

# 面向粮食与生态“双安全”的中国耕地保护 分区管控研究

姜 坤,柯新利\*,王鹏飞

(华中农业大学 公共管理学院,湖北 武汉 430070)



**摘 要** 面向粮食与生态“双安全”目标的耕地保护分区管控研究,可为中国耕地资源可持续利用提供一定理论借鉴。基于耕地数量预测模型、共享社会经济路径模型预测中国未来耕地数量,借助InVEST模型、耕地综合评价指数等对耕地生态系统服务及产出水平特征进行测度,并提出时空耦合下的中国耕地保护分区管控策略。研究表明:(1)2020—2035年,中国所需耕地数量整体呈下降态势,尽管短期内所需耕地数量超过粮食安全警戒值,但从长远来看目前耕地规模可以满足长期粮食安全的需要;(2)耕地生态系统服务及产出水平在不同维度上呈现出显著区域差异,总体来看:高值区主要分布在长江中下游干流平原丘陵区、黄淮海区、东北区与江南丘陵山区,其他区域较低;(3)通过将时间尺度上的情景假设和空间尺度上的地块优越性进行空间叠加,将中国耕地划分为六大类管控区,不同管控区具有不同的耕地生态退化问题。由此提出应围绕粮食与生态“双安全”目标实施差异化耕地保护分区管控策略,以实现耕地资源长期可持续利用。

**关键词** 耕地保护;粮食安全;生态安全;分区管控

**中图分类号**:F323.21 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-3456(2025)05-0190-12

**DOI编码**:10.13300/j.cnki.hnwkxb.2025.05.017

耕地在粮食生产过程中发挥着重要支撑作用,是保障粮食安全的根本<sup>[1]</sup>。中国用仅占全球9%耕地资源和6%淡水资源养活了全球约20%的人口,当前中国口粮安全虽然得到有效保障,但随着经济社会持续发展、居民膳食消费转型升级,导致粮食需求增加以及结构性短缺矛盾凸显,粮食安全紧平衡格局依然没有发生改变<sup>[2-3]</sup>。此外,虽然通过提高耕地生产力的方式可以增加粮食供应,但长期高强度、集约化、超负荷的耕地利用,在保障耕地产出水平的同时也出现了耕地质量下降、水资源过度开发、水土流失严重、化肥农药过量使用等一系列问题,给生态安全带来巨大压力<sup>[4-5]</sup>。耕地生态安全问题逐渐成为制约中国粮食安全的主要障碍,必须兼顾粮食与生态“双安全”系统,中国才能实现耕地资源长期可持续利用。

近年来,面向粮食与生态“双安全”系统的耕地保护问题逐渐成为学术界探讨的核心。从粮食安全角度来看,学者们主要从数量、营养、能力等方面对粮食安全概念内涵进行辨析<sup>[6-8]</sup>,并从耕地适宜性评价<sup>[9]</sup>、种植结构调整<sup>[10]</sup>、空间布局优化<sup>[11]</sup>等方面提出了粮食安全目标下耕地保护的有效途径。从耕地生态安全角度来看,目前研究主要遵循“评价体系构建—障碍因子判别—调控策略探究”的逻辑框架,研究方法通常包括PSR模型<sup>[12]</sup>、状态空间模型<sup>[13]</sup>、生态足迹模型<sup>[14]</sup>、隐患—状态—免疫模型等<sup>[15]</sup>。上述研究丰富和完善了中国耕地保护理论与方法,但结合粮食与生态“双安全”目标综合思考,目前的耕地保护策略仍存在补充与拓展空间。

收稿日期:2024-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目“城市生态用地破碎化与土地功能演变的互馈机理研究”(41971240);国家资助博士后研究人员计划“顾及粮食安全与产业关联的耕地布局优化与省际横向利益补偿机制研究”(GZC20240550)。

\*为通讯作者。

人口变化对粮食与生态“双安全”系统具有重要影响。受气候变化、贸易保护主义、国际竞争与合作、地区冲突等因素影响<sup>[16-18]</sup>,未来社会经济发展路径具有一定的不确定性,导致不同发展路径下的人口规模也存在显著差异,而人口规模的增加或减少将直接对粮食需求量产生重要影响<sup>[19]</sup>。同时,人口—粮食耦合驱动下的耕地生产又必然伴随水土资源消耗及耕地负荷增加,加剧水土等自然资源稀缺性与生态治理问题<sup>[20]</sup>。而共享社会经济路径(the shared socioeconomic pathways model, SSPs)模型可以有效反映未来多情景下人口动态变化特征,预估粮食需求量阈值。在此基础上,通过将耕地产出水平与生态治理的类型、规模相结合,有望实现耕地资源区域差异的系统性管控。

因此,本研究以耕地多功能理论为指导,借助耕地数量预测模型、SSPs模型预测未来多情景下中国所需耕地数量,并根据耕地产出过程中存在的耕地质量下降、水资源过度开发、水土流失严重、化肥农药过量使用等突出生态退化问题构建耕地综合评价体系,最后根据长时间序列下耕地数量演变过程,将耕地产出水平与生态条件区域差异性相结合提出中国耕地保护分区管控策略,并明确耕地生态治理类型与规模。研究旨在补充与完善现有研究中对耕地保护分区管控方面的不足,并通过设计兼顾粮食与生态“双安全”的耕地保护分区管控思路,可为人与自然和谐共生的耕地保护制度转型提供一定理论依据。

## 一、研究设计与数据来源

### 1. 研究设计

(1)耕地数量预测模型。本研究耕地数量预测主要参考了蔡运龙等提出的最小人均耕地面积模型<sup>[21]</sup>,在此基础上,与一定区域范围内人口规模进行耦合,模型计算如下:

$$S = \beta \frac{G}{p \times q \times k} \quad (1)$$

式(1)中, $S$ 为耕地数量; $G$ 为粮食需求总量; $p$ 为粮食单产; $\beta$ 为粮食自给率; $k$ 为复种指数; $q$ 为粮作比。

①人口—发展—环境分析模型。国际应用系统分析研究所开发的人口—发展—环境分析(PDE)模型<sup>[22]</sup>可有效实现对未来人口规模变化的预测。该模型将不同人口特征视为不同“状态”,然后依据区域、性别、年龄、教育程度等差异,使人口在各个“状态”之间相互转换,并沿着出生队列自然地向后移动。某年出生的新人口数为:

$$P_n = \sum_{t=15}^{49} P_t \times R_t \times F_t \quad (2)$$

$$P_t = P_{t-1}' \times (1 - D_t) + M_t \quad (3)$$

上式中: $P_n$ 为第 $n$ 年的新生人口数; $P_t$ 为当年 $t$ 岁人口数; $R_t$ 为当年 $t$ 岁人口中女性比例; $F_t$ 为当年 $t$ 岁人口的生育率; $P_{t-1}'$ 为上一年 $t-1$ 岁人口数; $D_t$ 为当年 $t$ 岁人口的死亡率; $M_t$ 为当年 $t$ 岁迁移人口。

②粮食需求估算方法。目前,学者们一般将中国粮食消费划分为口粮消费、饲料用粮、工业用粮与种子用粮<sup>[23]</sup>四大类。

口粮消费。考虑到中国农村与城镇居民家庭收入水平、食物购买能力以及在外就餐频率等差异较大,导致两地区口粮消费数量和类别也呈现显著差异。因此,本研究对城镇居民口粮消费量和农村居民口粮消费量分别进行了测算,公式如下:

$$G_{jai} = \left( \frac{f_{ari}}{1 - r_{ao}} \times P_r + \frac{f_{aci}}{1 - r_{co}} \times P_c \right) \div 1000 \quad (4)$$

