

基于地理探测器的山区作物生产潜力指数修正研究

杨永侠^{1,2} 张 函¹ 郭雅萍¹ 张丽红¹ 桑 婧¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083;

2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 运用地理探测器的方法,以青海省海东市平安区及其周边共 70 个县级行政单位为研究对象,探测地形、气象因素不同分层方式对生产潜力指数的解释力,并对指定作物生产潜力指数进行修正。结果表明:研究区内,显著影响作物生产潜力指数的因素为海拔和年均降雨量;研究区内海拔对作物光温生产潜力指数解释力最高的分层方式为以 1 100 m 为基数、200 m 为间隔,年均降雨量对作物光温生产潜力指数解释力最高的分层方式为以 0 mm 为基数、100 mm 为间隔;海拔对作物气候生产潜力指数解释力最高的分层方式为以 1 100 m 为基数、200 m 为间隔,年均降雨量对作物气候生产潜力指数解释力最高的分层方式为以 25 mm 为基数、50 mm 为间隔。平安区验证分层结果表明,作物光温生产潜力指数与耕地质量等级年度更新调查评价工作中使用的光温生产潜力指数与修正前相比有不同程度降低;气候生产潜力指数与耕地质量等级年度更新调查评价工作中使用的气候生产潜力指数与修正前相比有不同程度升高;按照本文方法对作物生产潜力指数进行修正后,水浇地的自然等别整体下降,旱地的自然等别整体上升。

关键词: 作物生产潜力指数; 地理探测器; 分层修正

中图分类号: S162; F319.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0267-08

Correction of Crop Production Potential Index in Mountainous Area Based on Geodetector

YANG Yongxia^{1,2} ZHANG Han¹ GUO Yaping¹ ZHANG Lihong¹ SANG Jing¹

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality, Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The cultivated land quality grading results are an important reference for the implementation of the trinity protection of cultivated land quantity, quality and ecology. Crop production potential index is one of the most important parameters in the evaluation of cultivated land quality, and its accuracy determines the scientific nature of the survey results of cultivated land quality grades in China. By using the method of geodetector, a total of 70 counties, including Ping'an county and its surrounding counties were used as research objects to detect the interpretation of production potential index by different stratification methods of topography and meteorological factors, and revise the production potential index of appointment crop. The key results were as follows: in the study area, the factors that significantly affected the crop production potential index were altitude and annual average rainfall; the stratification method of altitude with the highest explanatory power for crop light temperature production potential index was based on 1 100 m, and 200 m as interval; the stratification method of annual average rainfall with the highest explanatory power for crop light temperature production potential index was based on 0 mm, and 100 mm as interval; for the climate production potential index, the stratification method of altitude with the highest explanatory power was based on 1 100 m, and 200 m as interval, and the stratification method of annual average rainfall was based on 25 mm, and 50 mm as interval. According to the correction result of Ping'an county, the crop light temperature production potential index was reduced to a different extent compared with the light temperature production potential index used in cultivated land quality grade survey and evaluation; while the climate production potential index was generally rose. Using the model proposed, natural grade of non-irrigated cultivated land was rose overall, but natural grade of irrigated cultivated land was reduced in different extents.

Key words: crop production potential index; geodetector; correction stratified

0 引言

耕地质量等级调查评价成果是基本农田调整划定、耕地差别化管理的首要依据^[1-2],是我国落实耕地数量、质量、生态三位一体保护的重要参考依据,是实现耕地数量-质量占补平衡,落实耕地质量管理的重要依据。根据文献[3]中规定的方法,作物生产潜力指数是我国农用地分等工作的基础参数之一^[4],其准确性在一定程度上决定了我国耕地质量等级调查评价成果的科学性。国内学者关于生产潜力指数的研究多集中在利用模型对不同尺度地区进行生产潜力指数估算或分析^[5-8],以及根据气候变化对生产潜力指数造成的影响进行研究或预测^[9-12]等方面。在耕地质量等级调查评价工作中,针对生产潜力指数划分最小尺度(即县级行政单位)下的地形或气候对作物生产潜力指数的影响及修正研究尚不多见。

鉴于耕地质量等级调查评价工作对生产潜力指数科学性和精细化的需求,本文在原耕地质量评价体系的基础上,提出一种基于地理探测器的山区作物生产潜力指数修正方法,以期提高耕地质量等级评价的准确性。

1 研究方法

作物生产潜力指数修正方法主要步骤为:分析生产潜力指数的测算过程,结合已有研究初步筛选影响因素;通过回归分析确定显著影响因素;不断调整分层方式,比较地理探测器计算的不同分层方式下显著影响因素对生产潜力指数的解释力,得到每一显著影响因素的最大解释力并以该种分层方式作为这一显著影响因素的最优分层方式;计算各显著影响因素对生产潜力指数的解释力归一化值作为该显著因素的权重;最后依据层内生产潜力指数和影响因素权重计算修正的生产潜力指数。作物生产潜力指数修正流程如图1所示。

