

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.

GE Da-zhuan, LONG Hua-lou, TU Shuang-shuang, et al. Coupling Relationship Between Land Use Transitions and Grain Yield in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 319-327.

黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究

戈大专^{1,2,3}, 龙花楼^{1,2,3*}, 屠爽爽^{1,2,3}, 张英男^{1,2,3}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3.中国科学院精准扶贫评估研究中心, 北京 100101)

摘要:土地利用转型包含显性形态和隐性形态的变化,而土地利用强度是土地利用隐性形态的重要指征,既可以反映出人类对土地的干预程度,又可以呈现出特定时期社会经济发展状态。本文以土地利用强度的定量测度为抓手,基于分县统计数据及遥感解译的土地利用数据计算了区域土地利用隐性形态的变化,探讨了区域土地利用转型与粮食产量的耦合关系。研究表明:(1)1990—2010年,黄淮海地区耕地利用强度不断增加,而村庄建设用地利用强度快速减少,且区域时空格局差异明显;(2)耕地利用强度-村庄建设用地利用强度-粮食产量耦合类型时空演化特征明显,“低-低-低”类型主要分布在环渤海湾地区,而“高-高-高”类型主要集聚于冀鲁豫交界地区;(3)土地利用转型推动粮食生产格局不断演化,二者耦合关系模式将呈现出由“拮抗”到“协调”的转化过程。综上所述,土地利用转型过程中,科学优化土地利用转型与粮食生产的耦合关系,对保障区域粮食安全有重要作用。

关键词:黄淮海地区;土地利用转型;隐性形态;粮食生产转型;耦合关系

中图分类号:F329.9

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)04-0319-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0066

Coupling Relationship Between Land Use Transitions and Grain Yield in Huang-Huai-Hai Plain, China

GE Da-zhuan^{1,2,3}, LONG Hua-lou^{1,2,3*}, TU Shuang-shuang^{1,2,3}, ZHANG Ying-nan^{1,2,3}

(1.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Center for Assessment and Research on Targeted Poverty Alleviation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Land use transition is a mirror of socio-economic development with the changes of both dominant and recessive land use morphologies. Especially, land use intensity is an important attrition of recessive land use morphology, which presents human intervention toward land and regional socio-economic development. Based on the quantitative measure of land use intensity of farmland and rural construction land, this paper described the changes of recessive land use morphology. Furthermore, the coupling relationship between land use transitions and grain yield (*GY*) was established. The results showed: (1) From 1990 to 2010, the pattern of land use intensity showed prominently difference in Huang-Huai-Hai Plain, with farmland intensity (LUI_F) increased while rural construction land intensity (LUI_R) decreased; (2) The spatio-temporal patterns of the coupling types of LUI_F , LUI_R and GY changed obviously, in which the coupling types of "low-low-low" mainly distributed in the Bohai Bay region, and the coupling types of "high-high-high" concentrated in border area of Hebei, Shangdong and Henan provinces; and (3) Land use transitions promoted the evolution of grain production with a coupling relationship from antagonism to coordination between two of them. During the process of land use transitions, in conclusion, it is greatly useful for regional food security by scientific optimizing the coupling relationship between land use transitions and grain yield.

Keywords: Huang-Huai-Hai Plain; land use transitions; recessive morphology; transition of grain production; coupling relationship

收稿日期:2017-01-03

基金项目:国家科技支撑计划课题“平原农区空心村整治的关键技术集成示范”(2014BAL01B05)

作者简介:戈大专(1987—),男,江苏新沂人,博士研究生,主要研究方向为农业地理与土地利用转型。E-mail:gedz.15b@igsrr.ac.cn

*通信作者:龙花楼 E-mail:longhl@igsrr.ac.cn

土地作为人地关系地域系统中的关键要素,深刻影响着社会经济的转型和发展。同时,社会经济的转型发展也带来了土地利用方式的变革,进而导致区域土地利用转型^[1]。土地利用转型指在特定的社会经济变革过程中,区域土地利用由一种形态(含显性形态和隐性形态)转变为另一种形态的过程^[2]。其中土地利用隐性形态主要涉及土地质量、产权、经营方式、投入和产出等多重属性^[3]。

土地利用强度是土地利用隐性形态的重要属性,既可以反映出人类对土地的干预程度,又可以呈现出特定时期内区域社会经济发展状态。土地利用强度的变化是土地利用形态变化的内在动力之一^[4],因此,基于土地利用强度来研究土地利用隐性形态的变化是一种有效的尝试。当前,针对土地利用强度的内涵和外延^[5-6]、定量测度、格局演化^[7]及动力机制^[8]研究较多,而针对区域土地利用强度的变化与粮食生产的关系研究较少。基于以上分析,本文选取我国粮食主产区(黄淮海地区)与粮食生产密切相关的耕地和村庄建设用地^[9]利用强度的变化,表征区域土地利用隐性形态的转型,在土地利用隐性形态定量测度的基础上,划分土地利用隐性形态变化与粮食产量的耦合类型,在实证研究的基础上探讨基于土地利用强度变化的区域土地利用转型与粮食生产的耦合关系,用以指导区域粮食生产系统的优化与调控。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海地区占我国国土面积的 4.3%,2010 年黄淮海地区耕地面积、人口数量和粮食产量占全国的比重分别为 20.6%、22.5%和 30.8%,其中小麦和玉米产量占全国总产量的比重约为 70%和 40%^[10]。依照地形特征和农业生产特点该地区又可以划分 4 个亚区,分别为燕山太行山山麓平原区(以下简称山麓平原区)、冀鲁豫低洼平原区(以下简称低洼平原区)、黄淮平原区和山东丘陵区^[11](图 1)。黄淮海地区作为我国耕地面积广、人口密度大和粮食产量高的“三高”地区特征日渐明显^[12]。同时,该地区又是我国城乡快速转型发展地区,耕地、村庄建设用地等与粮食生产和农民生活密切相关的土地利用形态快速转型。