式(4)中: $G_{jai}$ 为第 $i$ 类口粮实际消费量; $f_{ari}$ 为农村家庭内第 $i$ 类口粮人均实际消费量; $f_{aci}$ 为城镇家庭内第 $i$ 类口粮人均实际消费量; $r_{co}$ 为城镇居民在外就餐比例; $r_{ao}$ 为农村居民在外就餐比例;参考前人研究<sup>[24]</sup>,农村设定为10.0%,城市为14.4%; $P_r$ 为农村人口规模; $P_c$ 为城镇人口规模; $i$ 为口粮消费类别。

饲料用粮。饲料用粮主要用于动物源食品生产,参考肖玉等的研究,猪肉耗粮系数为2.01;牛肉耗粮系数为0.93;羊肉耗粮系数为0.81;牛奶耗粮系数为0.35;禽蛋耗粮系数为1.72;禽肉耗粮系数为1.62;水产品耗粮系数为1.20<sup>[25]</sup>。已有研究表明<sup>[26]</sup>,目前中国城镇居民饲料粮消费量从膳食均衡角度考虑,已经达到了高营养标准。同时,根据《中国农业展望报告》(2021—2030年),随着农业现代化水平提高,种植结构不断调整,至2030年中国粮食与重要农产品供应将有极大保障,故本研究假设中国农村居民饲料粮消费的高营养目标在2030年也可以达到。

工业用粮。据统计,在中国工业产品中啤酒、白酒、酒精和味精等消耗大约75%的工业用粮<sup>[25]</sup>,其中啤酒耗粮系数为0.17;白酒耗粮系数为2.30;酒精耗粮系数为3.00;味精耗粮系数为5.00。由于当前中国粮食安全形势严峻,且基于营养健康方面考虑,酒类、味精等为不推荐消费品,故本研究假定工业用粮保持现有消费水平。

种子用粮。根据国家公布的种子用粮统计数据,用于播种用途的种子用粮需求波动较小,且近年来粮食作物播种量随着种子处理技术和科学播种技术推广呈现稳中略降态势<sup>[27]</sup>。因此,本研究采用趋势外推法,依据1991—2020年种子用粮的历史数据序列对未来种子用粮的需求量进行估算。

③单产提升潜力衰减模型。由于耕地单产潜力具有一定极限,在不断提升单产量并趋近潜力值上限的情况下,耕地单产增速将逐渐放缓,而这一变化规律可以利用指数衰减模型的函数曲线较好反映<sup>[28]</sup>。因此,本研究设定基因改良等外部手段对农作物生长状况不产生干扰,基于1991—2020年粮食单产数据构建回归分析模型。模型计算如下:

$$H_q - H_t = e^{-ct+a} \quad (5)$$

式(5)中: $H_q - H_t$ 为耕地的单产提升潜力; $e^{-ct+a}$ 为单产提升潜力指数衰减模数; $H_q$ 为耕地单产潜力的平均值; $H_t$ 为第 $t$ 年粮食的单产量; $t$ 为时间(历史数据起始年取值为1)。

④共享社会经济路径(SSPs)模型。共享社会经济路径模型于2010年在联合国气候变化报告上首次提出,该模型主要设计了未来全球社会经济可能朝着可持续路径(SSP1)、中间路径(SSP2)、区域竞争路径(SSP3)、不均衡路径(SSP4)与化石燃料发展路径(SSP5)发展的5种情景框架(如图1)。本研究SSPs多情景设定主要根据人口动态变化过程来表征,即未来能源资源开发利用、国际分工与合作、极端气候条件、地缘政治冲突等内容均通过人口规模变化间接反映。粮食自给率可以有效反映一个地区的粮食安全状况,即粮食自给率越高的地区,粮食安全状况越好,反之则越差。因此,粮食自给率的目标设定将直接影响国家粮食安全,参考梁鑫源等<sup>[29]</sup>研究,结合SSPs各情景中应对挑战难度,将粮食自给率设置为三种类型,分别为SSP1情景下适度自给(90%);SSP2、SSP4和SSP5情景下高度自给(95%);SSP3情景下完全自给(100%)。最后,通过参考粮作比的历年演变趋势,结合国家农业结构的未来调整方向,本研究将粮作比参数设置为0.68,复种指数设置为1.20<sup>[30]</sup>。

(2)土壤保持服务。土壤保持服务是指人类期望能够被治理的实际土壤侵蚀量<sup>[31-32]</sup>。本研究采用InVEST模型中的泥沙输移比模块对土壤保持服务进行估算,模型计算如下:

$$SC = RKLS - USLE \quad (6)$$

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (7)$$

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (8)$$

上述式中, $SC$ 为土壤保持量( $t/hm^2$ ); $RKLS$ 为潜在土壤侵蚀量( $t/hm^2$ ); $USLE$ 为实际土壤侵蚀量( $t/hm^2$ ); $R$ 为降雨侵蚀因子( $MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h \cdot a$ ),采用日降雨侵蚀力模型计算<sup>[33]</sup>;  $K$ 为土壤可蚀性因子( $t \cdot hm^2 \cdot h/hm^2 \cdot MJ \cdot mm$ ),采用Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC)模型计算<sup>[34]</sup>;  $LS$ 为坡长—坡度因子,采用DEM数据提取坡长、坡度,基于McCool等<sup>[35]</sup>和刘宝元等<sup>[36]</sup>方法计算;  $C$ 为植被覆盖管理因子,采用蔡崇法等<sup>[37]</sup>方法计算;  $P$ 为水土保持因子,采用郑伟伟<sup>[38]</sup>方法计算。

(3)水供给服务。本研究借助InVEST模型中的产水量模块评估耕地水供给服务能力<sup>[39-41]</sup>。该模块基于Budyko水热耦合平衡原理,在各个栅格单元上通过降水量减去实际蒸散量,从而获得每个栅格单元水供给服务值,模型计算如下:

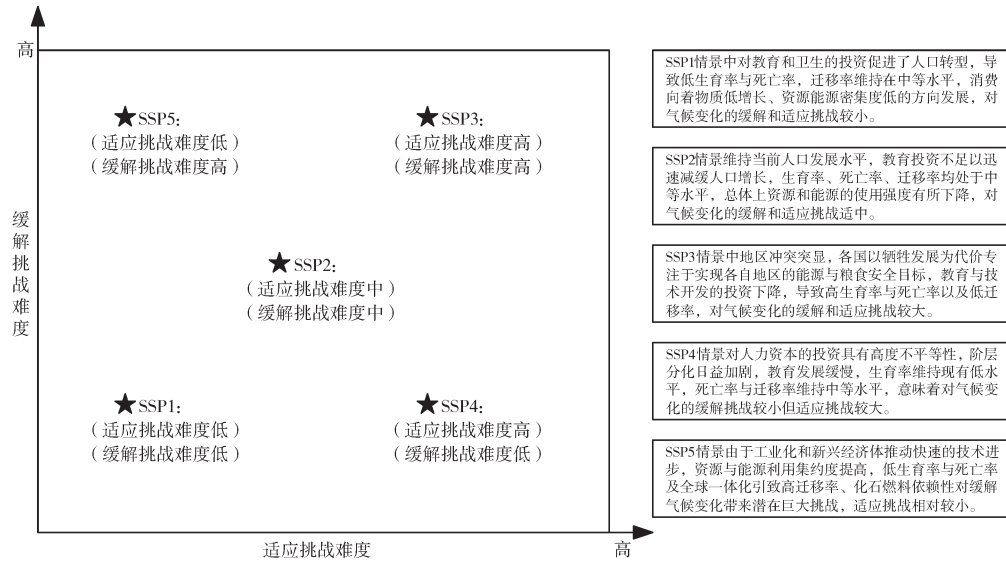


图1 共享社会经济路径各情景解析

$$Y_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) \times P_x \quad (9)$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x + R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + (1/R_{xj})} \quad (10)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{PAWC_x}{P_x} \quad (11)$$

