

基于黄淮海区耕地质量等级的粮食产能定量评估

刘学¹, 李鑫^{1,3}, 张骏达^{2*}, 任意², 张文菊¹

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081; 2 农业农村部耕地质量监测与保护中心, 北京 100125;

3 TERRA, Gembloux Agro-BioTech, University of Liege, Gembloux, Belgium 5030)

摘要: 【目的】耕地质量是保障粮食安全和实现农业高质量发展的基础, 明确耕地质量与粮食产能之间的关系, 对评估区域粮食生产潜力、支撑国家“新增一千万斤粮食”行动具有重要意义。【方法】基于 2017 年黄淮海区耕地质量调查评价数据, 以二级农业区为评估单元, 构建耕地质量等级与粮食单产的函数模型, 结合县域耕地面积数据评估黄淮海区县域尺度粮食产能, 并利用实际统计资料验证模型结果。【结果】黄淮海区耕地质量等级与粮食单产之间呈显著正相关 ($R^2>0.95$)。空间分析结果显示, 冀鲁豫低洼平原农业区、燕山太行山山麓平原农业区和黄淮平原农业区的粮食单产较高, 而山东丘陵农林区粮食单产较低。在二级农业区尺度, 粮食单产从大到小依次为冀鲁豫低洼平原农业区 [1.56×10^4 kg/(hm²·a)]、黄淮平原农业区 [1.52×10^4 kg/(hm²·a)]、燕山太行山山麓平原农业区 [1.51×10^4 kg/(hm²·a)], 山东丘陵农林区 [1.31×10^4 kg/(hm²·a)]。基于耕地面积数据的县域产能评估结果显示, 县域粮食产能呈现南高北低的空间分布特征, 模型校正后的粮食产能与实际粮食产量之间具有较高的拟合度 ($R^2>0.90$)。在二级农业区中, 山东丘陵农林区拟合效果最好。【结论】以耕地质量评估的粮食产能经校正后, 能较好地反映该区域的粮食生产潜力。整个黄淮海区的粮食产能为 3.18×10^{11} kg, 粮食单产为 1.49×10^4 kg/(hm²·a)。

关键词: 耕地质量评价; 粮食产能; 量化评估; 粮食单产

Quantitative assessment of the relationship between cultivated land quality grades and grain production capacity in the Huang-Huai-Hai region of north China

LIU Xue¹, LI Xin^{1,3}, ZHANG Jun-da^{2*}, REN Yi², ZHANG Wen-ju¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China / Key Laboratory of Farmland Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2 Center for Farmland Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3 TERRA, Gembloux Agro-BioTech, University of Liege, Gembloux, Belgium 5030)

Abstract: 【Objectives】Cultivated land quality is the foundation of food security and high-quality agricultural development. Understanding the quantitative relationship between cultivated land quality and grain production capacity is significant for evaluating the regional grain production potential and supporting the national action of “increasing fifty million tons of grain”. 【Methods】A case study was conducted in Huang-Huai-Hai region, which was based on the survey and evaluation data of cultivated land quality in 2017. Taking secondary agricultural zones as evaluating units, we developed a functional model between cultivated land quality grades and grain production capacity per hectare. Combined with county-level cultivated land area data, the grain production capacity at the county scale in the Huang-Huai-Hai region was evaluated, and the model results were verified using

收稿日期: 2024-12-11 接受日期: 2025-05-08

基金项目: 科技基础资源调查专项 (SQ2021FY010045)。

联系方式: 刘学 E-mail: liuxue03@caas.cn; * 通信作者 张骏达 E-mail: jdsoil@163.com

actual statistical data. **【 Results 】** The results showed a significant positive correlation between cultivated land quality grades and grain production capacity per hectare in the Huang-Huai-Hai region ($R^2 > 0.95$). Spatial analysis showed that the grain production capacity per hectare was relatively high in the Hebei-Shandong-Henan low-lying plain agricultural zone, Yanshan-Taihang Mountain foothill plain agricultural zone, and Huang-Huai Plain agricultural zone, while it was lower in the Shandong Hilly agriculture and forestry zone. The rank of grain production capacity per hectare from high to low in the secondary agricultural zones was: the Hebei-Shandong-Henan low-lying plain agricultural zone [$1.56 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], the Huanghuai Plain agricultural zone [$1.52 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], the Yanshan-Taihang Mountain foothill plain agricultural zone [$1.51 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], and the Shandong Hilly agricultural and forestry zone [$1.31 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]. The county-level production capacity evaluation based on cultivated land area data showed that the county-level grain production capacity presented a spatial distribution characteristic of high in the south and low in the north. After model adjustment, the estimated grain production capacity showed a strong statistical fit with actual grain production ($R^2 > 0.90$). In the secondary agricultural zones, the Shandong Hilly agricultural and forestry zone exhibited the best fitting effect.

【 Conclusions 】 The grain production capacity assessed by the quality of cultivated land can better reflect the grain production potential of the region after correction. The grain production capacity of the entire Huang-Huai-Hai region is $3.18 \times 10^{11} \text{ kg}$, and the grain production capacity per hectare is $1.49 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$.

Key words: cultivated land quality assessment; grain production capacity; quantitative evaluation; grain production capacity per hectare

耕地是农业生产最重要的资源,其质量高低直接影响粮食安全和农业高质量发展^[1]。耕地质量是一个综合性概念,涵盖其自然属性、环境条件及经济价值等多个维度,可细分为土壤质量、空间地理质量、管理质量及经济质量4大方面。具体而言,土壤质量体现在土壤维持生态系统内生物生产力、维护环境质量及促进生态健康的能力;空间地理质量和管理质量分别侧重于耕地的地形、气候等自然因素和管理水平(如土地平整和灌排设施)对耕地的影响程度;而经济质量则是指在前三者共同影响下,耕地的综合产出能力和产出效率表现^[2]。

耕地质量是影响作物产量的重要因素之一,提升耕地质量是提高作物产量的重要途径之一^[3]。有研究表明,增加耕地土壤有机质和有效磷含量有利于降低粮食产量对气候变化的敏感性,提高粮食产量及其稳定性^[4]。近年来,有学者针对不同土壤类型和区域探讨耕地质量及其与产能的关系。例如,褐土区耕层厚度、土壤容重和土壤有机质等指标对作物产能具有较大贡献^[1,5]。此外,在华南区稻田耕地质量评价中发现,土壤有效磷含量、灌溉能力和土壤有机质含量是耕地质量评价的关键指标,耕地质量分别提升0.5、1.0和1.5个等级,水稻产能相应增加14.93%、22.39%和29.86%^[6]。这些研究结果表明,不同区域或土壤类型的耕地质量及其要素与产能之间的关系存在差异。