1.1 自然因素对作物生产潜力的影响

我国农用地分等体系中使用的作物生产潜力指数计算采用在作物光合生产潜力基础上对温度、含水率以及光照强度等因子逐级订正的模型。数据基础是国家气象局在全国范围内设立的气象站点的观测数据。决定作物生产潜力指数的各项“作物生产潜力测算参数”既有大尺度的辐射回归系数,即华南地区、华中(西南)地区、华北(东北)地区、西北地区全国四大区所对应的辐射回归系数;也有小尺度的各区县气象站的气象数据如年均降雨量、温度、水

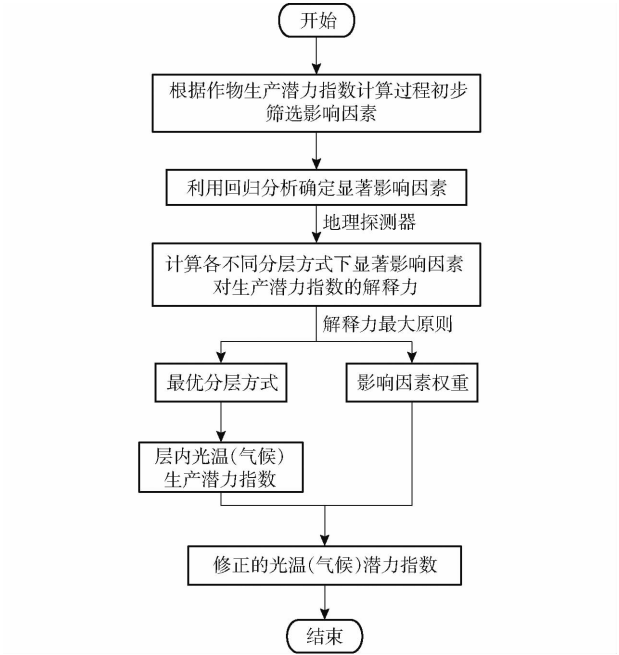


图1 作物生产潜力指数修正流程
Fig.1 Flow chart of correction for crop potential productivity

汽压等。经过各种尺度参数综合计算之后,所得生产潜力指数只代表各区县气象站点所在地形区的状况,反映的是气象站点所在地的农业气候资源状况^[13]。

国内有研究揭示了作物生产潜力指数与某些自然因素的联系^[14-17]。本文选取海拔、坡度、坡向和年均降雨量与光温(气候)生产潜力指数进行相关性分析,筛选相关性显著的因素对生产潜力指数进行修正。

通过回归分析筛选影响因素,选择线性回归、对数回归、二次回归3种方式,分析中 $R^2 > 0.1$ 且通过显著性水平 $p < 0.05$ 的假设检验的因素确定为显著影响因素。

1.2 地理探测器应用

地理探测器是研究地理环境因素对疾病分布影响的方法^[18-20],其原理是基于因变量应与其产生决定性影响的自变量在空间分布上具有显著一致性的假设。其中,因变量可以是数值量也可以是类型量,自变量只能为类型量,自变量划分出的不同类型即不同的层^[21]。近几年来,地理探测器被广泛应用于研究土地利用变化^[22-23]、景观^[24-25]、生态^[26-27]以及农村经济^[28-29]等问题的机理。地理探测器从因子探测、风险探测、生态探测和交互探测4个方面对因变量和自变量之间的关系进行探测。本文主要应用地理探测器的因子探测功能。

因子探测:探测每个影响因子对生产潜力指数的解释力,表达式为

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \tag{1}$$

式中 h ——根据作物生产潜力指数或其影响因子的差异划分的层序号
 n_h ——层 h 内研究对象个数
 L ——划分的个数
 n ——全区研究对象个数
 σ_h^2 ——层 h 的作物生产潜力指数的总方差
 σ^2 ——全区的作物生产潜力指数的总方差

根据因子探测的原理,本研究对地理探测器进行逆向应用,即确定影响较大的因素后,不断调整因素的分层方式,记录地理探测器测算的解释力,选择解释力最高的分层方式作为最优分层结果。

目前地理探测器常见分层方式有:①专家经验法。组织相关领域的专家学者对因素进行分析,提出分层意见。②等间隔分层法。将影响因素属性进行等间隔划分类别,每个间隔内的对象划分为同一层。③数据聚类法。使用 K-means 等聚类算法对影响因素进行分层。本文选用第 2 种方法,客观且简单易行。

1.3 生产潜力指数修正方法

在确定影响因素及其最优分层结果后,计算层间平均生产潜力指数作为该层生产潜力指数。当多因素同时影响,则利用归一化后的各因素对生产潜力指数的解释力作为该因素权重,解释力 q 越大则权重越大,通过该因素修正的生产潜力指数可信度越高。生产潜力指数计算公式为

$$\varepsilon_t = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \omega_i \tag{2}$$