$$R_{xj} = \frac{k_{ij} \times ET_0}{P_x} \quad (12)$$

上述式中,  $Y_{xj}$  为土地类型  $j$  上栅格单元  $x$  的年均水供给深度;  $AET_x$  为土地类型  $j$  上栅格单元  $x$  的年实际蒸散量;  $P_x$  为栅格单元  $x$  的年降水量;  $R_{xj}$  为潜在蒸散发与降雨量比值;  $\omega_x$  为修正植被年可利用水量与预期降水量的比值;  $Z$  为 Zhang 系数, 采用 Zhang 等<sup>[42]</sup>方法计算;  $PAWC_x$  为植物可利用含水量, 采用 Zhou 等<sup>[43]</sup>方法计算;  $ET_0$  为栅格单元  $x$  的潜在蒸散发量;  $k_{ij}$  为不同植物蒸散发系数, 主要参考《INVEST 模型使用手册》中推荐的不同土地覆被蒸散发相关系数。

(4) 耕地综合评价指数。本研究从耕地产出水平、耕地质量、耕地面源污染、水供给服务、土壤保持五个维度, 通过层次分析法构建综合评价指数<sup>[44]</sup>, 以此衡量不同维度对休耕时序的综合影响, 公式如下:

$$S_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} \times W_i \quad (13)$$

式(13)中:  $S_j$  为综合评价指数在第  $j$  年的值;  $n$  为耕地综合评价维度数;  $P_{ij}$  为第  $i$  个维度在第  $j$  年的归一化值;  $W_i$  为第  $i$  个维度指标权重。

(5) 耕地保护分区分区管控规则构建。本研究将共享社会经济路径(SSPs)下耕地数量预测的上限与下限作为耕地保护的边界范围, 并在遵循各农业分区差异化本底基础上, 通过将耕地产出水平与不同生态系统服务维度相结合对耕地资源进行空间配置, 即分别以各农业区耕地产出水平均值与各生态系统服务均值为参考, 若耕地产出水平维度分值与四个生态系统服务维度分值皆低于该区域相应均值, 则初步将该部分耕地判定为可休耕备选地块。在此基础上, 根据耕地综合评价指数由小到大依次优选满足五维、四维、三维、二维、一维的地块进行休耕。由此, SSPs 多情景下耕地保护分区分区管控策略通过空间叠加构建。

## 2. 数据来源及处理

本研究所需数据包括: (1) 土地利用数据、植被净初级生产力(NPP)数据、数字高程模型(DEM)、气象数据、水系流域数据、农田生产潜力数据等主要从中国科学院资源环境科学数据中心(<https://>

www.resdc.cn/)获取,农业资源环境分区数据主要从全球变化科学研究数据出版系统(<https://www.geodoi.ac.cn>)获取,土壤数据主要从世界土壤数据库(HWSD)获取。为便于空间数据分析,栅格数据均处理为1000米分辨率,时间节点为2020年。(2)社会经济统计数据主要从1990—2021年《中国统计年鉴》《中国社会统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》以及31个样本省(市、区)统计年鉴(未含港澳台数据)获取,数据类型包括城乡居民家庭主要食物人均消费量、不同粮食作物播种量、化肥施用量、肉蛋奶水产品等产量。其中耕地产出水平主要通过农田生产潜力表征,耕地质量主要是对2001—2020年NPP进行均值计算获取<sup>[45]</sup>,耕地面源污染数据主要是对中国31个样本省(未含港澳台数据)的368个地级市、省直辖县化肥施用量进行统计,然后结合每个地区耕地面积进行栅格化处理获取。

## 二、耕地保有量预测及生态系统服务特征分析

### 1. 多情景下耕地数量预测

基于SPPs模型预测,2020—2035年耕地数量在未来社会经济发展各个情景中均表现出下降态势(如图2)。其中,SSP1情景下未来中国所需耕地数量区间范围最小,为1.037亿~1.180亿公顷,可设定为中国粮食安全下限,这与人们受教育程度提高以及医疗卫生条件改善导致低生育率与死亡率,消费向着物质低增长、资源能源密集度低方向发展密切相关。SSP3情景下未来中国所需耕地数量区间范围最大,为1.178亿~1.321亿公顷,可设定为中国粮食安全上限,这与各国面对严峻国际形势,专注于实现能源自给自足与粮食安全目标密切相关。从耕地数量预测的长时间演变序列分析,目前中国耕地规模可以保障长期粮食安全。但在相同时间截面下,2020年中国所需耕地数量范围为1.180亿~1.321亿公顷,已超过18亿亩耕地保护红线警戒值。同时,高强度、集约化耕地利用导致的耕地生态系统退化,直接影响耕地产出水平,制约粮食有效供给。因此,为实现耕地资源长期可持续利用,亟需进一步完善耕地保护策略。

### 2. 耕地生态系统服务及产出水平特征

从不同维度对中国耕地生态系统服务及产出水平进行评估,结果如图3。从耕地质量维度看,高值区主要分布在长江中下游干流平原丘陵区,其次为黄淮海区、江南丘陵山区与东北区,不同农业区耕地质量2020—2035年均值基本保持在0.130~0.391之间。从耕地面源污染维度看,高值区主要分布在东北区与黄淮海区,均值保持在0.203以上,青藏高原区最低。从土壤保持维度看,除黄土高原区、西北干旱区与西南区外,其他农业区土壤保持均值小于0.023。从水供给服务维度看,高值区主要分布在江南丘陵山区、东南区与长江中下游干流平原丘陵区,均值维持在0.365以上水平,低值区分布在西北干旱区与内蒙古及长城沿线区。从耕地产出水平来看,高值区主要分布在长江中下游干流平原丘陵区、黄淮海区、东北区等地区,均值保持在0.226以上,低值区主要分布在青藏高原区、内蒙古及长城沿线区及西北干旱区。从耕地综合评价指数看,高值区主要分布在长江中下游干流平原丘陵区,其次为黄淮海区、东北区与江南丘陵山区,均值保持在0.396以上,这些地区土壤肥沃,水热条件良好,耕地生产条件优越。

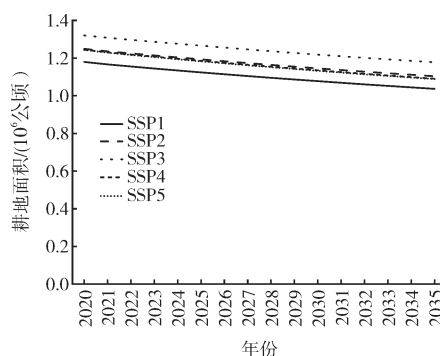


图2 未来多情景下的耕地数量预测

## 三、面向粮食与生态“双安全”的耕地保护分区管控构建

### 1. 耕地数量预测上限与下限

以SSPs多情景下耕地数量预测的上限与下限作为耕地保护边界范围,利用耕地综合评价指数优先选取地块条件优越的耕地,并将2025年、2030年与2035年三个时间截面预测的耕地数量分别设定为近期、中期与远期耕地保护与休耕分界点,如图4。SSP1为全球可持续路径下预测的耕地数量,