黄淮海区是我国粮食生产的重要基地,其耕地面积和粮食产量分别占全国的20.6%和30.8%。其中小麦和玉米产量占全国总产量的比重分别约为70%和40%^[7]。近30年来,黄淮海地区为我国粮食增产贡献高达45%^[8]。然而,高强度的耕地利用和集约化管理也给该地区带来一系列问题,如不合理灌溉导致的土壤次生盐渍化,长期过度使用化肥导致的土壤结构受损、肥力下降等问题,这些都对黄淮海区的耕地质量构成了严峻考验^[9]。耕地质量下降会影响其生产潜力^[10],但耕地质量与产能之间的关系尚不明确,亟需评估黄淮海区耕地质量与粮食产能间的定量关系,为该地区制定针对性的耕地保育措施和产能提升策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海区地处中国华北平原南部,由黄河和淮河下游的泥沙冲积而成。该区域地形平坦,海拔在35~80 m。气候为暖温带半湿润季风气候,全年无霜期最长达230天,北部和南部地区的年降水量分别为500~600和800~1000 mm,其中70%集中在6—8月。北部地区的年均温为11℃~12℃,南部地区为14℃~15℃。土壤以褐土、潮土和砂姜黑土为主,主要种植小麦和玉米等作物^[8,11]。依据中国综合

农业区划, 黄淮海区划分为燕山太行山山麓平原农业区、冀鲁豫低洼平原农业区、山东丘陵农林区和黄淮平原农业区 4 个二级区^[7]。包括北京、天津、山东省全部, 河北省东部、河南省东部和安徽省北部。

1.2 基于耕地质量对粮食单产进行评估

耕地质量反映了耕地的生产能力, 包含了土壤属性和空间地理质量等^[2]。因此, 本研究中考虑了区域气候和地形对粮食产能的影响, 以黄淮海区内气候特征和地形条件趋同的二级农业区为建模单元, 拟合耕地质量综合指数与粮食单产之间的关系模型。随后, 将该模型应用于待评价单元 (评价单元是由行政区划图、土地利用现状图、土壤图叠加形成的最小耕地图斑), 评估每个评价单元的粮食单产后, 结合评价单元的面积计算其粮食产能, 统计汇总得出县域、二级农业区和黄淮海区的粮食产能 (图 1)。用于评估的数据来源于 2017 年黄淮海区耕地质量调查评价数据, 共提取了黄淮海区评价单元 1.27×10^5 个, 涉及耕地面积 $2.14\times 10^7\text{ hm}^2$ 。其中, 燕山太行山山麓平原农业区评价单元 6.09×10^4 个, 涉及耕地面

积 $3.35\times 10^6\text{ hm}^2$; 冀鲁豫低洼平原农业区评价单元 2.65×10^4 个, 涉及耕地面积 $5.98\times 10^6\text{ hm}^2$; 黄淮平原农业区评价单元 2.89×10^4 个, 涉及耕地面积 $7.64\times 10^6\text{ hm}^2$; 山东丘陵农林区评价单元 1.07×10^4 个, 涉及耕地面积 $4.41\times 10^6\text{ hm}^2$ 。

1.2.1 函数拟合 依据《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016) 技术要求, 组织专家采用特尔斐法 (Delphi Method) 进行多轮评价打分。特尔斐法因其能够综合考虑多种因素、抗极端值干扰的能力强, 在耕地质量评估与耕地生产力研究领域得到了广泛应用^[12-13]。本研究以耕地质量等级评价数据为基准, 评估质量等级 (耕地质量综合指数平均值) 对应的粮食单产, 初始结果显示专家意见离散度较高, 符合正态分布特征。采用四分位法筛选共识区间, 剔除上下 25% 极端估值, 保留中间 50% 集中区间作为反馈依据。经 3~5 轮反馈后, 专家意见趋于一致, 最终确定黄淮海区 4 个二级农业区各耕地质量综合指数平均值对应的粮食单产, 其中冀鲁豫低洼平原农业区和黄淮平原农业区耕地质量相对较好, 未分布最低等级耕地; 而燕山太行山山麓平原与山东丘陵

