



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子

崔潇, 王永生, 施琳娜

引用本文:

崔潇, 王永生, 施琳娜. 北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 206–217.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0834>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

县域乡村“三生”系统发展时空分异与优化决策

李进涛, 刘琳, 王乙杰, 冷安丽

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 523–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0222>

老少边山穷地区城镇化与国土空间生态修复耦合协调机制研究

张中秋, 劳燕玲, 胡宝清, 韦金洪

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 882–893 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0144>

平原农区适宜性-集约性耦合协调的乡村空间重构

刘健, 郭璨, 刘亚秋, 侯雅娴, 王瑗玲

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 394–405 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0388>

土地利用多功能机制及其耦合协调时空分异——以广西为例

张中秋, 劳燕玲, 何彩珍, 韦金洪, 胡宝清

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 317–331 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0290>

基于力学平衡模型的耕地多功能演变及其协调性分析——以珠江三角洲为例

余富祥, 胡月明, 刘振杰, 李波, 王璐

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 728–737 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0302>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

崔潇, 王永生, 施琳娜. 北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 206–217.
CUI X, WANG Y S, SHI L N. Spatio-temporal characteristics and obstacle factors of human-land system coupling coordination in farming-pastoral ecotone of northern China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 206–217.



开放科学 OSID

北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子

崔潇^{1,2}, 王永生^{1,2*}, 施琳娜^{1,2}

(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)

摘要: 人地系统协调是实现可持续发展的重要前提, 探究北方农牧交错带人地系统耦合协调特征及障碍因素, 对适时推进乡村振兴、实现农牧区高质量发展具有重要意义。本研究基于人地系统类型结构, 从农牧业、村庄、乡域、城镇4个层面构建指标体系, 运用耦合协调度模型和障碍度模型, 分析人地系统发展水平、耦合协调程度及人地系统协调的障碍因素。结果表明: 2000—2020年, 北方农牧交错带人地系统发展水平呈现上升性和空间非均衡性, 农牧业、村庄子系统发展相对滞后, 乡域子系统发展水平增幅明显; 人地系统耦合度基本处于高水平耦合阶段, 协调度稳步提高, 整体由轻度失调衰退向勉强协调发展转变, 空间上呈现由西北向东南递减的格局; 阻碍人地系统协调水平提升的主要因素为乡村人均草地面积、人均GDP、乡村人均肉产量, 且障碍程度不断增强; 子系统障碍度顺序为农牧业>村庄>城镇>乡域, 农牧业、村庄子系统障碍作用突出, 乡域子系统障碍作用明显减弱。综上, 北方农牧交错带人地系统耦合协调水平稳步提升, 但仍面临农牧结构平衡、生态环境保护、三产融合发展等诸多挑战。

关键词: 人地系统; 耦合协调; 障碍度; 乡村振兴; 北方农牧交错带

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)01-0206-12

doi: 10.13254/j.jare.2021.0834

Spatio-temporal characteristics and obstacle factors of human-land system coupling coordination in farming-pastoral ecotone of northern China

CUI Xiao^{1,2}, WANG Yongsheng^{1,2*}, SHI Linna^{1,2}

(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)

Abstract: Human-land system coordination is an important prerequisite for achieving sustainable development. Exploring the coupling coordination characteristics and obstacle factors of human-land systems in the farming-pastoral ecotone of northern China plays a significant role in timely promotion of rural revitalization and realizing high-quality development in farming and pastoral areas. Based on the model of human-earth system type structure, a comprehensive evaluation index system of human-land system was constructed from the aspects of agriculture and animal husbandry, village, rural area, and township. The development level, coupling coordination degree, and obstacle factors of the human-land system were analyzed using the coupling coordination degree model and the obstacle degree model. The following results were obtained that the development level of the human-land system in the farming-pastoral ecotone of northern China showed an upward trend and spatial imbalance from 2000 to 2020. The development levels of the agriculture and animal husbandry and the village subsystems were relatively backward, and the development level of the rural area subsystem has significantly increased. The mean coupling degree of the human-land system was in the high-level coupling stage. The degree of coordination has steadily improved, and the

收稿日期: 2021-11-30 录用日期: 2022-03-30

作者简介: 崔潇(1999—), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 从事乡村资源利用及其环境效应研究。E-mail: CuiX0927@163.com