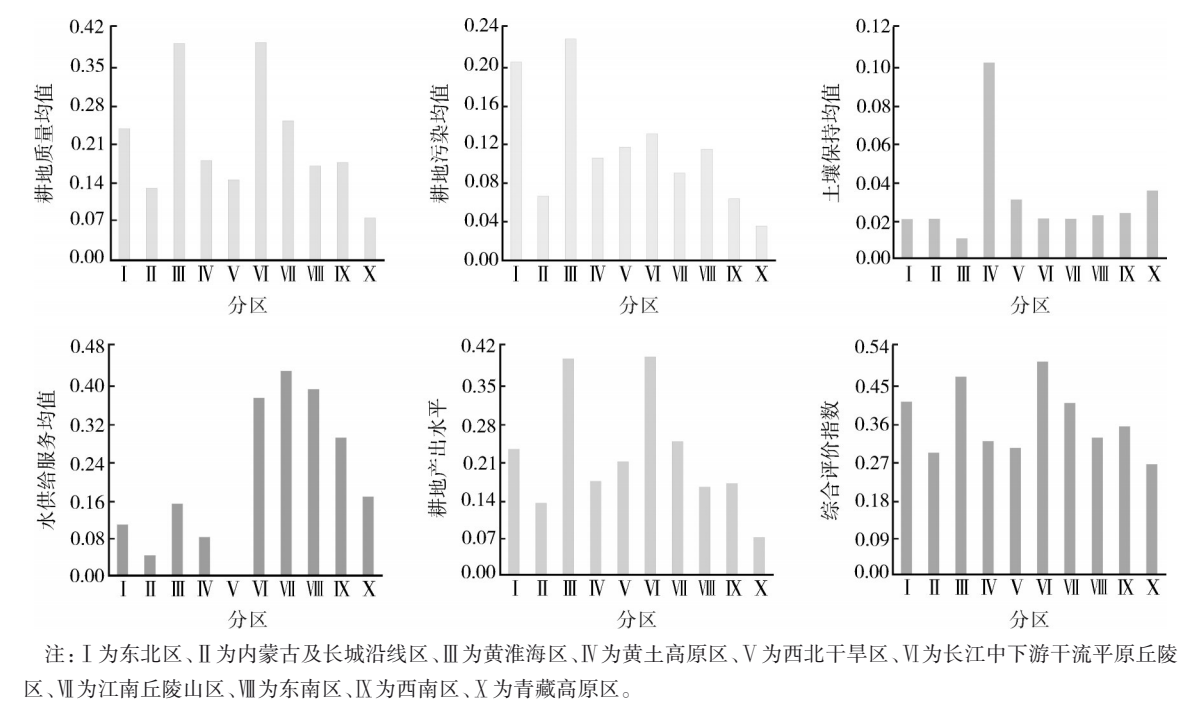


图3 耕地生态系统服务及产出水平均值

近期可休耕比例为4.72%、中期可休耕比例为8.66%、远期可休耕比例为12.12%,至2035年需保证87.88%耕地继续从事农业生产。SSP3为区域竞争路径下预测的耕地数量,近期可休耕比例为4.12%、中期可休耕比例为7.75%、远期可休耕比例为10.82%,至2035年需保证89.18%的耕地继续从事农业生产。在SSP1可持续路径下,通过稳定的国际粮食贸易,各个国家和地区可以弥补国内粮食供给不足,缓解耕地生产压力。而在SSP3区域竞争路径下,地区冲突加剧,各个国家为完全掌握粮食安全主动权导致巨大耕地生产压力。针对当前国际冲突加剧、贸易保护主义盛行等,中国应保障近期可休耕生息的耕地占比不高于4.12%。

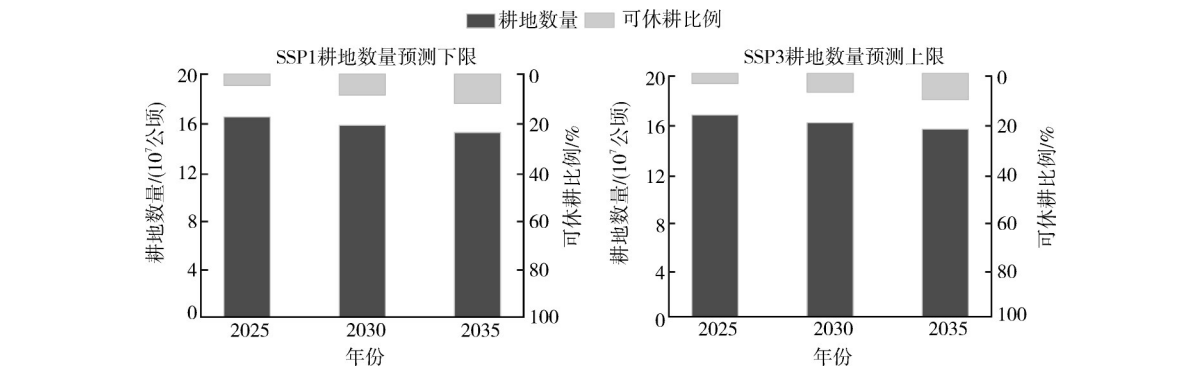


图4 2020—2035年中国耕地数量预测

2. 耕地保护分区分区管控总体特征分析

将时间尺度上预测的耕地数量与空间尺度上地块优越性进行叠加,构建了六大类管控区(如图5)。具体为:高产—核心管控区(81.98%),该地区耕地产出水平超过整体均值,各维度主要表现为无劣势或一维劣势,是各个时期内必须始终严格保护的耕地。中产—质量提升区(2.21%),该地区耕地产出水平接近整体均值,主要以耕地质量—水供给服务、耕地质量—土壤保持劣势为其主要表现特征,是近中期需要借助外部力量提升耕地质量,以促进耕地产出水平的耕地。中产—污染修复区(2.16%),该地区耕地产出水平接近整体均值,主要以耕地污染—水供给服务、耕地污染—土壤保持劣势为其主要表现特征,是中远期内需要减少农药化肥施用、修复面源污染等提升耕地产出水平的耕

地。低产—水土治理区(3.60%),该地区受土壤保持—水供给服务、土壤保持—耕地质量等劣势影响,耕地产出水平远低于整体均值,中远期内需要采取生物措施或工程措施推进土壤侵蚀治理,以提升耕地产出水平。低产—水源节约灌区(4.12%),该地区受水供给服务—耕地质量、水供给服务—耕地污染等劣势影响,耕地产出水平远低于整体均值,近中期内需要节约农用水,完善农田灌溉设施等提升耕地产出水平。低产—综合防治区(5.93%),该地区受耕地质量、水供给服务、耕地污染、土壤保持等多个维度劣势影响,耕地产出水平较低,远期内需要采取多种举措进行综合防治来提升耕地产出水平。

### 3. 不同农业区耕地保护分区管控差异性分析

本研究以中国 10 个一级农业区、57 个二级农业区的资源环境条件为背景,提出差异化的耕地保护分区管控策略:

(1)一级农业区从宏观尺度综合反映了地质地貌、气候水文等状况以及国土空间规划主体功能特征。从整体上看,各农业区 69.98% 以上耕地均处于高产—核心管控区范围内,有利于各区域内优质耕地充分利用,同时也显著增强了地方粮食稳定供给能力。但受地域分异规律、人类活动等影响,各一级农业区耕地保护分区管控目标也存在一定差异,具体为:

东北地区作为全国重要的粮食主产区和粮食调出区,耕地产出水平较高,高产—核心管控区面积占 91.44%,近年来随着东北产业结构调整与农业生产压力增大、黑土地变薄等,耕地质量出现下降趋势,其中中产—质量提升区面积占 4.19%,应增加耕作层土壤有机质以及保水保肥等,全面提升现代农业综合生产能力。

内蒙古及长城沿线区作为全国重要的青饲料生产基地,区域内生态环境脆弱,水资源短缺,水土流失严重,严重制约了耕地产出水平提高,其中低产—水源节约灌区、低产—水土治理区面积分别占 7.45% 和 4.75%,应采取包括国土整治、生态修复在内的多项措施,实现耕地资源永续利用。

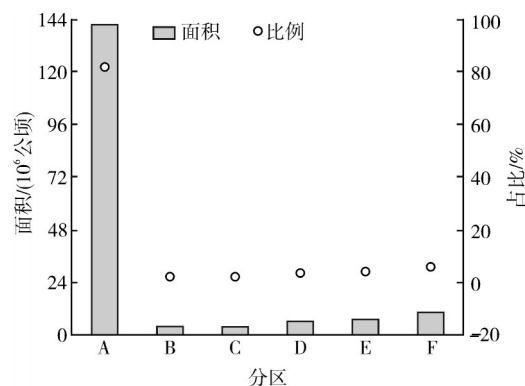
黄淮海区作为全国重要的粮、棉、肉等大宗农产品生产基地,高产—核心管控区面积达到 93.44%,但水资源过度开采、农药化肥过量施用等制约着耕地综合生产能力,导致中产—污染修复区与低产—水源节约灌区面积占据一定比重,应创新现代农业经营模式,推进水土综合治理工程。

黄土高原区的特色经济林果、绿色五谷杂粮在全国占有重要地位,但该区域地形复杂多样,水土流失侵蚀了大量土壤养分,造成耕地产出水平下降,其中低产—水土治理区、低产—水源节约灌区面积分别占 8.90% 和 3.87%,应实施退耕还林还草、黄土丘陵沟壑区治沟造地等重大工程,重构水土气生相融合地域格局。

西北干旱区以绿洲农业为主,是全国重要棉花、水果生产区,由于水资源缺乏,自然环境恶劣,农业用水成为该区耕地产出的主要制约因素,其中低产—水源节约灌区的面积高达 24.87%,亟需推广节水保育技术,解决水土资源不匹配、低效利用问题。

长江中下游干流平原丘陵区作为我国重要的水稻、棉花、油菜产区,耕地生产条件优越,高产—核心管控区面积占 91.78%,但该地区主体功能定位为城镇优化开发区与农业重点开发区,耕地面临撂荒、闲置等问题,降低了耕地产出能力,其中中产—质量提升区面积占 6.19%,亟需创新土地流转制度与经营模式,提高耕地利用效益。

江南丘陵山区的水稻、茶叶、柑橘等亚热带经济作物产量在全国占据较大比重,是我国重要复合农业区,高产—核心管控区面积占 89.65%,但随着人口城镇化,农民出现兼业化、耕地质量退化等,中



注: A 高产—核心管控区、B 中产—质量提升区、C 中产—污染修复区、D 低产—水土治理区、E 低产—水源节约灌区、F 低产—综合防治区。

图 5 中国耕地各管控区面积及所占比例

产—质量提升区面积也占据7.00%,需加强土地整治与水利建设,稳定提高耕地综合产能。

东南区作为全国重要水产品养殖和经济作物种植区,高产—核心管控区面积占81.37%,但该地区地形复杂,降雨集中,土层较薄,不合理耕作及植被破坏导致大量土壤被冲刷流失,耕地产出水平降低,其中中产—质量提升区、低产—水土治理区与低产—综合防治区面积分别占4.95%、5.60%与3.54%,应积极推广保护性耕作,如秸秆覆盖、植物茬子覆盖等,增强耕地水土保持能力。

西南区是我国重要水稻、棉花、油菜籽主要生产区,高产—核心管控区面积占81.01%,但该地区盆地与高原相间分布,地形起伏度大,垂直地带性明显,尤其是云贵高原的喀斯特地貌使得地表水缺乏、石漠化严重、旱涝灾害频发,对耕地产出水平起到重要影响,其中低产—水土治理区、低产—水源节灌区与低产—综合整治区面积分别占据7.11%、5.26%与5.17%,应积极开展植树造林、封山育林等生态保护工程。

青藏高原区作为我国传统高原农牧区,因高寒、地形起伏、资源环境承载力较弱,耕地产出水平整体不高,中产—质量提升区、低产—水土治理区、低产—水源节灌区均占据较大比重,其中低产—综合防治区面积占比达到14.29%,生态保育是本区农业主导地域功能。

(2)二级农业区的耕地保护分区分区管控不仅考虑宏观尺度如光、温、水、土、气等农业资源分异特征,也综合考虑地方国土空间规划主体功能、城乡发展阶段以及农业现代化水平等经济社会因素,区域发展的非均衡性导致二级农业区耕地保护分区分区管控策略的空间变化较为显著<sup>[46]</sup>,具体如表1。

表1 二级农业区耕地保护分区分区管控策略

一级农业区	二级农业区	策略
Ⅰ 东北地区	Ⅰ <sub>1</sub> 三江平原区	高产—核心管控区占主导地位,应大力发展现代种植业,兼顾湿地保护。
	Ⅰ <sub>2</sub> 大兴安岭山区	中产—质量提升区、低产—水土治理区分别占2.35%和13.75%,应建设生态护坡工程,控制土壤侵蚀,发展休闲观光农业。
	Ⅰ <sub>3</sub> 小兴安岭山区	低产—水土治理区占比较高,应与民族地区发展、生态保护相结合,发挥特色农业经济优势。
	Ⅰ <sub>4</sub> 长白山山区	低产—综合防治区占据一定比重,应统筹山水林田湖草沙综合治理,促进农旅业耦合协调发展。
	Ⅰ <sub>5</sub> 松嫩平原区	高产—核心管控区占96.21%,但中产—质量提升区也占据一定比例,应开展休耕轮作,推广有机农业与精准农业,减少对黑土地的耗损。
	Ⅰ <sub>6</sub> 辽宁平原丘陵区	低产—水源节灌区、低产—水土治理区均有分布,应完善农田水利设施,加强水土保持工作,建成区域性生态农业区。
	Ⅰ <sub>7</sub> 辽中南地区	中产—质量提升区、中产—污染修复区分别占5.57%和3.39%,应加强耕地占补监管,提升耕地质量,修复耕地污染,建设规模化、优质化粮食种植基地。
	Ⅰ <sub>8</sub> 西辽河丘陵区	中产—质量提升区占比较高,为11.71%,应减少耕地过度开垦,注重耕地质量修复,优化粮经饲种植比例。
	Ⅰ <sub>9</sub> 呼伦贝尔草原区	低产—水土治理区、中产—质量提升区分别占5.58%和8.96%,应修复侵蚀沟和黑土层,严禁非法种植,大力推广草原精品畜牧业。
Ⅱ 内蒙古及长城沿线区	Ⅱ <sub>1</sub> 锡林郭勒东部草原区	中产—质量提升区、低产—水源节灌区分别占4.14%和4.42%,应加强耕地质量提升,完善农田水利设施,推进现代种植业、畜牧业、生态旅游业协调发展新模式。
	Ⅱ <sub>2</sub> 锡林郭勒西部荒漠草原区	低产—综合防治区、低产—水源节灌区分别占10.49%和9.11%,应加大对荒漠化、盐碱化耕地综合治理,严禁过度开垦放牧,节约用水。
	Ⅱ <sub>3</sub> 阴山两麓—长城沿线区	低产—水土治理区、低产—综合防治区分别占3.35%和2.38%,应推进荒漠化、沙化耕地治理,增强水源涵养能力,构建北繁南育现代农牧业新模式。
	Ⅱ <sub>4</sub> 呼包河套区	低产—水源节灌区占比较多,应优化农田灌溉方式,加强耕地盐碱化治理,建设全域绿色有机高端农牧带。
	Ⅱ <sub>5</sub> 鄂尔多斯高原区	中产—污染修复区、低产—综合防治区分别占7.73%和7.19%,应实施“培肥改土排盐”工程,开展耕地面源污染防治,对遗留废弃矿山进行生态复垦,打造绿色农畜产品生产加工输出基地。
Ⅲ 黄淮海区	Ⅲ <sub>1</sub> 华北平原区	高产—核心管控区占据主导,但低产—水源节灌区和中产—污染修复区也分别占3.23%和2.43%,应实施引水灌溉工程,修复污染土壤,适度轮作休耕,充分发挥传统粮食种植和牲畜养殖比较优势,建设农业技术应用示范区。
	Ⅲ <sub>2</sub> 山东丘陵区	中产—污染修复区、低产—水源节灌区分布较广,应防治地膜残留污染,保水保肥,推进农田宜机化建设,优先发展果蔬精品农业,促进与互联网+、现代物流产业的融合发展。