其中
$$\omega_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \tag{3}$$

式中 ε_t ——未知点的生产潜力指数
 ε_i ——未知点受第 i 种因素影响的层间平均生产潜力指数
 q_i ——第 i 种因素在最优分层情况下对生产潜力指数的解释力
 ω_i ——第 i 种因素在最优分层情况下对生产潜力指数产生影响力的权重

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

平安区坐落在青海省东部,海东市中心腹地,地处 101.82°~102.17°E、36.25°~36.57°N 之间,东临海东市乐都区,南与化隆县相邻,西连省会西宁市和湟中县,北隔湟水河与互助县相望,南北相距

33.6 km,东西相距 33.69 km,辖区总面积 769 km²。全区辖 8 个乡镇,共 111 个行政村、7 个社区^[30]。县域内大部分地区为山地,地形复杂,沟壑纵横,湟水河自西向东流经全境,地势南高北低,由西南向东北倾斜,大部分地区海拔在 2 066~3 000 m 之间,海拔最高处为 4 166.7 m,最低处为 2 066 m,相对高差 2 100.7 m,耕地分布在海拔 2 066~3 300 m 之间。

平安区属于大陆性气候,年平均日照时长为 2 711 h,日均 7.4 h。年平均气温 7.3℃,最热月平均气温 18.7℃(7 月);最冷月平均气温 -6.2℃(1 月)。年内降雨分布不均,常年各地区降雨量 240~550 mm,年均降雨量 338.5 mm,年均蒸发量 1 845.9 mm,为年均降雨量的 5.5 倍。

平安区内耕地面积为 11 987.96 hm²,水浇地主要分布在平安区东北部海拔较低的沟谷地带,仅占全区耕地总面积的 26%;南部、西部大片耕地均为无法保证灌溉的旱地,约占全区耕地总面积的 74%。最新一期耕地质量年度评价成果显示,平安区内耕地的国家自然等为 11~13 等,耕地质量整体处于较低水平。

2.2 数据来源

本文基础数据主要包括研究区域内各区县气象站点的地形、气象数据。其中,海拔、坡度和坡向等地形数据是基于 GIS 平台对 GDEMDEM 30 m 分辨率数字高程模型进行坡度分析和坡向分析后提取得到;70 个气象站点的降水数据来源于中国气象局与中国气象科学数据共享服务网提供的国家级气象站点地面气候资料日值数据集;平安区各耕地县级分等单元的降水数据是利用平安区气象站点观测数据和测土配方施肥项目的降水监测数据获取的;所有区县的光温(气候)生产潜力指数摘录自 GB/T 28407—2012 农用地质量分等规程附录中生产潜力指数速查表。

3 平安区作物生产潜力修正

3.1 数据预处理

平安区标准耕作制度为油菜、春小麦,熟制为一年一熟,基准作物和指定作物均为春小麦,作物生产潜力指数为春小麦的生产潜力指数。在生产潜力指数修正阶段选取参考样本时,同时考虑了标准耕作制度二级区和地形的影响,最终选取海拔 1 500~3 500 m、基准作物为春小麦的区县,在平安区周边筛选出甘肃省、青海省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区共 70 个区县的春小麦生产潜力指数。

获取的 70 个区县数据中,指定作物生产潜力指数分布如图 2 所示,其中光温生产潜力指数最高值

为甘肃省兰州市市辖区 1 744,最低为青海省门源回族自治县 780;气候生产潜力指数最高值为青海省互助土族自治县 1 072,最低为甘肃省民勤县 150。所选取区县的气象站点坡度在 1.43°~33°之间,海拔在 1 225.7~3 663.6 m 之间,年降雨量在 58~700 mm 之间。