*通信作者: 王永生 E-mail: wangys@igsnrr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41931293)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(41931293)

<http://www.aed.org.cn>

overall change has been from mild dissonance to barely coordinated development. The space presented a spatial pattern of decreasing from the northwest to the southeast. The main obstacles to the improvement of the coordination level of the human-land system were rural per capita grassland area, per capita GDP, and rural per capita meat production, and the degree of obstacles continued to increase. The order of subsystem obstacle degrees was agriculture and animal husbandry > village > township > rural area. The obstacle degrees of the agriculture and animal husbandry and the village subsystems were prominent, and the obstacle degree of the rural area subsystem was weakened. The coupling coordination level of the human-land system in the farming-pastoral ecotone of northern China has steadily improved, but it still faces many challenges such as the balance of the agricultural and pastoral structure, ecological environment protection, and the integrated development of the tertiary industry.

Keywords: human-land system; coupling coordination; obstacle degree; rural revitalization; farming-pastoral ecotone of northern China

人地关系及其变化研究是地理学研究的核心内容^[1],自20世纪90年代人地关系地域系统理论提出以来^[2],人地关系相关理论研究及实践应用不断丰富与深化。进入21世纪,现代人类活动愈加强烈,深刻影响着地球表层人地系统,地球已进入“人类世”阶段^[3],产生了全球变化、土地退化、环境污染、区域贫困^[4-8]等一系列资源环境问题。随着工业化、城镇化和全球化快速推进,我国乡村产业模式、地域结构、空间格局等发生了显著变化^[9],乡村人地关系问题与矛盾日益凸显。在城市化进程加快、全球环境变化、社会经济不断发展的背景下,人地和谐共生成为现代人地关系的核心内涵^[10],逐步发展形成了现代人地系统理论,并与可持续性的研究相结合^[11],探索发展面向全球变化及国家重大战略的现代人地系统科学^[12]。人地系统协调是实现可持续发展的重要前提,人地协调理论及其实践应用研究,对有效缓解人地矛盾,促进区域协调、可持续发展具有重要意义^[13]。

典型区域人地系统与可持续发展的时空规律研究是人地关系研究的重要范式^[14]。北方农牧交错带是农牧结合的特色区域,是重要的水源涵养带和生态安全屏障,特色资源丰富,发展潜力巨大。但北方农牧交错带也是生态脆弱区、人地矛盾区,面临着水资源短缺、土地退化、草场退化等生态环境问题^[15-16],以及稳定粮食安全、巩固拓展脱贫成果与乡村振兴有效衔接等经济社会发展问题^[17-18]。同时,北方农牧交错带也是国家退耕还林还草、“三北”防护林、京津风沙源治理等生态工程,以及西部大开发、精准扶贫、乡村振兴等战略的重点实施区域,生态治理与经济发展取得了显著成效。目前,对于北方农牧交错带区域范围划定^[19]、荒漠化防治、农业措施管理、生态系统修复、土地利用等^[20-23]生态环境问题的研究较多,但北方农牧交错带人地关系变化剧烈、人地矛盾突出、人地系统三产发展问题凸显^[24],基于人地系统视角的研究相

对较少。

新时代城乡发展转型、生态文明建设、国土空间治理背景下,人地系统研究重在推进城乡融合、促进乡村人地系统协调和可持续发展。北方农牧交错带是战略政策的重点实施区域,以人地关系地域系统理论为基石^[14],着眼于城乡一体化系统,人地系统可细分为农牧业、村庄、乡域、城镇等4个子系统。各子系统于不同递进层级以人地交互作用方式形成,分别构成农牧业生产与土地关系、人与村庄用地关系、农牧民居住与就业关系、产业化与城镇化关系^[25],进而相互作用、相互依存形成人地系统类型结构(HESTS)^[12]。子系统的耦合协调发展是农牧区人地系统可持续发展的基础,有利于促进农牧区城乡融合体系的构建。北方农牧交错带人地系统时空格局、演化过程、耦合协调与可持续发展研究,对协调人地矛盾、促进乡村振兴与城乡融合发展具有重要的理论指导和实践意义。因此,本研究以北方农牧交错带的县域为基本单元,基于人地系统类型结构构建人地系统综合评价指标体系,开展退耕还林还草工程、西部大开发等国家战略措施实施以来(2000—2020年)农牧业、村庄、乡域和城镇等子系统的发展水平测度及时空演变特征分析,进一步研究人地系统耦合协调度及地域分布规律,并探明人地系统协调发展的障碍因素,揭示区域不同类型人地系统的时空演化格局、耦合协调特征及障碍因子,为科学认知和有效协调区域人地关系、促进农牧业可持续发展、提升地域功能、推进区域乡村振兴及城乡融合发展提供政策建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