1.2 数据来源

本文研究过程中使用的分县统计数据来源于《中国县(市)社会经济统计年鉴》及各地(市)年鉴,统计数据主要包括化肥使用折纯量、有效灌溉面积、农作物播种面积、农业机械总动力、乡村人口数量、乡村从业人员数量、农业劳动力数量等指标,部分评价指标市辖区没有统计数据将使用地级市平均数补充。土地利用数据来源于国土资源部,该数据采用第二次全国土地利用调查分类体系,数据根据 Landsat TM 和

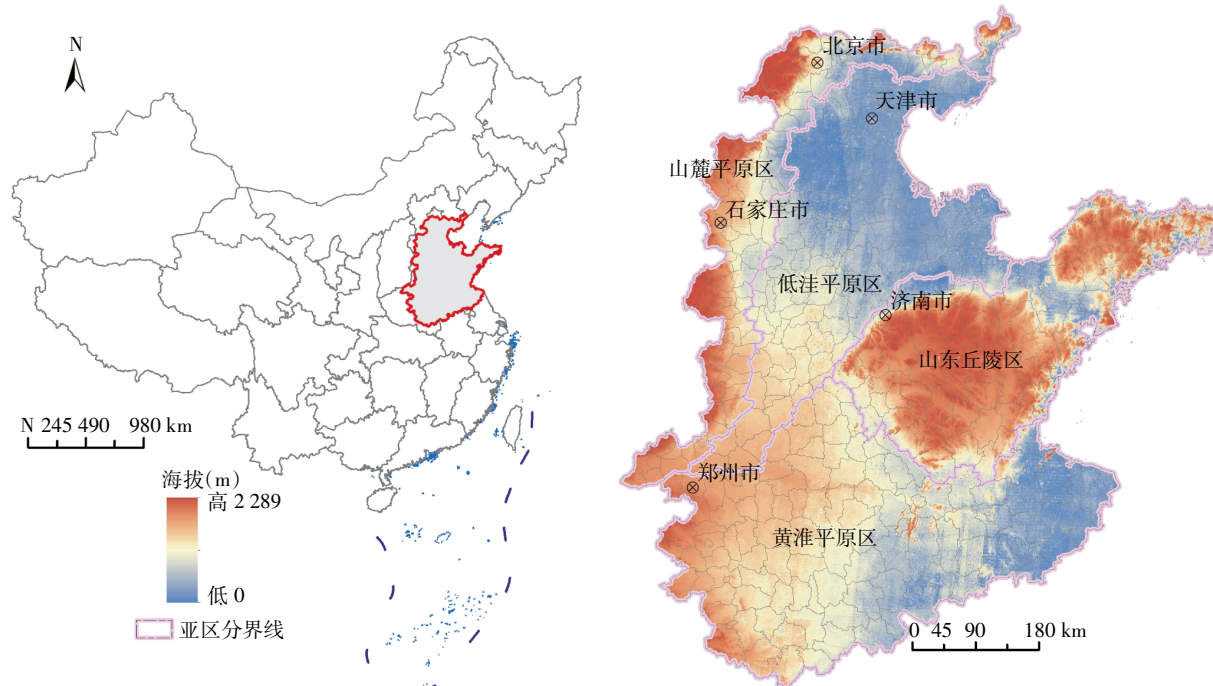


图 1 黄淮海地区概况

Figure 1 Region profile of Huang-Huai-Hai Plain

ETM 传感器经几何校正后合成的真彩色影像监督分类获得。经过市辖区合并处理后,本文研究的黄淮海地区共有 358 个县级行政单元。

1.3 土地利用隐性形态的测度

1.3.1 指标选取

本文以土地利用强度的变化表征区域土地利用隐性形态的转型。研究表明,耕地与村庄建设用地的变化是乡村地区土地利用转型的主体^[9],因而,本文构建了耕地利用强度和村庄建设用地利用强度,用以定量刻画黄淮海地区与粮食生产密切相关的土地利用隐性形态转型。耕地利用强度(LUI_F)评价指标体系的选择以粮食生产相关的“投入”指标作为评价依据。黄淮海地区粮食生产系统中地均化肥投入(P_{fer})^[10-14]、灌溉系统(P_{irri})^[13]、复种指数 C_{eqi} 和地均农业机械(P_{am})的使用作为评价耕地利用强度的指标。而影响粮食生产的其他要素如自然环境和资本等要素,未纳入测度指标。村庄建设用地指乡村地区与农民生产和生活相关的建设用地。城镇化进程中,农业劳动力非农就业比例不断上升,村庄建设用地利用格局不断演化,村庄建设用地在粮食生产中的功能也发生了较大变化。村庄建设用地利用强度(LUI_R)的评价指标亦考虑到与粮食生产密切相关的指标,本文以乡村人口密度(R_{popd})、农业劳动力比重(P_{arl})、村庄建设用地比例(P_{re})和乡村人均建设用地(P_{cel})作为评价指标。评价指标中除乡村人均建设用地面积对土地利用强度的作用为负效应外,其他指标的作用均为正效应。评价指标权重的确定参考了已有的研究成果^[15],在咨询国内相关领域专家意见的基础上,利用熵值法^[16]确定,即考虑了数据样本客观性的同时兼顾专家判定,各评价指标的权重如表 1。