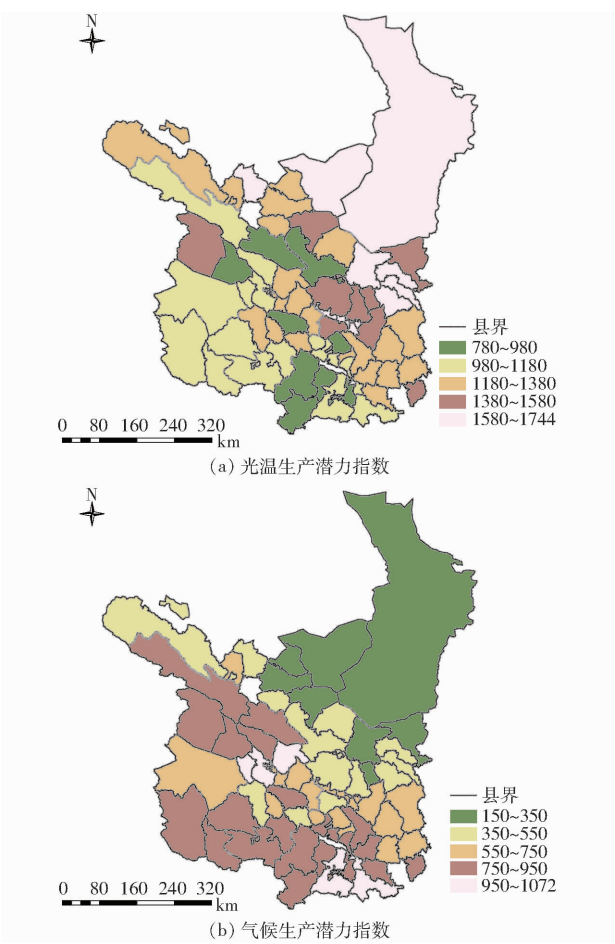


图2 邻近区县作物生产潜力指数分布
Fig.2 Distribution of crop production potential index of surrounding counties

3.2 显著影响因素确定

依次对研究区海拔、坡度、坡向、年均降雨量与作物生产潜力指数进行回归分析,筛选相关性大的因素作为作物生产潜力指数修正因素。筛选标准为 3 种回归模型的决定系数 R^2 均大于 0.1 且 p 小于 0.05。

筛选结果如表 1 所示,坡向与光温生产潜力指数和气候生产潜力指数回归 R^2 小于 0.1,坡度与光温生产潜力指数回归 p 大于 0.05,与气候生产潜力指数回归 R^2 小于 0.1。排除坡度和坡向为作物生产潜力指数的显著影响因素;海拔和年均降雨量与光温生产潜力指数和气候生产潜力指数的回归结果符合筛选标准,选择海拔和年均降雨量为作物生产潜力指数修正的主要影响因素。

表 1 影响因素-生产潜力指数回归结果

Tab.1 Regression result of influencing factor and crop production potential index

影响因素	光温生产潜力指数		气候生产潜力指数	
	R^2	p	R^2	p
海拔	≥ 0.630	$\leq 2.69 \times 10^{-9}$	≥ 0.338	$\leq 2.39 \times 10^{-7}$
坡度	≤ 0.170	≥ 0.326	≤ 0.098	≥ 0.009
坡向	≤ 0.100	≥ 0.387	≤ 0.080	≥ 0.071
年均降雨量	≥ 0.346	$\leq 6.71 \times 10^{-8}$	≥ 0.559	$\leq 6.64 \times 10^{-14}$

在农用地分等体系中,作物生产潜力指数的计算涉及作物生长期内光照条件、温度、水汽压、作物需水量等因素。在研究区内,海拔的变化对温度的影响显著;在旱地,降雨量直接影响作物的生长;但是在作物生产潜力指数计算模型中,光照条件的量化方式为利用作物生长季内各月平均大气上界日辐射量(纬度每隔 1°使用同一值)和当地气象站点记录的月平均日照百分率通过经验公式计算当地作物生长期内各月的总辐射量,该计算方法得出的辐射量数据尺度较大且无法考虑地形对于光照的影响,因此回归分析结果显示坡度和坡向与作物生产潜力指数不存在显著相关性。

3.3 最优分层方式

经过回归分析可以确定,显著影响光温和气候生产潜力指数的因素均为海拔和年均降雨量。利用地理探测器探测海拔、年均降雨量在不同分层方式下对指定作物光温和气候生产潜力指数的解释力,选择解释力最大时的分层方式作为最优分层方式。为了提高本方法的普适性,便于分级,结合耕地质量调查评价分段划等的等别确定方式,以固定步长调整分层基数和分层间隔。

通过测试可得海拔不同分层方式对生产潜力指数的解释力影响,可以确定海拔对光温生产潜力指数解释力最高为 0.837(图 3),对气候生产潜力指数解释力最高为 0.453(图 4),海拔因素对光温生产潜力指数和气候生产潜力指数的最优分层方式均以 1 100 m 为基数,200 m 为间隔。

通过测试可得年均降雨量的不同分层方式对生产潜力指数的解释力影响,可以确定年均降雨量对

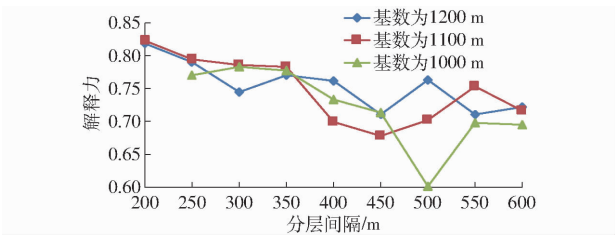


图3 海拔-光温生产潜力指数分层探测结果
Fig.3 Detection result of classes of altitude - light and temperature production potential index

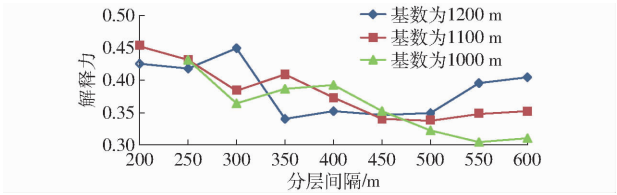


图 4 海拔-气候生产潜力指数分层探测结果

Fig. 4 Detection result of classes of altitude – climate production potential index