续表 1

一级农业区	二级农业区	策略
Ⅳ 黄土高原区	Ⅲ <sub>3</sub> 黄淮平原区	中产—污染修复区、低产—水源节灌区分别占 3.06% 和 2.52%, 应开展农药化肥减量行动, 修复面源污染, 完善田间灌排配套设施, 优化农业经营模式。
	Ⅲ <sub>4</sub> 渤海湾区	中产—质量提升区占比较高, 应推进土壤改良, 治理耕地盐碱化, 推广种植抗逆耐盐品种, 促进农业基地化、信息化和技术化发展。
	Ⅳ <sub>1</sub> 晋豫土石山区	低产—水土治理区、中产—质量提升区分别占 5.36% 和 4.74%, 应实施坡耕地水土流失综合治理, 保水、保土、保肥, 推进农业现代化。
	Ⅳ <sub>2</sub> 汾渭谷地区	高产—核心管控区占据主导地位, 但低产—水土治理区分布也占据 3.19%, 应与生态保育相结合, 建设杂粮、林果特色生产区, 保护地区农业文化。
	Ⅳ <sub>3</sub> 黄土高原沟壑区	低产—水土治理区、低产—综合防治区分别占 6.16% 和 3.48%, 应推广沟道一边坡土地整治工程, 促进区域“三生”结合, 创建有机农业特区。
	Ⅳ <sub>4</sub> 陕北宁东丘陵沙地区	低产—水土治理区、低产—水源节灌区分别占 7.11% 和 6.01%, 应实施退耕还林工程, 节约用水, 构建区域性生态、绿色、安全的现代特色农业体系。
Ⅴ 西北干旱区	Ⅳ <sub>5</sub> 黄土丘陵沟壑区	低产—综合防治区、低产—水土治理区分别占 7.69% 和 8.66%, 应实施土地整治、土壤改良、良种优选“三位一体”, 着力改善农业生产条件。
	Ⅴ <sub>1</sub> 天山北坡区	低产—水源节灌区占 18.48%, 应推广以滴灌为主的高效节水措施, 建设面向全国的优质粮棉、水果、牲畜生产基地。
	Ⅴ <sub>2</sub> 伊犁河流域区	中产—质量提升区、低产—水源节灌区分布较多, 应实施农田防护工程和水利工程措施, 严控耕地占补平衡, 推进农业机械化、市场化、专业化发展。
	Ⅴ <sub>3</sub> 额尔齐斯—乌伦古河流域区	低产—水源节灌区占 15.43%, 应多举措完善灌排体系, 改善种植条件, 打造全国优质农牧产品供给基地。
	Ⅴ <sub>4</sub> 塔里木河流域区	低产—水源节灌区占 36.61%, 应严禁过度开垦, 推广节水农业, 突出农业的生态保育功能、社会保障功能。
	Ⅴ <sub>5</sub> 东疆地区	低产—水源节灌区、中产—质量提升区分别占 33.85% 和 2.38%, 应疏通灌排渠系, 改善土壤理化性质, 发展瓜果、棉花等特色农产品种植业。
	Ⅴ <sub>6</sub> 阿拉善—额济纳高原区	低产—水源节灌区、低产—综合防治区占据较大比重, 应实施退耕还林还草涵养水源, 推进耕地荒漠化综合治理, 建设优质青饲料基地。
	Ⅴ <sub>7</sub> 河西走廊区	低产—综合防治区、低产—水源节灌区分别占 3.51% 和 12.89%, 应加强对荒漠化、半荒漠化耕地综合治理, 发展灌溉农业, 打造国家商品粮基地与经济作物集中产区。
Ⅵ 长江中下游干流平原丘陵区	Ⅴ <sub>8</sub> 银川平原区	中产—质量提升区、低产—水源节灌区分别占 4.28% 和 25.33%, 应改良土壤、加强对耕地盐碱化治理, 完善农业灌排设施, 建设区域性优质农产品基地, 提高农业现代化水平。
	Ⅵ <sub>1</sub> 长三角地区	高产—核心管控区占 96.58%, 应严守耕地保护红线, 建设兼具生产、教育、游憩、生态等多功能的现代农业园区。
	Ⅵ <sub>2</sub> 江淮地区	高产—核心管控区占主导, 但中产—质量提升区也占据一定比重, 应完善土地流转制度, 防止耕地季节性撂荒, 强化油菜、棉花等优势农产品生产功能。
	Ⅵ <sub>3</sub> 长江中游平原区	中产—质量提升区分布面积较多, 应开展耕地碎片化整治, 推广农业生态化、立体式种养等模式, 建设面向全国的特色农产品生产基地。
	Ⅵ <sub>4</sub> 豫皖鄂平原丘陵区	高产—核心管控区、中产—质量提升区分别占 95.49% 和 2.95%, 应严禁耕地抛荒, 提升耕地质量, 优化种植结构, 发展生态农业与特色农产品产业。
Ⅶ 江南丘陵山区	Ⅶ <sub>1</sub> 赣江流域中上游区	中产—质量提升区占 5.88%, 应修复损毁耕地, 推行农林结合发展, 加快建设优质农林产品生产。
	Ⅶ <sub>2</sub> 湘江流域中上游区	中产—质量提升区占 6.73%, 应严格管控耕地抛荒行为及用途转换, 提升耕地质量, 优化水稻、经济作物与水果种植协同发展。
Ⅷ 东南区	Ⅷ <sub>1</sub> 浙闽粤沿海平原丘陵区	中产—质量提升区、低产—水土治理区分别占 7.68% 和 7.05%, 应健全土地流转制度, 禁止耕地撂荒, 加强水土保持, 优先发展临海观光休闲农业。
	Ⅷ <sub>2</sub> 粤西桂南丘陵区	低产—水源节灌区、低产—水土治理区分别占 3.30% 和 10.28%, 应夯实农田水利设施, 减少耕地利用强度, 注重生态保育, 发展经济作物种植、休闲观光农业, 建设面向全国的蔬菜基地。
	Ⅷ <sub>3</sub> 海南岛区	高产—核心管控区占主导, 应发展热带现代高效农业, 建成全国热带经济作物生产与良种繁育基地。
	Ⅷ <sub>4</sub> 粤桂沿海丘陵区	中产—质量提升区占 5.48%, 应健全土地流转制度, 禁止耕地撂荒, 提升耕地质量, 重点发展亚热带现代农业、观光休闲品牌农业。
	Ⅷ <sub>5</sub> 浙闽丘陵山区	低产—水土治理区、低产—综合防治区分别占 3.10% 和 3.07%, 应加强水土流失防治, 整治耕地碎片化, 大力发展特色农产品生产。