1.3.2 土地利用隐性形态测度方法

为了消除评价指标体系源数据量纲对评价的影

响,对源数据利用极值法进行归一化处理:功效为正的指标使用公式(1),功效为负的指标使用公式(2):

$$T_n^k = \frac{X_n^k - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{1}$$

$$T_n^k = \frac{X_{max} - X_n^k}{X_{max} - X_{min}} \tag{2}$$

式中: T_n^k 为第 n 个样本的 k 指标归一化后的数值, X_n^k 为第 n 个样本 k 指标的原始数据, X_{max} 和 X_{min} 分别代表第 k 个指标的最大值和最小值。

在数据标准化的基础上利用指标权重与归一化之后的数据相乘求和的方法定量评价土地利用隐性形态转型,耕地利用强度的计算利用公式(3),村庄建设用地利用强度计算利用公式(4):

$$LUI_{F_i} = \sum m_j \times T_{ij} \tag{3}$$

$$LUI_{R_i} = \sum n_p \times T_{ip} \tag{4}$$

式中: m_j 和 n_p 分别为二者各评价指标的权重, T_{ij} 和 T_{ip} 为 i 县第 j 和第 p 个指标归一化后的数值。

1.4 耕地利用强度-村庄建设用地利用强度-粮食产量耦合分类

利用耕地利用强度和村庄建设用地利用强度,结合县域粮食产量,基于 ArcGIS10.2 中自然间断点(Jenks)分类方法,分别把 3 个序列数据由低到高分“低”(1)、“中”(2)和“高”(3)3 组,利用 3×3 矩阵交叉方法,构建“低-低-低”(111)……“高-高-高”(333)共 27 类耕地利用强度-村庄建设用地利用强度-粮食产量耦合(FRGC)类型(图 2)。在研究过程中利用信息图谱^[17]的方式,实现在复杂耦合类型模式下的格局演化研究。

2 结果与讨论

2.1 土地利用转型与粮食产量变化的时空格局

研究结果表明,耕地利用强度持续增加,村庄建

表 1 土地利用隐性形态评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of land use recessive morphology

土地利用隐性形态	评价指标	权重	计算方式	功效性
耕地利用强度	地均化肥使用量(P_{fer})/t·hm ⁻²	0.251 3	化肥使用折纯量/耕地面积	+
	有效灌溉比例(P_{irri})/%	0.249 8	有效灌溉面积/耕地面积	+
	复种指数(C_{eqi})/%	0.251 4	农作物播种面积/耕地面积	+
	地均农业机械使用(P_{am})/W·hm ⁻²	0.247 4	农业机械总动力/耕地面积	+
村庄建设用地利用强度	乡村人口密度(R_{popd})/万人·km ⁻²	0.249 6	乡村人口/乡村建设用地面积	+
	农业劳动力比重(P_{arl})/%	0.250 8	农业劳动力/乡村从业人员数	+
	村庄建设用地比例(P_{re})/%	0.249 6	村庄建设用地面积/建设用地总面积	+
	乡村人均建设用地(P_{cel})/m ²	0.249 8	乡村建设用地面积/乡村人口	-