光温生产潜力指数解释力最高为 0.526 (图 5), 对气候生产潜力指数解释力最高为 0.676 (图 6), 年均降雨量因素对光温生产潜力指数的最优分层方式为以 0 mm 为基数, 100 mm 为间隔, 对气候生产潜力指数的最优分层方式为以 25 mm 为基数, 50 mm 为间隔。

3.4 层间生产潜力指数确定

利用地理探测器计算得解释力, 确定影响因素最优分层方式后, 计算该影响因素在最优分层方式下每一层的生产潜力指数。光温生产潜力指数计算结果见表 5、6, 气候生产潜力指数计算结果见表 7、8。

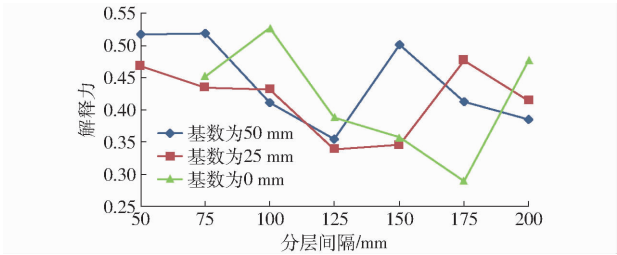


图 5 年均降雨量-光温生产潜力指数分层探测结果

Fig. 5 Detection result of classes of annual average precipitation – light and temperature production potential index

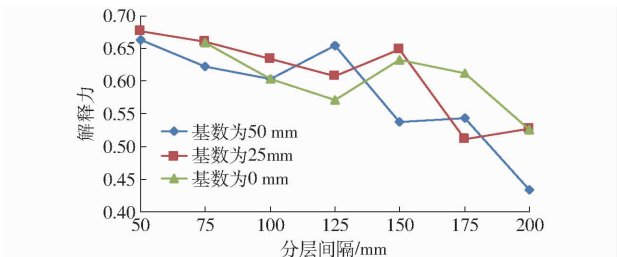


图 6 年均降雨量-气候生产潜力指数分层探测结果

Fig. 6 Detection result of classes of annual average precipitation – climate production potential index

表 5 海拔-光温生产潜力指数											
Tab. 5 Altitude – light and temperature production potential index											
海拔/m	1 100 ~ 1 300	1 300 ~ 1 500	1 500 ~ 1 700	1 700 ~ 1 900	1 900 ~ 2 100	2 100 ~ 2 300	2 300 ~ 2 500	2 500 ~ 2 700	2 700 ~ 2 900	2 900 ~ 3 100	3 100 ~ 3 300
光温生产潜力指数	1 517	1 659	1 655	1 370	1 275	1 249	1 128	1 120	983	829	978
											1 030

表 6 年均降雨量-光温生产潜力指数							
Tab. 6 Annual average precipitation – light and temperature production potential index							
年均降雨量/mm	0 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	500 ~ 600	600
光温生产潜力指数	1 667	1 543	1 205	1 127	1 220	1 018	1 041

表 7 海拔-气候生产潜力指数											
Tab. 7 Altitude – climate production potential index											
海拔/m	1 100 ~ 1 300	1 300 ~ 1 500	1 500 ~ 1 700	1 700 ~ 1 900	1 900 ~ 2 100	2 100 ~ 2 300	2 300 ~ 2 500	2 500 ~ 2 700	2 700 ~ 2 900	2 900 ~ 3 100	3 100 ~ 3 300
气候生产潜力指数	528.0	273.0	459.0	594.5	622.0	681.0	789.0	1 008.0	745.0	710.0	894.0
											1 169.0

表 8 年均降雨量-气候生产潜力指数											
Tab. 8 Annual average precipitation – climate production potential index											
年均降雨量/mm	25 ~ 75	75 ~ 125	125 ~ 175	175 ~ 225	225 ~ 275	275 ~ 325	325 ~ 375	375 ~ 425	425 ~ 475	475 ~ 525	525
气候生产潜力指数	189	291	341	572	650	642	766	773	803	914	920

3.5 作物生产潜力指数修正

根据影响因素的最优分层方式及在该分层方式下由地理探测器得的解释力, 归一化计算得海拔因素对光温生产潜力指数和气候生产潜力指数的影响权重分别为 0.61 和 0.40, 年均降雨量对光温生产潜力指数和气候生产潜力指数的影响权重分别为 0.39 和 0.60。

由海拔和年均降雨量的权重和层间生产潜力指数, 计算得到研究区所有县级分等单元的光温生产潜力指数分布区间为[997, 1 217], 气候生产潜力指数分布区间为[732, 955], 分布结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 平安区作物光温生产潜力指数整体由东北向西南逐渐降低, 光温生产潜力指数较高的耕地主要分布在海拔较低的东北部低洼河谷