依据2016年农业部《关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》,本研究中的北方农牧交错带共涉及7省(区)、23市、146个县(市、区),总面积约

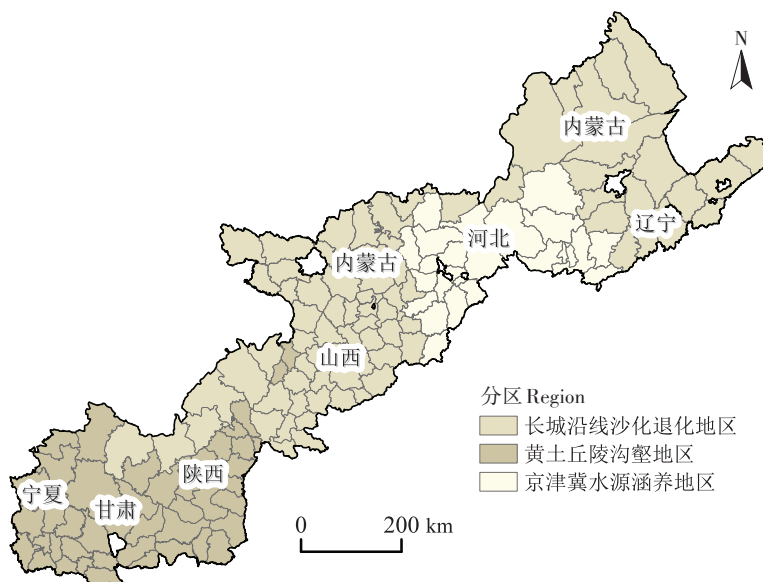


图1 研究区位置

Figure 1 Location of the study area

46.17万 km²(图1)。该区域年均气温2~8℃,年降水量300~450 mm,高原与丘陵交错分布,部分地区为沙地、山地和平原。由于多年的过度开垦、超载放牧,该区域动植物种类和数量不断减少,生态环境退化,甚至出现严重的荒漠化问题。北方农牧交错带区域差异明显,长城沿线沙化退化地区涉及77个县级行政区划单元,干旱少雨,优质饲草料种植面积不足,草原退化、耕地沙化问题突出;黄土丘陵沟壑地区涉及44个县级行政区划单元,大部分为黄土高原,水土流失严重、植被覆盖率低,干旱频发;京津冀水源涵养地区涉及25个县级行政区划单元,是京津冀地区重要的饮用水源涵养地,年降水量由东南向西北递减。

1.2 指标体系

基于人地关系地域系统理论,在推进城乡融合、促进乡村人地系统协调和可持续发展的背景下,人地系统的农业、村庄、乡域、城镇类型划分^[12]应充分考虑不同层级普遍意义的人地关系,子系统层级递进、相互促进,其耦合协调能够推进区域人地系统可持续发展及城乡融合体系构建。本研究在此划分基础上,充分借鉴乡村地域系统相关研究^[26-27],并结合北方农牧交错带区域人地系统要素结构特点及数据可得性,遵循指标的科学性、代表性和可操作性原则,构建了北方农牧交错带人地系统综合评价指标体系(表1)。北方农牧交错带是农牧契合带,农业和畜牧业生产方式并存,农牧业系统主要选取体现农牧业生产能力的指标,乡村人均粮食产量、乡村人均肉产量、人均农牧