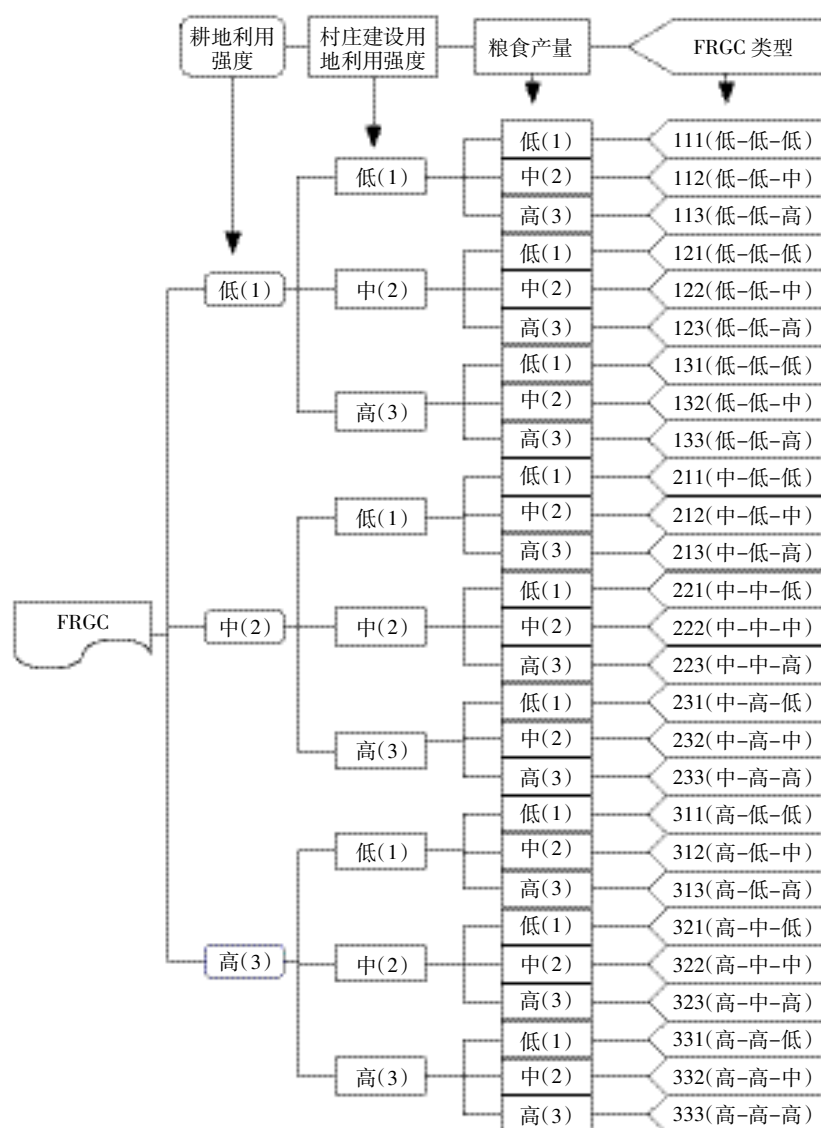


图 2 耕地利用强度-村庄建设用地利用强度-粮食产量耦合(FRGC)分类体系

Figure 2 Coupling classification system of farmland intensity-rural construction land intensity-grain yield(FRGC)

设用地利用强度加速下降, 粮食产量波动上升。1990—2010 年 LUI_F (图 3a~图 3c) 均值由 0.29 上升到 0.4, 山麓平原区耕地利用强度一直较高; 黄淮平原区和低洼平原区增长较快, 成为耕地高投入区; 山东丘陵区耕地利用强度较低。期间, LUI_R 均值由 0.52 下降到 0.45, 并呈现加速减少的趋势 (图 3d~图 3f), 1990—2000 年村庄建设用地利用强度呈现下降趋势, 山东丘陵区保持较高水平, 黄淮平原西部地区 LUI_R 大部在增加, 而低洼平原区和苏北地区及山麓平原区村庄建设用地利用强度处于下降趋势。1990—2010 年黄淮海平原地区粮食产量由 1.06 亿 t 上升到 1.65 亿 t, 1990 年、2000 年和 2010 年粮食产量占全国总产量的比重分别为 24.4%、24% 和 30.1%, 在经历了

2000 年附近短暂的下降后, 黄淮海地区粮食生产在全国的地位不断加强。黄淮平原区和低洼平原区是粮食增产的主要地区 (图 3g~图 3i), 而山麓平原区和山东丘陵区粮食产量在下降。

2.2 土地利用转型与粮食产量耦合类型的时空格局

1990—2010 年耕地利用强度-村庄建设用地利用强度-粮食产量耦合类型特征呈现稳中有变的时空格局。1990—2010 年 LUI_F 较低 (111~133) 的区域主要集中于山东丘陵区、低洼平原东部和黄淮平原南部地区 (图 4a~图 4c), LUI_R 和粮食产量较低的区域主要集中在环渤海湾地区; 山东丘陵区 and 山麓平原部分地区 LUI_R 和粮食产量较高。耦合类型中 LUI_F 居中 (211~233) 的区域主要分布在低洼平原北部和山东丘