续表 1

一级农业区	二级农业区	策略
Ⅸ 西南区	Ⅷ <sub>6</sub> 粤北桂北丘陵山区	中产—质量提升区、低产—水土治理区分别占 5.60% 和 5.49%, 应增加耕地肥力, 加强土壤侵蚀治理, 推行农业机械化, 建设全国性甘蔗、水果、茶叶等特色农业生产基地。
	Ⅷ <sub>7</sub> 珠三角地区	高产—核心管控区占据主导地位, 应严守耕地保护红线, 严禁耕地用途转换, 挖掘“桑基鱼塘”文化内涵, 建设田园综合体与都市现代农业区。
	Ⅸ <sub>1</sub> 秦岭、伏牛、川东山区	低产—水土治理区、低产—水源节灌区、低产—综合整治区分别占 19.70%、8.96% 和 8.95%, 应与农田水利建设、生态保育相结合, 突出山区特色农业, 建立有机基地型现代农业经营方式。
	Ⅸ <sub>2</sub> 四川盆地区	高产—核心管控区占据主导地位, 应完善农田基础设施, 建设水稻、油菜籽等粮油生产基地。
	Ⅸ <sub>3</sub> 黔桂岩溶丘陵山区	低产—水土治理区、低产—水源节灌区、低产—综合防治区分别占 3.90%、7.29% 和 7.41%, 应推进耕地石漠化治理, 提高农业用水利用率, 注重特色农业与城乡协调发展。
	Ⅸ <sub>4</sub> 云南高原区	低产—水源节灌区占 4.43%, 应增加耕地有效灌溉面积, 优化农业种植结构, 综合提升农产品质量和多功能价值, 打造优质化品牌 and 专业化基地。
	Ⅸ <sub>5</sub> 滇南丘陵山区	低产—水源节灌区、低产—综合防治区分别占 9.12% 和 8.86%, 应严禁耕地撂荒, 完善农田水利设施, 积极发展休闲观光农业, 建设反季节特色农业区。
	Ⅸ <sub>6</sub> 长江上游山区	低产—水土治理区、低产—综合防治区分别占 6.08% 和 7.05%, 应与生态保育、水土治理相结合, 发展区域性特色林果产业。
	Ⅸ <sub>7</sub> 甘孜—阿坝高原区	低产—水土治理区、低产—综合防治区分别占 36.44% 和 7.01%, 应与生态保育、耕地综合整治相结合, 积极发展山区农业观光旅游与文化产业。
Ⅹ 青藏高原区	Ⅹ <sub>1</sub> 柴达木盆地	低产—综合防治区、低产—水源节灌区分别占 24.71% 和 4.56%, 应开展土壤盐渍化综合治理, 改善农业用水不足问题, 推进生态化、优质化农牧业发展。
	Ⅹ <sub>2</sub> 三江源及周边地区	低产—水土治理区占 6.03%, 应加强对土壤侵蚀治理, 推进林业、牧业、农业多种经营与可持续发展。
	Ⅹ <sub>3</sub> 藏北高原区	低产—综合防治区、低产—水土治理区分别占 20.92% 和 24.84%, 应开展培肥、灌溉、荒漠化等耕地综合治理, 积极发展青稞、牦牛、藏羊等特色农牧业。
	Ⅹ <sub>4</sub> 藏南—江两河区	低产—水土治理区和低产—综合防治区分别占 10.17% 和 12.76%、应加强水土治理, 提高耕地质量, 推进河谷农业建设。
	Ⅹ <sub>5</sub> 横断山区	低产—水土治理区占 16.31%, 应开展退耕还林还草工程, 减少水土流失, 加快农业多样化种植与生态化建设。

四、结论与讨论

1. 结 论

基于耕地多功能理论,本研究通过 SSPs 多情景对未来耕地数量进行预测,并结合耕地生态系统服务及产出水平总体特征,提出时空耦合下的中国耕地保护分区分区管控策略,主要研究结论如下:

(1)粮食安全方面,基于 SSPs 多情景预测 2020—2035 年中国耕地数量均呈现出下降态势,其中 SSP1 与 SSP3 情景分别是耕地数量预测下限与上限。在相同时间截面下,2020 年中国所需耕地数量范围为 1.180 亿~1.321 亿公顷,已超过 18 亿亩耕地保护红线警戒值,但从耕地数量预测长时间演变序列分析,目前中国耕地规模基本可以实现长期粮食安全。

(2)生态安全方面,中国耕地生态系统服务及产出水平在不同维度上表现出显著区域差异性。总体来看,高值区主要分布在长江中下游干流平原丘陵区,其次为黄淮海区、东北区与江南丘陵山区。受自然本底、人文社会等因素制约,西北干旱区、内蒙古及长城沿线等地区耕地生态系统服务及产出水平较低。

(3)本研究将时间尺度上预测的耕地数量与空间尺度上地块优越性进行叠加,构建了六大类管控区,其中高产—核心管控区,耕地产出水平最高,生态条件最为优越,是耕地保护刚性管控区。其余管控区耕地生态系统及产出水平劣势相对突出,需要因地制宜采取差异化管控策略。

2. 讨 论

第一,考虑到人口因素作为影响粮食安全最直观的表现,本研究主要基于 SSPs 多情景下人口变

化过程对未来耕地数量进行预测,从而使得耕地数量预测值与未来人口规模具有显著关联,但粮食安全情景及其参数设置具有复杂性,涉及国家、地方、农户等多个层面,仅从人口变化因素对耕地数量进行预测具有一定局限性,未来将会纳入更多影响耕地数量变化的因素。

第二,本研究对耕地生态安全评估指标的选取,主要是通过梳理总结当前中国耕地产出过程中存在的典型生态退化问题来确定,以便从宏观层面理解与把握耕地生态安全总体特征,但耕地作为一个复杂巨系统,其生态安全问题不仅涉及耕地利用系统、自然环境系统与经济社会系统等多系统要素,而且还涉及宏观、中观与微观等多尺度要素,而本研究仅侧重于耕地保护分区管控思路设计,在耕地生态安全评估指标要素选取方面,后续会做进一步完善。