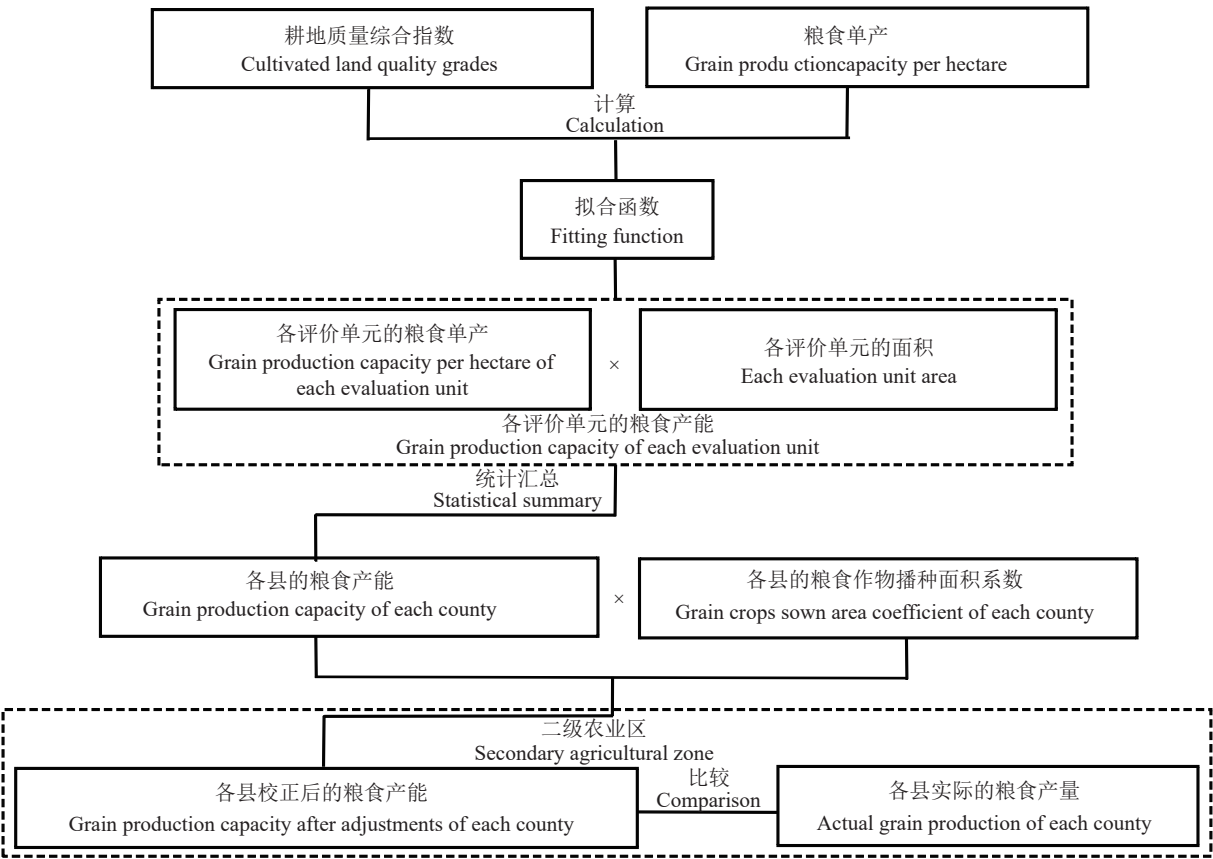


图 1 耕地质量等级与粮食产能关系的量化评估流程

Fig. 1 Flowchart of quantitative assessment of the relationship between cultivated land quality grades and grain production capacity

农林区涵盖了 1~10 等级全部耕地。基于上述数据,运用戒上型隶属函数拟合粮食单产 (y) 与耕地质量综合指数平均值 (x) 的函数关系,公式如下,

$$y = \begin{cases} y_{\min} & x \leq x_1 \\ \frac{b}{1+a(x-c)^2} & x_1 < x < x_2 \\ y_{\max} & x \geq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, y 为评价单元的粮食单产 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], $y_{\min}$ 为最低等级地综合指数平均值估算的粮食单产, $y_{\max}$ 为最高等级地综合指数平均值估算的粮食单产, x 为耕地质量综合指数得分, x_1 为最低等级地综合指数平均值, x_2 为最高等级地综合指数平均值, a 、 b 为系数, c 为标准值。

1.2.2 粮食产能计算 根据各评价单元耕地质量综合指数,依据公式 (1) 计算其相应的粮食单产,然后基于单元面积,计算评价单元的粮食产能 (Yp),公式如下:

$$Yp = y \times S \quad (2)$$

其中, Yp 表示某一评价单元的粮食产能 (kg/a), y 表示评价单元的粮食单产 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], S 表示评价单元的实际面积 (hm^2)。

在区域尺度上,将所有评价单元的粮食产能累加,得到整个区域的粮食产能 ($\sum Yp$),公式如下:

$$\sum Yp = \sum_{i=1}^n Ypi \quad (3)$$

其中, $\sum Yp$ 表示区域的粮食产能 (kg), n 表示区域内评价单元总数, Ypi 表示第 i 个评价单元的粮食产能 (kg)。

通过区域的粮食产能与总面积之比,我们可以计算出区域的单位面积产能 (Yg),公式如下:

$$Yg = \frac{\sum Yp}{S_{\text{total}}} \quad (4)$$

其中, Yg 表示区域的单位面积产能 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], S_{total} 表示区域所有评价单元的面积之和 (hm^2)。

1.3 基于统计年鉴数据对粮食产能校正并比较分析

如前所述,评价单元是由行政区划图、土地利用现状图、土壤图叠加形成的最小耕地图斑,土地利用现状图中的耕地面积为法定分类面积,实际粮食种植情况可能因休耕、临时撂荒或非粮化种植等因素而发生变化。因此需要对县域内的粮食产能进行校正,将校正后的结果与实际粮食产量进行比较分析,以验证函数的准确性。

从 2018 年省级统计年鉴和地级市统计年鉴获取黄淮海区 2017 年各县的粮食产量和粮食作物播种面积数据,因统计缺失原因,实际获取了 307 个统计县的数据,其中燕山太行山山麓平原农业区 99 个,冀鲁豫低洼平原农业区 79 个,黄淮平原农业区 81 个县域和山东丘陵农林区 48 个,计算各县的粮食作物播种面积系数,公式如下:

$$k = \frac{S_g}{S_c} \quad (5)$$

其中, k 表示各县的粮食作物播种面积系数, S_g 表示各县的粮食作物播种面积, S_c 表示各县的评价单元面积 (耕地面积)。

各县的粮食产能乘以粮食作物播种面积系数可得到校正后的各县粮食产能。以二级农业区为单元,在县级行政区的尺度,将校正后的各县粮食产能与统计年鉴记录的该县实际粮食产量进行对比分析 (图 1)。

1.4 数据统计与分析

运用 R4.3.1 和 Origin2021 进行函数拟合,运用 ArcMap10.7 进行黄淮海区各县的粮食单产与粮食产能绘图,其余数据整理、汇总与分析在 Excel 中完成。

2 结果与分析

2.1 耕地质量等级与粮食产能的关系

黄淮海区 4 个二级农业区的耕地质量综合指数与粮食单产均呈极显著相关 ($R^2 > 0.95$, 图 2)。具体而言,在燕山太行山山麓平原农业区,耕地质量综合指数的平均值为 0.8390,所对应的粮食单产为 12990 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;冀鲁豫低洼平原农业区耕地质量综合指数的平均值为 0.8556,所对应的粮食单产为 14306 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;在黄淮平原农业区,耕地质量综合指数波动较小,从 0.7430 到 0.9673 (变异系数为 9.22%),平均值为 0.8562,所对应的粮食单产变化范围为 9750~19140 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,变异系数为 25.23%,平均值为 13360 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;在山东丘陵农林区,耕地质量综合指数波动较大,从 0.6610 到 0.9726,变异系数为 11.96%,平均为 0.8359,所对应的粮食单产较低,变化范围为 6750~18750 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,变异系数为 32.79%,平均为 12825 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。各二级区相同的耕地质量综合指数所对应的粮食单产具有一定差异,表明两者之间的对应关系受到区域特性的影响,如气候、地形等因素。例如,燕山太行山山麓