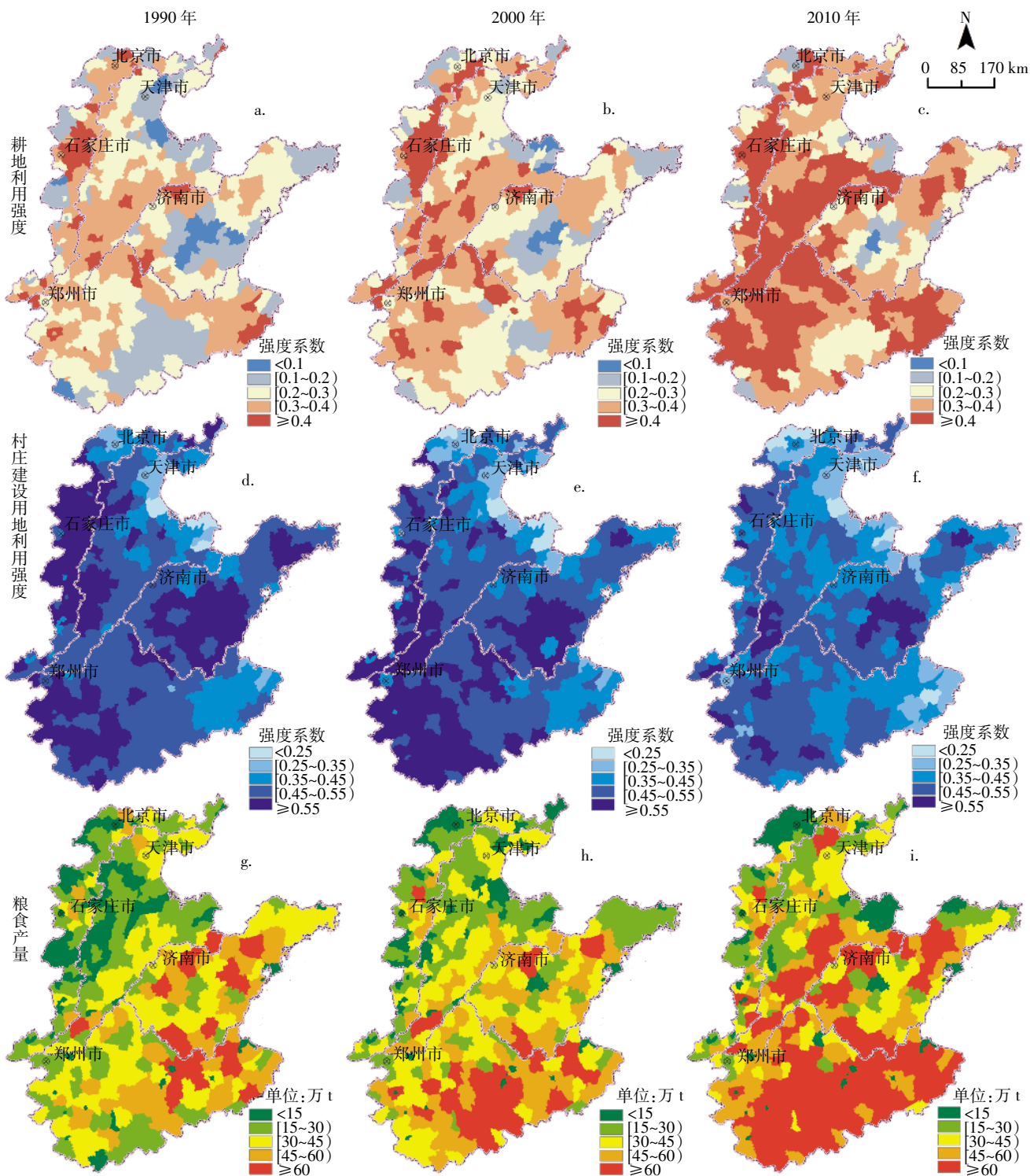


图3 1990—2010年 LUI_F 、 LUI_R 和粮食产量时空格局演化

Figure 3 Spatio-temporal pattern of LUI_F , LUI_R and grain yield during 1990—2010

陵东部地区,并在黄淮平原地区离散分布(图 4d~图 4f);这些县域中 LUI_R 和粮食产量较低的区域主要集中在低洼平原北部地区,而 LUI_R 和粮食产量较高的地区主要集中在黄淮平原区。黄淮海地区 LUI_F 较高(311~333)的地区主要集中在山麓平原大部、低洼平

原南部及苏北和豫北地区,并逐渐在冀鲁豫交界地区形成明显的集聚区(图 4g~图 4i),而山麓平原北部地区逐渐退出该耦合类型;FRGC 类型中 LUI_F 、 LUI_R 和粮食产量均较高的地区逐渐向冀鲁豫交界地区集中,而苏北地区和山麓平原地区此类县域逐渐减少,

