a significant impact on the spatial distribution of paddy field at both regional and county scales. Most paddy fields are located on the northern plain and central hills where the elevation is generally below 300 meters with the slope less than 9° and relief degree less than 140 meters. Also, the spatial pattern of paddy fields in Hunan is sensitive to surface roughness and slope position. (2) Terrain does determine the distribution of temperature, sunlight and soil, and these three environmental factors consequently have direct impact on rice growth. Additionally, several terrain factors (elevation, slope and surface roughness) are related with the phenological stage of double-cropping rice, especially for elevation, which is closely associated with the planting stage for early rice and harvesting stage for late rice. (3) However, compared with the pattern of paddy field and rice production process, the influences of terrain factors on the rice yield are not so evident except for elevation. (4) There is a spatial mismatch between spatial distribution of paddy field and production resources due to terrain factors: although paddy fields are widespread in the northern plain, the yield in this region is lower than that in the hilly area of central Hunan due to limited heat. Our results highly imply that the managers should guide farmers to choose suitable variety and planting system and allocate rice production resources in the northern plain so as to ensure food security.

Keywords: rice production; terrain factors; spatial autocorrelation; spatial pattern; rice phenology