业机械总动力能够反映乡村生产能力和生产效率;选取农用化肥施用强度作为负向指标,反映农牧区农业面源污染问题。村庄系统主要体现生产、生活、生态用地情况,耕地、草地和农村居民点用地是农牧系统基本的土地利用方式,选取人均耕地面积及人均草地面积反映农牧民生产用地情况;近年来,由于农村劳动力大规模转移,乡村空心化和宅基地空废等问题凸显,选取乡村人均居民点用地作为负向指标来反映土地集约利用情况;选取植被覆盖度(NDVI)指标反映生态环境状况。乡域系统关注系统中农牧民的主体性,乡村从业人员占比和乡村非农就业占比越大,说明乡村人口就业机会越多,从而有效减缓乡村地区人口流失,农牧民人均纯收入越高说明居民生活水平越高。城镇系统关注系统经济发展能力,城镇化率、二三产业产值占比以及人均GDP越高,说明地区发展水平越高,有利于推动区域实现乡村振兴,促进城乡融合发展。

1.3 数据来源

本研究所用数据主要包括人口数据、社会经济统计数据和地理信息数据。人口数据主要来自人口普查公报、《中国人口普查分县资料》、《中国县域统计年鉴(乡镇卷)》。社会经济统计数据主要来自各省市统计年鉴、《中国县域统计年鉴》、《中国区域经济统计年鉴》、县域国民经济和社会发展统计公报等。土地利用数据、植被覆盖度(NDVI)来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。行政边

表1 北方农牧交错带人地系统综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of human-land system in farming-pastoral ecotone of northern China

子系统 Subsystem	指标 Indicator	指标解释及计算方法 Interpretation and calculation of indicator	性质 Property	单位 Unit	权重 Weight
农牧业系统	乡村人均粮食产量 V1	粮食产量/乡村常住人口	+	t·人 ⁻¹	0.30
	乡村人均肉产量 V2	肉类总产量/乡村常住人口	+	t·人 ⁻¹	0.39
	人均农牧业机械总动力 V3	农牧业机械总动力/乡村常住人口	+	kWh·人 ⁻¹	0.29
	农用地肥施用强度 V4	农用地肥施用量/耕地面积	-	t·hm ⁻²	0.02
村庄系统	乡村人均耕地面积 V5	耕地面积/乡村常住人口	+	hm ² ·人 ⁻¹	0.29
	乡村人均居民点用地 V6	乡村居民点面积/乡村常住人口	-	hm ² ·人 ⁻¹	0.03
	乡村人均草地面积 V7	草地面积/乡村常住人口	+	hm ² ·人 ⁻¹	0.45
	植被覆盖度(NDVI) V8	单位面积归一化植被指数	+	—	0.23
乡域系统	乡村非农就业占比 V9	二三产业乡村从业人员/乡村从业人员	+	%	0.20
	乡村从业人员占比 V10	乡村从业人员/乡村常住人口	+	%	0.17
	农牧民人均纯收入 V11	反映乡村地区农牧民的平均收入水平	+	元	0.63
城镇系统	城镇化率 V12	城镇常住人口/常住总人口	+	%	0.20
	二三产业产值占比 V13	二三产业产值/地区生产总值	+	%	0.11
	人均GDP V14	地区生产总值/常住人口	+	元·人 ⁻¹	0.68

界数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),时间节点为2015年。由于行政区划调整、统计口径不一致、数据缺失等,部分年份研究数据不包括红寺堡区、双滦区、双桥区、御道口牧场。对于其他个别缺失和错误数据,采用相邻年份数据或用其上一级行政单元的平均值替代。最终得到北方农牧交错带有效县域单元为2000年142个、2010年143个、2020年145个。

1.4 研究方法

1.4.1 改进熵权法

本研究在采取极值标准化法消除指标量纲、数量级及正负取向影响的基础上,采用熵权法确定各指标权重,根据指标熵权判断不同指标对整个系统的影响程度,通过信息熵理论确定权重,避免主观赋权。借鉴杨丽等^[28]的研究成果,对传统熵权法计算公式进行改进,加入时间变量,确定各指标权重。计算公式如下:

$$Q_{\theta ij} = \frac{P_{\theta ij} - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \text{ (正向指标)} \quad (1)$$

$$Q_{\theta ij} = \frac{P_{\max} - P_{\theta ij}}{P_{\max} - P_{\min}} \text{ (负向指标)} \quad (2)$$