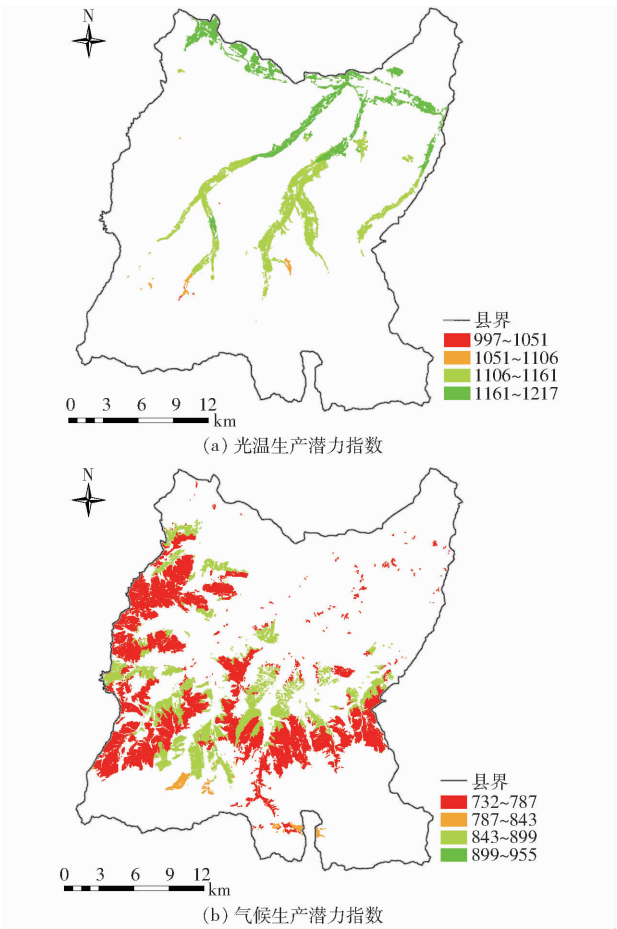


图 7 修正后平安区生产潜力指数分布
Fig. 7 Distribution maps of crop production potential index of Ping'an County after amending

地带;气候生产潜力指数与年均降雨量成正相关分布,随着年均降雨量的增大,气候生产潜力指数升高。经过修正后的生产潜力指数相对于年度更新评价中使用的生产潜力指数(光温生产潜力指数 1 364,气候生产潜力指数 663)有较大变化。

根据修正后生产潜力指数计算的国家自然等别与平安区耕地质量年度更新评价成果中的国家自然等别进行差值计算,结果如图 8 所示。修正后平安区水浇地的国家自然等别整体降低 0.4~1.2 等,其中降低 0.8~1.2 等的耕地面积仅占全县耕地总面积的 4.0%,降低 0.4~0.8 等的耕地面积占 22.1%。旱地的国家自然等别提升 0~1.2 等,等别提升小于 0.4 等的耕地面积占比最高,为 52.8%,提升 0.4~1.2 等的耕地面积占全县耕地总面积的 21.1%。

3.6 修正模型合理性检验

作物的实际产量可以在一定程度上反映作物生产潜力指数修正结果的合理性,借助于平安区测土配方施肥项目布设的产量监测点数据,监测点分布情况如图 9 所示。

利用 Pearson 模型对实际产量与修正的作物生

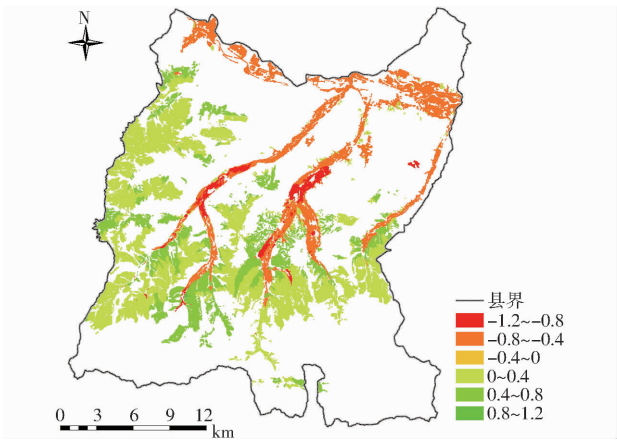


图 8 修正前后平安区耕地国家自然等别变化值分布
Fig. 8 Distribution map of difference of Ping'an County's national agriculture land physical quality classification before and after amending