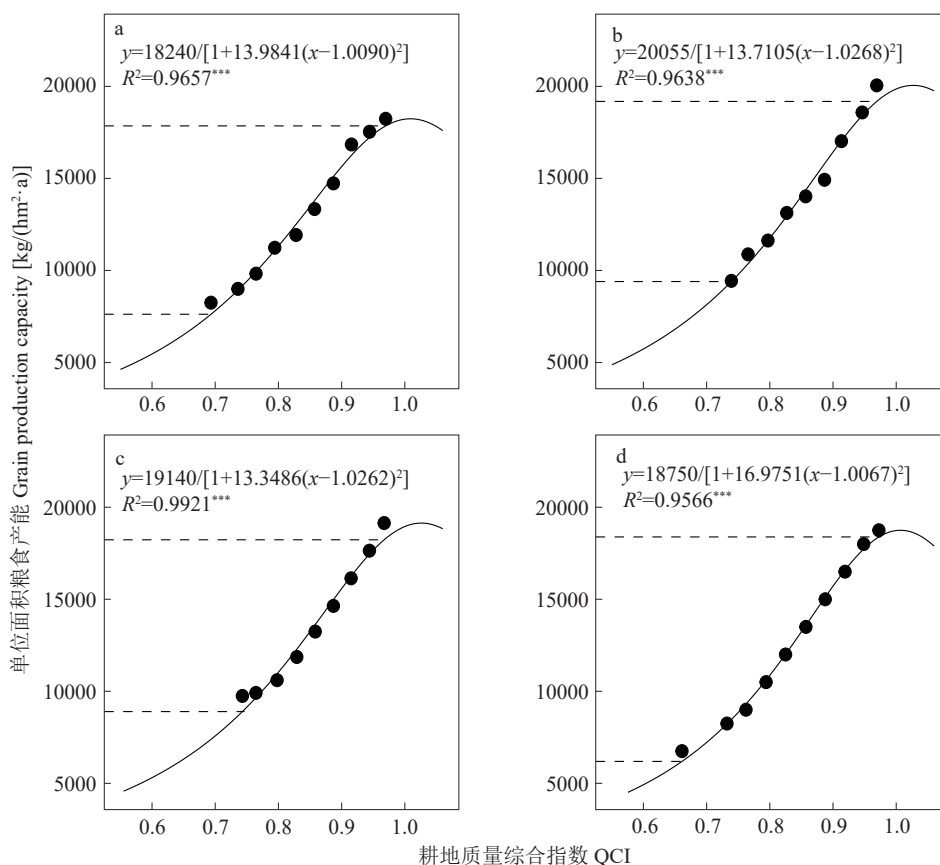


图 2 黄淮海区二级农业区耕地质量综合指数 (QCI) 与粮食单产的关系

Fig. 2 Relationship between cultivated land quality comprehensive index (QCI) and grain production per hectare in the secondary agricultural zones of Huang-Huai-Hai region

注: a、b、c 和 d 分别为燕山太行山山麓平原农业区、冀鲁豫低洼平原农业区、黄淮平原农业区和山东丘陵农林区。***— $P < 0.001$ 。

Note: a, b, c, and d represent the Yanshan-Taihang Mountain foothill plain agricultural zone, the Hebei-Shandong-Henan low-lying plain agricultural zone, the Huanghuai Plain agricultural zone, and the Shandong Hilly agricultural and forestry zone, respectively. ***— $P < 0.001$.

平原农业区、冀鲁豫低洼平原农业区、黄淮平原农业区和山东丘陵农林区耕地质量综合指数为 0.8000 时, 所对应的粮食单产分别为 11323 kg/(hm²·a)、11760 kg/(hm²·a)、11373 kg/(hm²·a) 和 10868 kg/(hm²·a)。耕地质量综合指数相同时, 黄淮平原农业区的粮食单产较高, 与其地处纬度较低的平原, 拥有更优越的光热条件和利于集约化管理的平坦地形有关。

2.2 黄淮海区的单位面积产能和粮食产能

根据黄淮海区县域尺度耕地质量等级, 结合实际耕地面积, 计算得到各县域粮食单产和粮食总产能。从空间分布看, 各县的粮食单产呈现冀鲁豫低洼平原农业区、燕山太行山山麓平原农业区和黄淮平原农业区较高, 山东丘陵农林区较低的特征。其中, 粮食单产超过 1.6×10^4 kg/(hm²·a) 的县域中, 冀鲁豫低洼平原农业区占比最高, 达到 34.09%; 其次是燕山太行山山麓平原农业区, 占比为 31.82%; 黄淮平原农业区, 占比为 21.21%; 而山东丘陵农林区

占比最少, 仅有 12.88%。相反, 对于粮食单产低于 1×10^4 kg/(hm²·a) 的低产能县域, 它们全部位于山东丘陵农林区 (图 3a)。

各县的粮食总产能在空间上呈现出南部高北部低的分布特征, 这不仅与各县的粮食单产有关, 还受到耕地面积的影响。具体而言, 粮食产能大于 2×10^9 kg 的县域, 大部分集中在黄淮平原农业区, 占比为 91.67%; 粮食产能小于 5×10^8 kg 的县域, 主要集中在燕山太行山山麓平原农业区, 占比为 43.98%, 其次是山东丘陵农林区、黄淮平原农业区和冀鲁豫低洼平原农业区, 占比依次为 21.08%、18.07% 和 16.87% (图 3b)。

汇总二级农业区中各县域的粮食产能, 并根据耕地面积计算各二级区的粮食单产 (表 1), 从大到小依次为冀鲁豫低洼平原农业区 1.56×10^4 kg/(hm²·a)、黄淮平原农业区 1.52×10^4 kg/(hm²·a)、燕山太行山山麓平原农业区 1.51×10^4 kg/(hm²·a) 和山东丘陵农林区