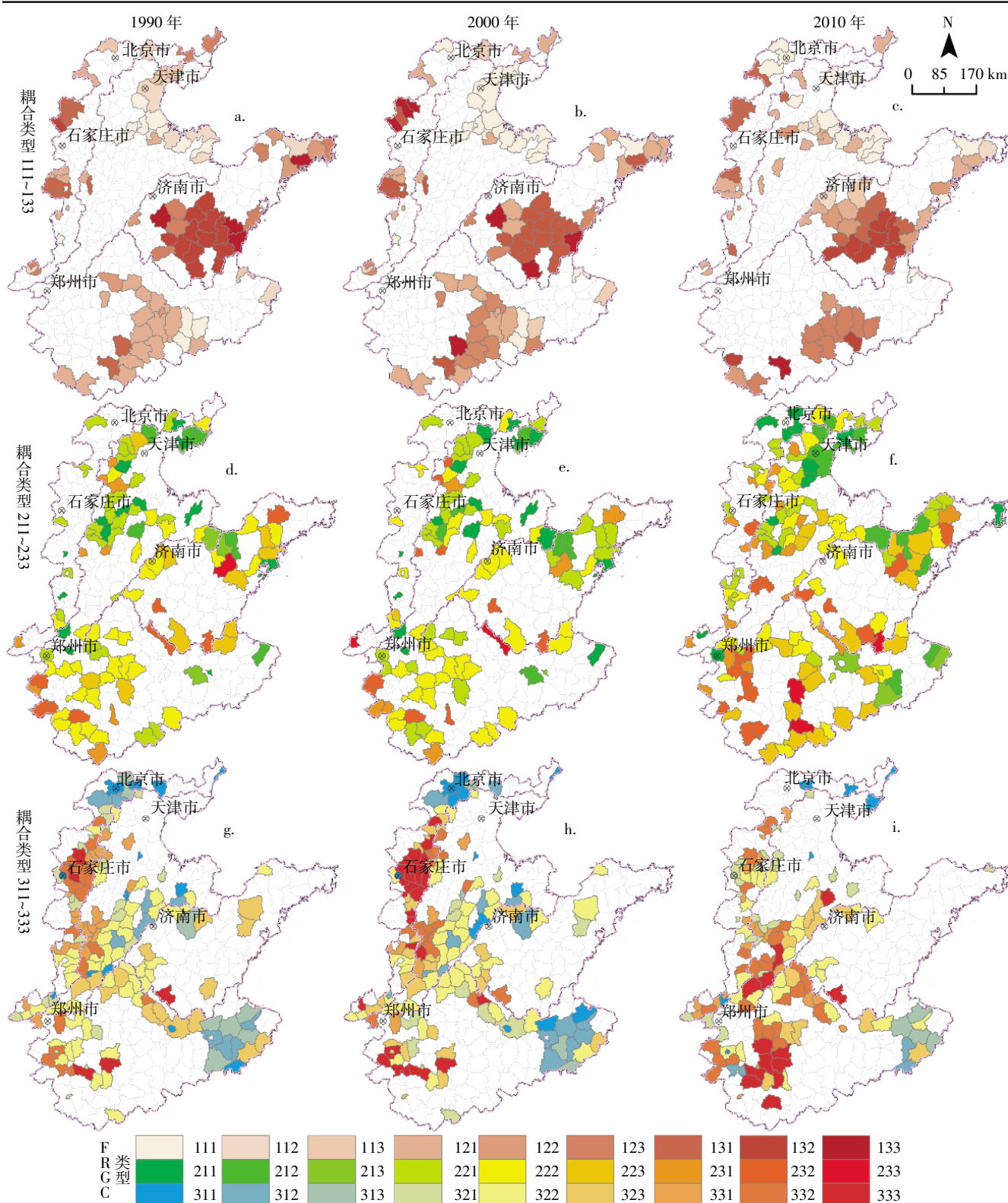


图 4 1990—2010 年耕地利用强度-村庄建设用土地利用强度-粮食产量耦合 (FRGC) 时空演化过程

Figure 4 Spatio-temporal evolution process of LUI_F , LUI_R and GY (FRGC) during 1990–2010

石家庄市附近地区耦合类型逐渐由“333”类型为主演化为“322”类型为主。

2.3 土地利用转型与粮食生产的耦合关系

土地利用转型背景下,不同地类土地利用强度相

互影响,共同推动区域粮食生产格局的转型。转型初期,耕地和村庄建设用地利用强度均增加,推动粮食生产能力提升。城镇化背景下,农业剩余劳动力析出,农业劳动力数量相应减少,就业结构和收入结构不断改善,农户农业生产的资本性投入能力增强,耕地利用强度提高^[18]。农民改善居住条件的需求增加,农村宅基地开始向外扩张,村庄建设用地的比例增加,这一阶段,农业生产收入比例仍占主要地位,农民的兼业情况主要呈现为季节性和短距离外出务工或本地非农就业为主。乡村人口总体增长状态下,农业劳动力比重下降不明显,村庄建设用地利用强度增加。这一阶段耕地利用强度与村庄建设用地利用强度普遍上升,粮食生产能力得到提升,粮食安全格局稳定(图 5a)。

转型中期,耕地利用强度继续增加和村庄建设用地利用强度开始下降,区域粮食安全保障能力下降。农业劳动力转移过程中,由于人口增加和经济因素导致的村庄建设用地面积呈现快速的外延扩张,人均建设用地面积迅速提高(图 5b)。同时,由于大量人口外流,村庄宅基地出现废弃和空置现象,农村“空心化”^[19]问题突出。此外,部分农业劳动力实现资本原始积累,彻底脱离农业生产,农村宅基地需求下降。农业劳动力的兼业化比例提高,农业劳动力数量快速下

降,农业劳动力比重下降,乡村人口密度也随之下降。城镇化快速推进过程中,城镇建设用地和工矿用地需求增加,占用耕地和征用村庄用地的比例提高,村庄建设用地在建设用地的比例不断下降。以上多种因素共同推动了村庄建设用地利用强度的下降。随着农户收入结构的改善,农户继续追加耕地投入的能力迅速提升,但是纯农户的比例不断减少^[20],并且农户的年龄结构趋于“老弱化”,大规模增加资本性投入需求下降,耕地投入主要以省工性投入为主,地均化肥使用量不断增加。农户耕地流转的趋势开始出现,且比例不断提升。而耕作条件较好的平原农区随着农业机械化的大力推广,粮食播种面积不降反升(如研究时段内的黄淮平原区),灌溉比例也相应提升,而丘陵及耕地质量不高地区的耕地利用形态会出现弃耕或撂荒^[21]的现象,耕地利用强度区域格局差异明显。这一阶段耕地利用强度仍保持较高水平,粮食产量较稳定。但同时也应该看到粮食生产要素投入产出的效率不断下降,粮食生产成本不断增加,粮食生产所带来的资源环境问题不断凸显^[22]。耕地资源被建设占用的比例迅速提高(图 6),村庄建设用地利用强度不断下降,粮食生产的保障能力降低。