## 参 考 文 献

- [1] 高延雷,王志刚.城镇化是否带来了耕地压力的增加?——来自中国的经验证据[J].中国农村经济,2020(9):65-85.
- [2] 朱晓华,张燕,朱媛媛.大食物观视角下中国耕地保护的分区调控与区间协同[J].地理学报,2023,78(9):2147-2162.
- [3] 陈锡文.当前农业农村的若干重要问题[J].中国农村经济,2023(8):2-17.
- [4] 孔祥斌.中国耕地保护生态治理内涵及实现路径[J].中国土地科学,2020,34(12):1-10.
- [5] LIU L Q, WANG X Y, MENG X Z, et al. The coupling and coordination between food production security and agricultural ecological protection in main food-producing areas of China[J]. Ecological indicators, 2023, 154: 110785.
- [6] 崔宁波,董晋.主产区粮食生产安全:地位、挑战与保障路径[J].农业经济问题,2021(7):130-144.
- [7] 余慧容,杜鹏飞.城乡居民膳食结构变迁对耕地资源的影响——基于1981—2019年中国城乡居民食物消费数据[J].中国土地科学,2022,36(8):98-108.
- [8] 青平.构建新型农食系统保障粮食与营养安全[J].华中农业大学学报(社会科学版),2021(6):1-4.
- [9] 范乔希,邵景安,应寿英.山区合适耕地经营规模确定的实证研究——以重庆市为例[J].地理研究,2018,37(9):1724-1735.
- [10] 李欣宇,方斌,李怡,等.中国粮耕价值比与种植结构时空耦合演化及分区调控[J].地理学报,2022,77(11):2721-2737.
- [11] JIANG Z M, WU H, LIN A Q, et al. Optimizing the spatial pattern of land use in a prominent grain-producing area: a sustainable development perspective[J]. Science of the total environment, 2022, 843: 156971.
- [12] SUN X Q, XIANG P C, CONG K X. Research on early warning and control measures for arable land resource security[J]. Land use policy, 2023, 128: 106601.
- [13] 郑媛媛,余敦,孙聪康,等.基于状态空间模型的耕地生态安全评价——以江西省鄱阳县为例[J].水土保持研究,2020,27(3):218-224,237.
- [14] 林永钦,齐维珍,祝琴.基于生态足迹的中国可持续食物消费模式[J].自然资源学报,2019,34(2):338-347.
- [15] 蔡银莺,罗成.江汉平原耕地资源生态安全状况及空间集聚格局[J].华中农业大学学报(社会科学版),2015(5):110-120.
- [16] 蒋家敏,魏梦升.地缘冲突下全球粮食危机的传导效应与中国因应之策[J].华中农业大学学报(社会科学版),2024(4):35-44.
- [17] 刘承,范建刚.习近平大农业观的理论渊源、核心要义与实践指引[J].经济学家,2024(12):15-24.
- [18] 曾晨,周詹杭,柯新利,等.全球气候变化下农业可持续发展的研究现状和学科交叉分析[J].华中农业大学学报,2024,43(6):6-16.
- [19] 樊胜根,田旭,龙文进.大食物观下我国食物供求均衡的挑战与对策[J].华中农业大学学报(社会科学版),2024(2):1-9.
- [20] 仇焕广,雷馨圆,冷淦潇,等.新时期中国粮食安全的理论辨析[J].中国农村经济,2022(7):2-17.
- [21] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜.区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J].地理学报,2002(2):127-134.
- [22] 王艳君,景丞,曹丽格,等.全球升温控制在1.5℃和2.0℃时中国分省人口格局[J].气候变化研究进展,2017,13(4):327-336.
- [23] 辛良杰,李鹏辉.中国居民口粮消费特征变化及安全耕地数量[J].农业工程学报,2017,33(13):1-7.
- [24] 姚成胜,杨一单,殷伟.三大区域粮食安全责任共担的角色定位与推进路径——基于中国省域口粮自给率差异视角[J].经济学家,2023(6):100-109.
- [25] 肖玉,成升魁,谢高地,等.我国主要粮食品种供给与消费平衡分析[J].自然资源学报,2017,32(6):927-936.
- [26] 苑颖,宋金杰,杨春河,等.平衡膳食模式视角下粮食需求预测[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):119-123.
- [27] 张义博.新时期中国粮食安全形势与政策建议[J].宏观经济研究,2020(3):57-66,81.
- [28] 朱嘉伟,周琳琳,谢晓彤.单产提升潜力衰减模型法在河南粮食单产中长期预测中的应用研究[J].自然资源学报,2017,32(9):1627-1638.
- [29] 梁鑫源,金晓斌,孙瑞,等.多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J].地理学报,2022,77(3):697-713.
- [30] 陈浮,曾思燕,马静,等.多情景模拟休耕对中国粮食安全的影响[J].中国土地科学,2023,37(1):90-101.
- [31] 黄强,陈田田,王强,等.喀斯特山区生态系统服务权衡关系分异特征及生态安全格局识别——以贵州省为例[J].地理科学,2024,44(6):1080-1091.
- [32] 田慧霞,覃阳毅,李祖政,等.北京市生态系统服务演变及其对城市化的多尺度响应[J].生态学报,2025,45(5):2209-2224.

- [33] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003(1):35-41.
- [34] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Journal of soil & water conservation, 1983, 38(5): 381-383.
- [35] MCCOOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [36] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999(4):345-350.
- [37] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000(2):19-24.
- [38] 郑伟伟.耕地占补的生态效应及其情景模拟与优化配置[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [39] 戴尔阜,王亚慧.横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.
- [40] 刘美娟,仲俊涛,王蓓,等.基于InVEST模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J].地理科学,2023,43(3):411-422.
- [41] 胡文敏,杨睿瀚,贾冠宇,等.长江流域产水功能对土地利用变化的响应及其驱动因素[J].生态学报,2022,42(17):7011-7027.
- [42] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water resources research, 2001, 37(3): 701-708.
- [43] ZHOU W, LIU G, PAN J, et al. Distribution of available soil water capacity in China[J]. Journal of geographical sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [44] SUN X, LU Z M, LI F, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China[J]. Ecological indicators, 2018, 94: 117-129.
- [45] 马佳妮,张超,吕雅慧,等.基于长时间序列遥感数据反演NPP的耕地质量评价[J].农业机械学报,2019,50(1):202-208.
- [46] 刘彦随,张紫雯,王介勇.中国农业地域分异与现代农业区划方案[J].地理学报,2018,73(2):203-218.

## Research on Zoning-Based Regulation of Farmland Protection in China for the Dual Security of Food and Ecological

JIANG Kun, KE Xinli, WANG Pengfei

**Abstract** Research on arable land protection zoning-based regulation aimed at achieving the “dual security” of food and ecology can provide theoretical insights for the sustainable use of China’s farmland resources. This study forecasts farmland quantity using the shared socioeconomic pathways (SSPs) model according to overall characteristics of farmland ecosystem services and comprehensive evaluation index, and further proposes a spatial-temporal coupled strategy for zoning-based regulation over farmland in China. The results are as follows: 1) From 2020 to 2035, farmland quantity in China shows a decreasing trend. Although in the short term, the required farmland area exceeds the food security warning threshold, in the long run, the current farmland scale can meet the needs of long-term food security; 2) The ecosystem service levels and productivity level of farmland vary significantly across regions. High-value areas are mainly distributed in the middle and lower reaches of the Yangtze River plain-hilly region, the Huang-Huai-Hai region, the Northeast region, and the hilly and mountainous regions of Jiangnan, while other areas show relatively lower values; 3) By overlaying scenarios assumptions at the temporal scale with land parcel advantages at the spatial scale, China’s farmland can be divided into six categories of regulatory zones, each facing distinct ecological degradation problems. Accordingly, it is proposed that differentiated zoning-based regulatory strategies for farmland protection should be implemented around the “dual security” goals of food and ecology, in order to realize the long-term sustainable use of farmland resources.

**Key words** farmland protection; food security; ecological security; zoning-based regulation

(责任编辑:陈万红)