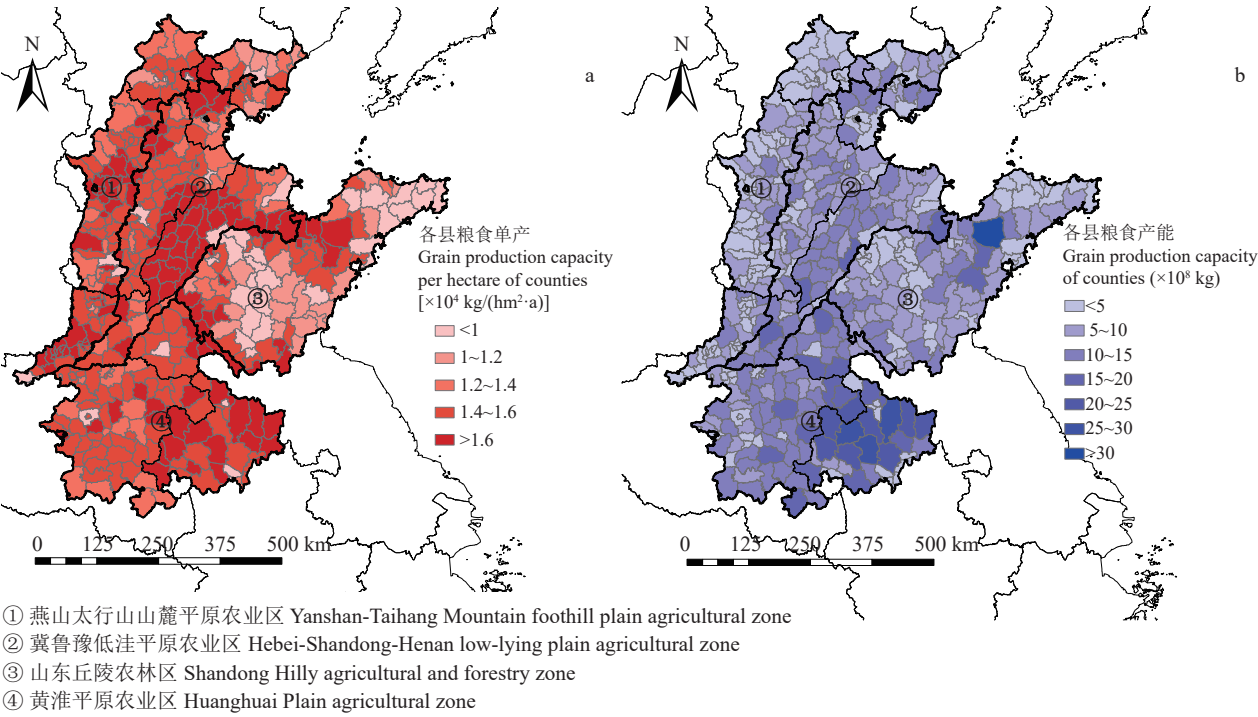


图 3 黄淮海区 2017 年各县粮食单产和粮食产能

Fig. 3 The grain production capacity per hectare and the grain production capacity assessed for each county in the Huang-Huai-Hai region in 2017

注：a，黄淮海区 2017 年各县评估的粮食单产；b，黄淮海区 2017 年各县评估的粮食产能。

Note: a, Grain production capacity per hectare assessed for each county in theHuang-Huai-Hai region in 2017; b, The grain production capacity assessed for each county in theHuang-Huai-Hai region in 2017.

$1.31\times10^4\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 。总体来看，整个黄淮海区的耕地面积为 $2.14\times10^7\text{ hm}^2$ ，粮食产能为 $3.18\times10^{11}\text{ kg}$ ，粮食单产为 $1.49\times10^4\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 。

2.3 校正后的粮食产能与实际粮食产量的关系

校正后的粮食产能与统计年鉴记录的实际粮食产量之间具有较高的拟合度 ($R^2>0.90$ ，图 4)。在整个黄淮海区统计县中，绝大多数县域 (99.68%) 校正后的粮食产能均高于实际粮食产量，平均差值达到

$5.10\times10^8\text{ kg}$ 。校正后的粮食产能与粮食产量差值大于 $8.00\times10^8\text{ kg}$ 的县域占统计县的 22.48%，这些县主要分布在黄淮平原农业区 (66.67%) 和冀鲁豫低洼平原农业区 (17.39%)。在二级区中，燕山太行山山麓平原农业区的产能高估县，其平均差值为 $3.19\times10^8\text{ kg}$ ；冀鲁豫低洼平原农业区的产能高估县，其平均差值为 $5.05\times10^8\text{ kg}$ ；黄淮平原农业区的产能高估县，其平均差值最大，为 $8.82\times10^8\text{ kg}$ ；山东丘陵农林区的产

表 1 耕地质量等级预测的黄淮海区及其所属二级区粮食总产能和粮食单产

Table 1 Gross and per-unit-area grain production capacities in the Huang-Huai-Hai region and its secondary agricultural zones, predicted based on cultivated land quality grades			
区域 Zone/Region	耕地面积 Cultivated land area ($\times10^6\text{ hm}^2$)	粮食产能 Grain production capacity ($\times10^{10}\text{ kg}$)	粮食单产 Grain production capacity per hectare [$\times10^4\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$]
燕山太行山山麓平原农业区 Yanshan-Taihang Mountain foothill plain agricultural zone	3.35	5.05	1.51
冀鲁豫低洼平原农业区 Hebei-Shandong-Henan low-lying plain agricultural zone	5.98	9.36	1.56
山东丘陵农林区 Shandong Hilly agricultural and forestry zone	4.41	5.74	1.31
黄淮平原农业区 Huanghuai Plain agricultural zone	7.64	11.66	1.52
黄淮海区 Huang-Huai-Hai region	21.38	31.81	1.49