转型后期,耕地和村庄建设用地利用强度均下降,粮食生产高效化和集约化保障区域粮食安全。城

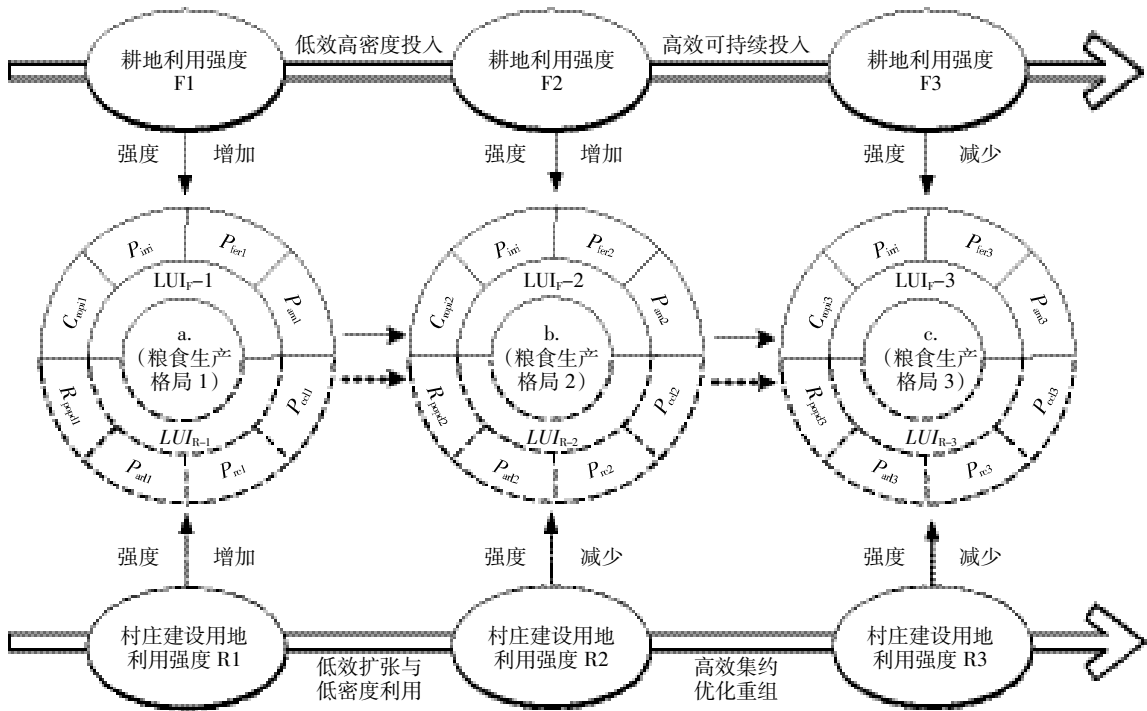


图 5 土地利用转型与粮食生产耦合关系

Figure 5 Coupling relationship modes between land use transitions and grain production

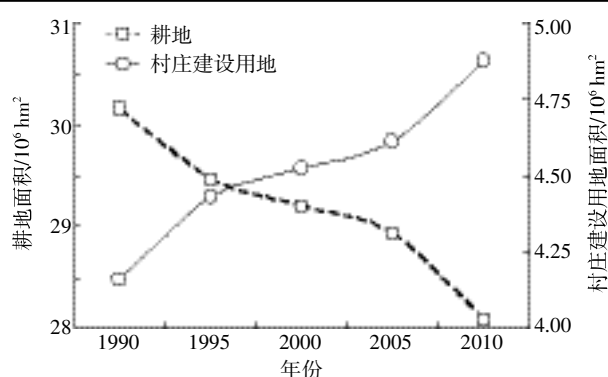


图6 1990—2010年黄淮海地区耕地面积与村庄建设用地面积变化

Figure 6 Area changes of farmland and rural construction land in Huang-Huai-Hai Plain during 1990—2010

镇化发展中后期,农业劳动力比重低,村庄建设用地整治需求旺盛,农村聚落社区化,人口居住集中化开始大力推进,村庄建设用地的比例迅速下降,村庄建设用地将实现优化重组^[23]。乡村人口密度不断降低,农业劳动力数量和比重不断下降,村庄建设用地利用强度下降。耕地利用方面由于乡村人口逐渐减少,土地流转的比例不断增加,粮食生产的规模化和集约化不断加强,可持续的农业生产系统^[24]不断优化,耕地利用强度逐步下降,并趋于稳定。农村剩余劳动力转移基本完成,新型农业经营主体成为粮食生产的主力,粮食生产格局进入新的状态(图5c)。

城镇化进程中,我国土地利用形态与粮食生产均发生了深刻的变化,系统研究二者耦合关系、动力机制及其演化规律,对于揭示我国粮食生产系统要素转型、结构变革和功能演化,保障我国粮食安全的同时,促进乡村良性发展,优化乡村土地利用结构,实现社会良性转型具有至关重要的作用^[25]。因此,粮食生产转型过程中,应合理优化土地利用转型与粮食生产的耦合关系,加强耕地的保护力度,限制村庄建设用地的无序扩张,合理搭配乡村农业生产体系中的人口及其他生产要素,确保农户生产与生活水平稳定提升。

3 结论

(1)城镇化进程中,黄淮海地区土地利用形态和粮食生产格局迅速转型。1990—2010年土地利用转型格局呈现出耕地利用强度不断增加,村庄建设用地利用强度加速减少,且时空格局区域差异明显。区域粮食生产能力经历短暂的下降后持续增强。

(2)1990—2010年耕地利用强度-村庄建设用地

利用强度-粮食产量耦合类型时空格局特征明显。“低-低-低”(111)类型主要分布在环渤海湾地区,“高-高-高”(333)类型主要集聚于冀鲁豫交界地区。而“中-中-中”类型主要分布在山东半岛东部和低洼平原北部地区且不断集中。

(3)土地利用转型推动粮食生产格局不断演化。转型初期,耕地和村庄建设用地利用强度均增加,推动粮食生产能力提升。转型中期,耕地利用强度继续增加和村庄建设用地利用强度开始下降,区域粮食安全保障能力下降。转型后期,耕地和村庄建设用地利用强度均下降,粮食生产高效化和集约化保障区域粮食安全。依据土地利用转型与粮食生产不同阶段的耦合关系,制定合理的粮食生产政策能够有效保障区域粮食生产安全。