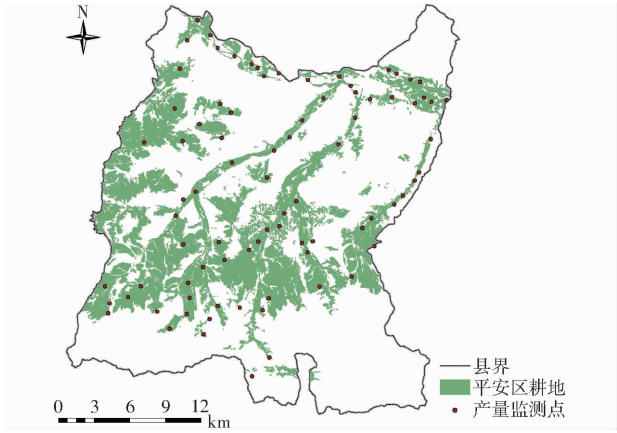


图 9 产量监测点分布
Fig. 9 Distribution map of yield monitoring point

产潜力指数进行相关性分析,验证修正结果的合理性。分析结果表明,83 个产量监测点的作物实际产量与生产潜力指数相关系数为 0.91,呈极显著相关,修正结果与原作物生产潜力指数相比更具客观性。

4 结论

(1) 基于青海省海东市平安区地形和气候特征,以平安区及其周边共 70 个区县的气象站点作为研究样本,利用地理探测器的解释力分析功能,建立平安区生产潜力指数修正模型,修正了平安区全县域内所有县级分等单元的春小麦生产潜力指数。研究表明,影响平安区光温生产潜力指数和气候潜力指数的主要因素均为海拔和年均降雨量。

(2) 在耕地质量等别调查评价中,平安区县域内水浇地春小麦修正后的光温生产潜力指数较原光温生产潜力指数有所下降,使用修正后光温生产潜力指数计算得到的国家自然等别指数较最新一期耕地质量等别调查评价成果降低 0.4~1.2 等;县域内旱地春小麦修正后气候生产潜力指数均高于原气候

生产潜力指数,使用修正后的气候生产潜力指数计算得到的国家自然等别指数较最新一期耕地质量等别调查评价成果提升0~1.2等。

(3)将修正的作物生产潜力指数与作物实际产

量进行相关性分析,可以得出,修正后的作物生产潜力指数与实际产量具有极显著相关性,表明该修正指数比原唯一指数更加合理,采用这种修正方法能够提高耕地质量评价结果的精度。

参 考 文 献

- [1] 封志明,李香莲.耕地与粮食安全战略:藏粮于土,提高中国土地资源的综合生产能力[J].地理学与国土研究,2000(3):1-5.
FENG Zhiming, LI Xianglian. The stratagem of cultivated land and food supplies security: storing food in land-raising the comprehensive productivity of land resource of China[J]. Geography and Territorial Research, 2000(3):1-5. (in Chinese)
- [2] 杨永侠,王旭,孟丹,等.基于空间自相关的耕地等别指数检验方法研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):328-335.
YANG Yongxia, WANG Xu, MENG Dan, et al. Test method of cultivated land grading index based on spatial autocorrelation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 328-335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160545&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.045 (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国国土资源部.农用地质量分等规程:GB/T 28407—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [4] 邱维理,王娟,郭文祥.农用地质量是由哪些要素构成的?——农用地分等规程解读[J].中国发展,2012,12(4):54-57.
QIU Weili, WANG Juan, GUO Wenxiang. Elements for the quality of agricultural land: reading of the procedure for agricultural land grading[J]. China Development, 2012, 12(4): 54-57. (in Chinese)
- [5] 王涛,吕昌河,于伯华.基于WOFOST模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J].自然资源学报,2010,25(3):475-487.
WANG Tao, LÜ Changhe, YU Bohua. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 475-487. (in Chinese)
- [6] 帅细强,王石立,马玉平,等.基于ORYZA2000模型的湘赣双季稻气候生产潜力[J].中国农业气象,2009,30(4):575-581.
SHUAI Xiqiang, WANG Shili, MA Yuping, et al. Studies on potential climate productivity of double rice in Hunan and Jiangxi Provinces based on ORYZA2000 model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 575-581. (in Chinese)
- [7] 刘毅,李世清,陈新平,等.黄土旱塬 Hybrid-Maize 模型适应性及春玉米生产潜力估算[J].农业工程学报,2008,24(12):302-308.
LIU Yi, LI Shiqing, CHEN Xinping, et al. Adaptability of Hybrid-Maize model and potential productivity estimation of spring maize on dry highland of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 302-308. (in Chinese)
- [8] 李国强,陈丹丹,张建涛,等.基于DSSAT模型的河南省小麦生产潜力定量模拟与分析[J].麦类作物学报,2016,36(4):507-515.
LI Guoqiang, CHEN Dandan, ZHANG Jiantao, et al. Quantitative simulation and analysis of winter wheat production potential in Henan Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(4): 507-515. (in Chinese)
- [9] TIAN Zhan, JI Yinghao, SUN Laixiang, et al. Changes in production potentials of rapeseed in the Yangtze River Basin of China under climate change: a multi-model ensemble approach[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(11): 1700-1714.
- [10] 钟新科,刘洛,徐新良,等.近30年中国玉米气候生产潜力时空变化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):94-101.
ZHONG Xinke, LIU Luo, XU Xinliang, et al. Characteristics of spatial-temporal variation of maize climate productivity during last 30 years in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 94-101. (in Chinese)
- [11] 钟章奇,王铮,夏海斌,等.全球气候变化下中国农业生产潜力的空间演变[J].自然资源学报,2015,30(12):2018-2032.
ZHONG Zhangqi, WANG Zheng, XIA Haibin, et al. Temporal and spatial variation of the potential agricultural productivity of China under global climate change[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12): 2018-2032. (in Chinese)
- [12] 庞艳梅,陈超,马振峰.未来气候变化对四川省水稻生育期气候资源及生产潜力的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):58-68.
PANG Yanmei, CHEN Chao, MA Zhenfeng. Impacts of future climate change on climatic resources and production potential during growth period of rice in Sichuan Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 58-68. (in Chinese)
- [13] 邱维理.全国农用地分等作物生产潜力指数研究[M].北京:中国大地出版社,2014.
- [14] 陈彦清,杨建宇,郎文聚,等.国家尺度上基于地形因子的光温及气候生产潜力修正算法[J].中国农业科学,2016,49(11):2082-2092.
CHEN Yanqing, YANG Jianyu, YUN Wenju, et al. A correcting algorithm of crop productive potentiality based on the terrain factors in national scale[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2082-2092. (in Chinese)
- [15] 廖丽君,余建新,郑宏刚,等.云南作物生产潜力的海拔修正对耕地自然等别评价结果的影响[J].农业工程学报,2016,32(23):246-253.
LIAO Lijun, YU Jianxin, ZHENG Honggang, et al. Influence of altitude correction of potential productivity of crops on agricultural land physical quality grade in Yunnan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 246-253. (in