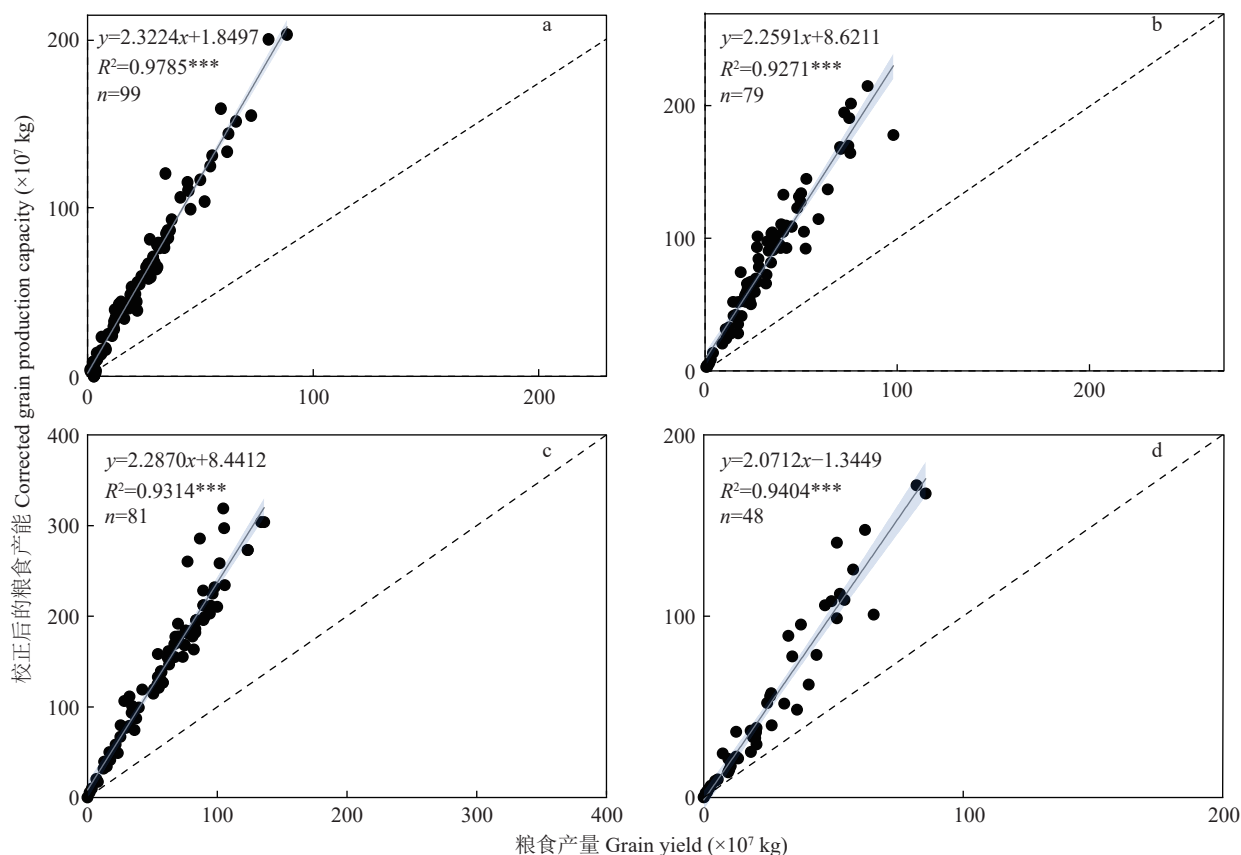


图 4 黄淮海区二级农业区各县实际粮食产量与校正后计算的粮食产能的拟合度

Fig. 4 Fitness between the actual and estimated grain production capacity after adjustment in various counties of the secondary agricultural zones in Huang-Huai-Hai region

注: a、b、c 和 d 分别为燕山太行山山麓平原农业区、冀鲁豫低洼平原农业区、黄淮平原农业区和山东丘陵农林区。***— $P < 0.001$ 。阴影部分为 95% 的置信域。

Note: a, b, c, and d represent Yanshan-Taihang Mountain foothill plain agricultural zone, Hebei-Shandong-Henan low-lying plain agricultural zone, Huanghuai Plain agricultural zone, and Shandong Hilly agricultural and forestry zone, respectively. ***— $P < 0.001$. The shaded part represent the 95% confidence interval.

能高估县, 其平均差值最小, 为 2.71×10^8 kg (图 4)。

此外, 本研究发现, 在粮食产能较低的县域, 校正后的产能与实际产量更为接近。相反, 在粮食产能较高的县域, 校正后的产能与实际产量之间的差距较大。其中, 山东丘陵农林区的拟合曲线斜率 (2.0712) 最为接近 1:1 线, 其校正后的粮食产能与粮食产量之间的差异较小。相比之下, 燕山太行山山麓平原农业区的拟合曲线斜率 (2.3224) 则最偏离 1:1 线, 其校正后的粮食产能与粮食产量之间差异较大 (图 4)。

3 讨论

3.1 耕地质量等级与粮食产能之间关系

本研究结果表明, 耕地质量等级与粮食单产呈正相关 (图 2), 这与杨建波等^[14]研究结果相似, 耕地

质量综合指数波动越大, 粮食单产变化也越明显。在耕地质量等级的评价指标中, 涵盖了有机质含量、土壤养分状况、质地构型、生物多样性等多个关键指标, 反映了土壤的物理、化学及生物特性^[15]。其中, 土壤有机质、有效磷和质地是解释作物产能变化的重要因素^[4], 这些指标提高会促进耕地质量和粮食产能的提升。

耕地质量等级反映了耕地生产能力的高低, 通过建立耕地质量等级和粮食单产之间的定量关系可以更准确地估算粮食生产潜力, 更好地指导土地资源的合理配置和利用, 确保粮食生产的稳定性^[16]。在本研究中, 通过特尔斐法确定耕地质量等级所对应的粮食单产, 集合多领域专家的知识经验和, 对黄淮海区耕地的产能进行系统分析和评估。耕地质量与粮食单产的拟合关系式表明, 粮食单产随着耕地质量等级的提升而提升, 当耕地质量提升至较高水

平时, 边际效应呈现递减, 粮食单产的涨幅趋于平缓, 这与杨建波等^[14]的研究结果一致。

在本研究中, 黄淮平原农业区的耕地质量综合指数平均值为 0.8562, 在 4 个二级农业区中最好, 但其对应的粮食单产却低于耕地质量条件相当的冀鲁豫低洼平原农业区 (图 2)。这一结果表明了粮食产能形成机制的复杂性, 同时受到气候条件、作物基因型、种植管理以及人为投入等多个因素的共同影响^[17]。气候条件通过热量资源供给、水分条件分配直接影响作物生理过程与产能形成^[18]。作物基因型也决定了作物的遗传特性, 直接影响了作物的生长表现, 是作物产能的重要影响因素^[19]。此外, 农田管理措施通过优化土壤养分、水分以及病虫害管理等, 以降低自然胁迫对作物产能的影响^[20]。这些因素的交互作用共同决定了二级区间的粮食单产差异。

3.2 粮食单产和产能空间格局与影响因素

本研究通过分析黄淮海各县粮食单产空间分布, 发现冀鲁豫低洼平原农业区、燕山太行山山麓平原农业区和黄淮平原农业区的粮食单产较高, 而山东丘陵农林区的粮食单产则相对较低 (图 3b)。这一现象可能与地形、水土流失、水资源状况以及土壤质地和肥力水平的区域差异有关。山东丘陵农林区地形复杂, 以丘陵为主, 坡度较大, 立地条件相对较差, 难以通过农业生产设施来提升作物产量。相比之下, 其他 3 个农业区地形较为平坦, 灌溉排水条件较好, 粮食单产也相对较高。此外, 土壤质地和肥力水平的差异也是导致耕地质量和产能差异的重要原因。山东丘陵农林区的土壤多为砂质土和轻壤土, 土层浅薄, 养分含量低。而其他 3 个农业区的土壤多为壤土和粘土, 土层深厚, 养分含量丰富, 有利于作物生长^[21-23]。