(4)本文基于土地利用强度变化初步探讨了土地利用转型与粮食生产的耦合关系,是土地利用转型对粮食生产系统影响的初步研究。而对土地利用隐性形态中涉及质量、产权和经营方式等土地利用形态尚缺乏深入的研究。本文初步构建了土地利用转型与粮食生产耦合关系模式,但对二者耦合过程的动力机制研究仍薄弱,这些内容是进一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Long Hualou. Land use policy in China: Introduction[J]. *Land Use Policy*, 2014, 40: 1-5.
- [2] 龙花楼. 论土地利用转型与乡村转型发展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(2): 131-138.
LONG Hua-lou. Land use transition and rural transformation development[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(2): 131-138. (in Chinese)
- [3] Liu Y, Long H, Li T, et al. Land use transitions and their effects on water environment in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Land Use Policy*, 2015, 47: 293-301.
- [4] Liu Y, Long H. Land use transitions and their dynamic mechanism: The case of the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(5): 515-530.
- [5] 丁忠义, 郝晋珉, 李涛, 等. 区域土地利用强度内涵及其应用——以河北省曲周县为例[J]. *中国土地科学*, 2005, 19(5): 19-24.
DING Zhong-yi, HAO Jin-min, LI Tao, et al. Connotation and its application of regional land use intensity: A case study of Quzhou county in Hebei province[J]. *China Land Science*, 2005, 19(5): 19-24. (in Chinese)
- [6] Erb K H, Haberl H, Jepsen M R, et al. A conceptual framework for analysing and measuring land-use intensity[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 464-470.
- [7] 刘芳, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 21世纪初中国土地利用强度的空间分布格局[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1130-1143.
LIU Fang, YAN Hui-min, LIU Ji-yuan, et al. Spatial pattern of land use

- intensity in China in 2000 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71 (7):1130–1143. (in Chinese)
- [8] Chen Y, Li X, Tian Y, et al. Structural change of agricultural land use intensity and its regional disparity in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(5):545–556.
- [9] 龙花楼,李婷婷. 中国耕地和农村宅基地利用转型耦合分析[J]. 地理学报, 2012, 67(2):201–210.
LONG Hua-lou, LI Ting-ting. Analysis of the coupling of farmland and rural housing land transition in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(2):201–210. (in Chinese)
- [10] Kong X, Lal R, Li B, et al. Fertilizer intensification and its impacts in China's HHH Plains[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 125:135–169.
- [11] 周立三. 中国农业区划的理论与实践[M]. 北京:中国科学技术大学出版社, 1993.
ZHOU Li-san. The theory and practice of China agricultural regionalization [M]. Beijing:China Science and Technology University Press, 1993. (in Chinese)
- [12] 李裕瑞,刘彦随,龙花楼. 黄淮海典型地区村域转型发展的特征与机理[J]. 地理学报, 2012, 67(6):771–782.
LI Yu-rui, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou. Characteristics and mechanism of village transformation development in typical regions of Huang-Huai-Hai plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(6):771–782. (in Chinese)
- [13] Kong X, Zhang X, Lal R, et al. Groundwater depletion by agricultural intensification in China's HHH plains, since 1980s[J]. *Advances in Agronomy*, 2016, 135:59–106.
- [14] Ju X, Gu B, Wu Y, et al. Reducing China's fertilizer use by increasing farm size[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 41:26–32.
- [15] 杨忍,刘彦随,郭丽英,等. 环渤海地区农村空心化程度与耕地利用集约度的时空变化及其耦合关系[J]. 地理科学进展, 2013, 32(2):181–190.
YANG R, LIU Y S, GUO L Y, et al. Spatial-temporal characteristics for rural hollowing and cultivated land use intensive degree:Taking the Circum-Bohai Sea region in China as an example[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(2):181–190. (in Chinese)
- [16] 乔家君. 改进的熵值法在河南省可持续发展能力评估中的应用[J]. 资源科学, 2004, 26(1):113–119.
QIAO Jia-jun. Application of improved entropy method in Henan sustainable development evaluation[J]. *Resources Science*, 2004, 26(1):113–119. (in Chinese)
- [17] 李亚婷,潘少奇,苗长虹. 中国县域人均粮食占有量的时空格局——基于户籍人口和常住人口的对比分析[J]. 地理学报, 2015, 69(12):1753–1766.
LI Ya-ting, PAN Shao-qi, MIAO Chang-hong. The spatial-temporal patterns of per capita share of grain at the county level in China:A comparison between registered population and resident population [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 69 (12):1753–1766. (in Chinese)
- [18] Rozelle S, Guo L, Shen M, et al. Leaving China's farms:Survey results of new paths and remaining hurdles to rural migration[J]. *The China Quarterly*, 1999, 158:367–393.
- [19] 龙花楼,李裕瑞,刘彦随. 中国空心化村庄演化特征及其动力机制[J]. 地理学报, 2009, 64(10):1203–1213.
LONG Hua-lou, LI Yu-rui, LIU Yan-sui. Analysis of evolutive characteristics and their driving mechanism of hollowing villages in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(10):1203–1213. (in Chinese)
- [20] Wang X, Huang J, Rozelle S. Off-farm employment and agricultural specialization in China[J]. *China Economic Review*, 2017, 42:155–165.
- [21] 王学,李秀彬,辛良杰,等. 华北地下水超采区冬小麦退耕的生态补偿问题探讨[J]. 地理学报, 2016, 71(5):829–839.
WANG Xue, LI Xiu-bin, XIN Liang-jie, et al. Ecological compensation for winter wheat abandonment in groundwater over-exploited areas in the North China Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5):829–839. (in Chinese)
- [22] Norse D, Ju X. Environmental costs of China's food security[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209:5–14.
- [23] Yang R, Xu Q, Long H. Spatial distribution characteristics and optimized reconstruction analysis of China's rural settlements during the process of rapid urbanization[J]. *Journal of Rural Studies*, 2016, 47:413–424.
- [24] Kühling I, Broll G, Trautz D. Spatio-temporal analysis of agricultural land-use intensity across the Western Siberian grain belt[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544:271–280.
- [25] He J, Liu Y, Yu Y, et al. A counterfactual scenario simulation approach for assessing the impact of farmland preservation policies on urban sprawl and food security in a major grain-producing area of China[J]. *Applied Geography*, 2013, 37:127–138.