Chinese)

- [16] 姚筠,许莹,马晓群.淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制[J].资源科学,2017,39(3):490-500.
YAO Yun,XU Ying,MA Xiaoqun. Influence of precipitation change on climatic potential productivity of major crops in the Huaihe River Basin[J]. Resources Science,2017,39(3):490-500. (in Chinese)
- [17] 高军波,楚冰洋,闫俊辉,等.1960—2015年河南省玉米气候生产潜力估算与种植空间优化[J/OL].农业机械学报,2019,50(1):245-254.
GAO Junbo,CHU Bingyang,YAN Junhui,et al. Estimation of climate production potential of corn and optimization of planting space in Henan Province during 1960—2015[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):245-254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.027. (in Chinese)
- [18] XU C, LI Y, WANG J,et al. Spatial-temporal detection of risk factors for bacillary dysentery in Beijing, Tianjin and Hebei, China[J]. BMC Public Health,2017,17(1):743.
- [19] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(1):107-127.
- [20] HUANG J, WANG J, BO Y, et al. Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2014,11(3):3407-3423.
- [21] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
WANG Jinfeng,XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134. (in Chinese)
- [22] REN Y, DENG L Y, ZUO S D, et al. Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China[J]. Landscape Ecology,2014,29(10):1741-1758.
- [23] 梁鑫源,李阳兵.三峡库区规模农地时空变化特征及其驱动机制[J].地理学报,2018,73(9):1630-1646.
LIANG Xinyuan,LI Yangbing. Spatio-temporal features of scaling farmland and its corresponding driving mechanism in Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Geographica Sinica,2018,73(9):1630-1646. (in Chinese)
- [24] WANG Huan,GAO Jiangbo,HOU Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in Karst areas;based on the geographical detector method[J]. Journal of Geographical Sciences,2019,29(2):271-286.
- [25] 王曼曼,吴秀芹,吴斌,等.盐池北部风沙区乡村聚落空间格局演变分析[J].农业工程学报,2016,32(8):260-271.
WANG Manman,WU Xiuqin,WU Bin,et al. Evolution analysis of spatial pattern of rural settlements in sandy area of northern Yanchi[J]. Transactions of the CASE, 2016,32(8):260-271. (in Chinese)
- [26] 李雨,韩平,任东,等.基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J].中国农业科学,2017,50(21):4138-4148.
LI Yu,HAN Ping,REN Dong,et al. Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector [J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(21):4138-4148. (in Chinese)
- [27] 肖武,隋涛,王鑫,等.巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):144-152.
XIAO Wu,SUI Tao,WANG Xin,et al. Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu Lake basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):144-152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180718&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.018(in Chinese)
- [28] 文琦,施琳娜,马彩虹,等.黄土高原村域多维贫困空间异质性研究——以宁夏彭阳县为例[J].地理学报,2018,73(10):1850-1864.
WEN Qi,SHI Linna,MA Caihong,et al. Spatial heterogeneity of multidimensional poverty at the village level:Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(10):1850-1864. (in Chinese)
- [29] 刘彦随,李进涛.中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J].地理学报,2017,72(1):161-173.
LIU Yansui,LI Jintao. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):161-173. (in Chinese)
- [30] 青海省海东市平安区统计局.平安统计年鉴[J].海东:海东统计出版社,1979-2015.