粮食产能由粮食单产和耕地面积两个要素构成^[24], 耕地面积受到资源要素、城镇化、区域政策、水土资源禀赋等众多要素的影响。由于各区域在自然、地理和经济状况上存在差异, 导致不同区域的耕地面积呈现出较大的差异^[25], 这也导致了本研究中 4 个二级区的粮食产能区域差异与粮食单产的变化趋势不完全一致 (图 3)。

校正后的粮食产能与统计年鉴上记录的实际粮食产量之间在统计上具有较高的拟合度 ($R^2 > 0.90$) (图 4), 表明校正后的拟合函数模型在大多数情况下能够较好地预测粮食产量。在粮食产能较低的县域, 校正后的产能与实际产量更为吻合, 而在粮

食产能较高的县域, 两者之间的差距较大。这可能是高产能县域的农业生产潜力更大, 但同时也可能伴随着更多的资源利用不均衡性、管理措施不确定性、技术应用不充分性等问题, 相比之下, 低产能县域由于基础产量较低, 受这些因素的干扰相对较小^[26-27]。

3.3 模型不确定性分析

本研究通过函数拟合了耕地质量综合指数和产量潜力之间的非线性关系, 为区域耕地资源管理和产能提升提供了科学依据。且模型通过引入粮食作物播种面积系数 (k) 考虑了耕地实际利用动态, 客观反映了非粮化、休耕等因素对产能的影响。校正后的粮食产能与实际粮食产量之间在统计上具有较高的拟合度 ($R^2 > 0.90$), 所采用的校正模型在预测实际粮食产量方面表现良好, 该方法在该区域有较好的适用性。同时, 研究结果也为更小尺度的产能估算模型构建提供了思路。

但校正后的粮食产能与粮食产量之间仍存在一定的差异, 这种差异可能源于样本分布不均导致的异方差性、模型结构简化以及未控制的外部因素的共同作用。首先, 高产能县域易受资源利用上限等限制, 实际产量往往低于理论产能, 而低产能县域资源利用强度简单, 更接近其生产潜力。样本中低产能县域数据占多数, 高产能县域观测值较少, 这可能引发回归模型的异方差性问题, 使得线性回归斜率产生系统性高估。其次, 当前模型将不同种类作物产量视为同质化整体进行分析, 未能充分考虑黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作体系下不同作物的差异性响应特征。未来还需要分作物建立质量-产量响应模型, 并引入基于种植结构的权重系数。再次, 基于二级区构建的粮食产能模型, 虽然通过年均温、年降水等稳态气候指标校正了空间异质性影响, 但模型并未考虑气候极端事件的年际变化率及生长季内水热匹配度波动对作物生长的干扰^[28]。例如, 冬小麦抽穗期干旱胁迫可导致 45% 的减产, 而同期夏玉米仅减产 19%^[29]。未来需融合气候波动指数与长期趋势分解方法, 以提升模型对气候动态的响应^[30]。当前模型通过二级农业区划分考虑了地形差异, 但地形对粮食产能的影响还需进一步精细化建模。未来可通过数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据计算坡度、地形起伏度及坡向分异指数等地形特征^[31], 将地形因子引入粮食产能的响应模型。

此外,当前采用的播种面积系数(k)考虑耕地休耕、撂荒、非粮化等问题,其也间接反映了气候波动、市场需求和政府政策的影响,但还存在两个局限:其一,系数未细分耕地质量等级,导致同一县域内高、低产田的产能差异被均质化处理;其二,系数校准依赖统计数据,难以捕捉耕地撂荒和非粮化的空间异质性特征。未来可融合 10 m 分辨率 Sentinel-2 遥感数据,结合面向对象分类和随机森林算法,充分考虑耕地的质量等级、作物类型、种植强度特征^[32]。

4 结论

黄淮海区耕地质量等级与粮食单产之间存在显著的正相关关系($R^2>0.95$),各县域尺度的粮食单产在空间上呈现出冀鲁豫低洼平原农业区、燕山太行山山麓平原农业区及黄淮平原农业区相对较高,而山东丘陵农林区相对较低的分布特征。结合耕地面积数据,计算得到的各县的粮食产能展现出南部较高、北部较低的特征。在二级区评价单元,粮食单产从大到小依次为冀鲁豫低洼平原农业区 [1.56×10^4 kg/(hm²·a)]、黄淮平原农业区 [1.52×10^4 kg/(hm²·a)]、燕山太行山山麓平原农业区 [1.51×10^4 kg/(hm²·a)]和山东丘陵农林区 [1.31×10^4 kg/(hm²·a)]。此外,校正后的粮食产能与实际粮食产量之间在统计上具有较高的拟合度($R^2>0.90$),这表明以耕地质量评估的粮食产能经校正后能较好的反映该区域的粮食生产潜力,整个黄淮海区的粮食产能为 3.18×10^{11} kg,粮食单产为 1.49×10^4 kg/(hm²·a)。

参 考 文 献:

- [1] 吴大放,刘艳艳,董玉祥,等.我国耕地数量、质量与空间变化研究综述[J]. *热带地理*, 2010, 30(2): 108–113.
Wu D F, Liu Y Y, Dong Y X, *et al.* A review of the quantity, quality, and spatial changes of cultivated land in China[J]. *Tropical Geography*, 2010, 30(2): 108–113.
- [2] 沈仁芳,陈美军,孔祥斌,等.耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1210–1217.
Shen R F, Chen M J, Kong X B, *et al.* The concept, assessment, and management strategies of cultivated land quality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1210–1217.
- [3] Wade J, Culman S W, Logan J A R, *et al.* Improved soil biological health increases corn grain yield in N fertilized systems across the corn belt[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3917.
- [4] Qiao L, Wang X, Smith P, *et al.* Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6): 574–580.
- [5] 陈延华,王乐,张淑香,等.我国褐土耕地质量的演变及对生产力的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(24): 4540–4554.
- [6] Chen Y H, Wang L, Zhang S X, *et al.* Evolution of cinnamon soil quality and its impact on productivity in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(24): 4540–4554.
- [7] 李玉浩,王红叶,张骏达,等.华南区稻田耕地质量空间分布与产能提升潜力[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(10): 1613–1625.
- [8] Li Y H, Wang H Y, Zhang J D, *et al.* Spatial distribution of cultivated land quality and potential for productivity improvement in paddy fields of South China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(10): 1613–1625.
- [9] 戈大专,龙花楼,屠爽爽,等.黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(4): 319–327.
- [10] Ge D Z, Long H L, Tu S S, *et al.* Coupling relationship between land use transition and grain yield in Huang-Huai-Hai region[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 319–327.
- [11] 李卓,刘淑亮,孙然好,等.黄淮海地区耕地复种指数的时空格局演变[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4454–4460.
- [12] Li Z, Liu S L, Sun R H, *et al.* Spatiotemporal evolution of multiple cropping index of cultivated land in Huang-Huai-Hai region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4454–4460.
- [13] 张英男,龙花楼,戈大专,等.黄淮海平原耕地功能演变的时空特征及其驱动机制[J]. *地理学报*, 2018, 73(3): 518–534.
- [14] Zhang Y N, Long H L, Ge D Z, *et al.* Spatiotemporal characteristics and driving mechanisms of cultivated land function evolution in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 518–534.
- [15] 丁文成,宋大利,周卫.我国耕地质量主控因素及提升策略[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(8): 1580–1594.
- [16] Ding W C, Song D L, Zhou W. The primary controlling factors of cultivated land quality and promotion strategies in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(8): 1580–1594.
- [17] 杨瑞珍,肖碧林,陈印军,等.黄淮海平原农业气候资源高效利用背景及主要农作技术[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(9): 88–93.
- [18] Yang R Z, Xiao B L, Chen Y J, *et al.* Efficient utilization of agricultural climate resources and key farming techniques in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(9): 88–93.
- [19] 姜玉琴,谢先进,黄达,等.耕地质量对耕地生产力的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(3): 75–80.
- [20] Jiang Y Q, Xie X J, Huang D, *et al.* Impact of cultivated land quality on land productivity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(3): 75–80.
- [21] Okoli C, Pawlowski S D. The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications[J]. *Information & Management*, 2004, 42(1): 15–29.
- [22] 杨建波,王朝晖,邱士可,等.耕地分等因素对粮食产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 306–311.
- [23] Yang J B, Wang Z H, Qiu S K, *et al.* Influence of cultivated land gradation factors on grain yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 306–311.
- [24] GB/T 33469—2016. 耕地质量等级[S]. 2016.
- [25] GB/T 33469—2016. Cultivated land quality grade[S]. 2016.

- [16] 张晋科, 张凤荣, 张琳, 等. 中国耕地的粮食生产能力与粮食产量对比研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(11): 2278–2285.
Zhang J K, Zhang F R, Zhang L, *et al.* Comparison between grain productivity and actual grain yield of cultivated land in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2278–2285.
- [17] Xu Y. Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2016, 129(4): 653–673.
- [18] Rezaei E E, Webber H, Asseng S, *et al.* Climate change impacts on crop yields[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(12): 831–846.
- [19] Mullualem D, Tsega A, Mengie T, *et al.* Genotype-by-environment interaction and stability analysis of grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using AMMI and GGE biplot analyses[J]. *Heliyon*, 2024, 10(12): e32918.
- [20] He H, Ding R, Tian X. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of grain yield at the county level in Shandong Province, China[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 12001.
- [21] 王婕, 魏朝富, 刘卫平, 等. 基于土地整治的山地丘陵区耕地质量潜力测算[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(7): 122–132.
Wang J, Wei C F, Liu W P, *et al.* Calculation of cultivated land quality potential in hilly and mountainous areas based on land consolidation[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2018, 40(7): 122–132.
- [22] 洪舒蔓, 郝晋珉, 周宁, 等. 黄淮海平原耕地变化及对粮食生产格局变化的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 268–277.
Hong S M, Hao J M, Zhou N, *et al.* Cultivated land change and its impact on grain production pattern in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21): 268–277.
- [23] 农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[J]. *中华人民共和国农业农村部公报*, 2020, (4): 113–121.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Bulletin of the national cultivated land quality grades in 2019[J]. *Gazette of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China*, 2020, (4): 113–121.
- [24] 余振平. 我国粮食主产区的粮食生产影响因素分析[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(3): 32–33.
Yu Z P. Analysis of factors influencing grain production in China's main grain-producing areas[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2020, 45(3): 32–33.
- [25] 郭淑敏, 马帅, 陈印军, 等. 我国粮食主产区粮食生产影响因素研究[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(1): 83–87.
Guo S M, Ma S, Chen Y J, *et al.* Study on factors influencing grain production in China's main grain-producing regions[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(1): 83–87.
- [26] 高婵, 张蚌蚌, 赵敏娟, 等. 中国耕地粮食生产能力及产量差测算[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(1): 10–18.
Gao C, Zhang B B, Zhao M J, *et al.* Estimation of grain production capacity and yield gap of cultivated land in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 10–18.
- [27] 李勇, 何欢欢. 主产区粮食产量时空格局演变与影响因素[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(6): 216–224.
Li Y, He H H. Spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of grain yield in main production areas[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(6): 216–224.
- [28] 荣越, 黄高彦, 马恒运, 等. 气候变化对黄淮海地区粮食单产影响的HP滤波法分析[J]. *河南农业大学学报*, 2025, 59(1): 179–188.
Rong Y, Huang G Y, Ma H Y, *et al.* Analysis of climate change impact on grain yield per unit area in Huang-Huai-Hai region using HP filter method[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2025, 59(1): 179–188.
- [29] 缪丽娟, 刘冉, 邹扬锋, 等. 黄淮海平原气候变化及对粮食产量影响研究综述[J]. *河南农业大学学报*, 2023, 57(1): 10–20.
Miao L J, Liu R, Zou Y F, *et al.* Review of climate change and its impact on grain yield in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2023, 57(1): 10–20.
- [30] Liu S, Mo X, Lin Z, *et al.* Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1195–1209.
- [31] 韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率DEM的地形特征提取与分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(1): 33–36.
Wei J L, Wang G B, Ling Z Y. Extraction and analysis of topographic features based on high-resolution DEM[J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2012, 35(1): 33–36.
- [32] 杨悦, 杨贵军, 龙慧灵, 等. 基于遥感时序物候特征的耕地非粮化多模式监测方法[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 283–294.
Yang Y, Yang G J, Long H L, *et al.* Multi-mode monitoring method of non-grain cultivated land based on remote sensing phenological characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(2): 283–294.