$$S_{\theta ij} = \frac{Q_{\theta ij}}{\sum_{\theta=1}^v \sum_{i=1}^m Q_{\theta ij}} \quad (3)$$

$$E_j = \left(-\frac{1}{\ln(vm)} \right) \sum_{\theta=1}^v \sum_{i=1}^m (S_{\theta ij} \times \ln S_{\theta ij}) \quad (4)$$

$$D_j = 1 - E_j \quad (5)$$

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (6)$$

式中: $Q_{\theta ij}$ 为 θ 年 i 县的 j 指标标准化值; $P_{\theta ij}$ 为 θ 年 i 县的 j 指标值; $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为 j 指标中的最大值和最小值; $S_{\theta ij}$ 为指标占比; E_j 为信息熵值; D_j 为信息效用值; W_j 为指标权重。

1.4.2 耦合协调度模型

耦合度是指各子系统相互作用、彼此影响的强度^[29],协调度是指系统演变过程中内部各要素相互和谐一致的程度^[30]。本研究基于物理学中的耦合度模型分析北方农牧交错带人地系统中农牧业、村庄、乡域、城镇4个子系统的相互关系。计算公式如下:

$$U_1 = \sum_{a=1}^4 W_a \times Q_{\theta ia}; U_2 = \sum_{b=1}^2 W_b \times Q_{\theta ib}; U_3 = \sum_{c=1}^3 W_c \times Q_{\theta ic};$$
$$U_4 = \sum_{d=1}^3 W_d \times Q_{\theta id} \quad (7)$$

$$C = \sqrt[4]{\frac{U_1 \times U_2 \times U_3 \times U_4}{\left(\frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4} \right)^4}} \quad (8)$$

$$T = \beta_1 \times U_1 + \beta_2 \times U_2 + \beta_3 \times U_3 + \beta_4 \times U_4 \quad (9)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中: U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 分别为农牧业、村庄、乡域、城镇系统的评价指数; C 为耦合度, $C \in [0, 1]$,越趋近于1,耦合度越好,表明两者趋向新的有序结构,反之,向无序发展; T 为综合评价指数; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 为待定系数,根据4个子系统的重要程度,令 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.25$;

D 为协调度, $D \in [0, 1]$, 协调度数值越大, 则子系统发展水平越高, 且相互促进。通常, 耦合度可分为6种类型^[31](表2), 协调度可分为10种类型^[32](表3)。

1.4.3 障碍度模型

本研究运用障碍度模型^[33]诊断北方农牧交错带农牧业、村庄、乡域、城镇子系统协调发展的主要影响因素。计算公式如下:

$$V_{ij} = 1 - Q_{ij} \quad (11)$$

$$m_{ij} = \frac{V_{ij} \times W_j}{\sum_{j=1}^n V_{ij} \times W_j} \times 100\% \quad (12)$$

$$M_{ij} = \sum_{j=1}^n m_{ij} \quad (13)$$

表2 耦合度等级划分标准

Table 2 The classification standard of coupling degree

耦合度 Degree of coupling	等级 Level
$C=0$	无关状态
$0 < C \leq 0.3$	低水平耦合阶段
$0.3 < C \leq 0.5$	拮抗阶段
$0.5 < C \leq 0.8$	磨合阶段
$0.8 < C < 1$	高水平耦合阶段
$C=1$	良性共振耦合

表3 协调度等级划分标准

Table 3 The classification standard of coordination degree

类别 Category	协调度 Degree of coordination	等级 Level
失调衰退类	[0, 0.1)	极度失调衰退
	[0.1, 0.2)	严重失调衰退
	[0.2, 0.3)	中度失调衰退
	[0.3, 0.4)	轻度失调衰退
过渡类	[0.4, 0.5)	濒临失调衰退
	[0.5, 0.6)	勉强协调发展
协调发展类	[0.6, 0.7)	初级协调发展
	[0.7, 0.8)	中级协调发展
	[0.8, 0.9)	良好协调发展
	[0.9, 1]	优质协调发展

式中: V_{ij} 为指标偏离度; m_{ij} 为指标障碍度; M_{ij} 为子系统障碍度; n 为子系统指标数量。

2 结果与分析

2.1 人地系统发展水平时空特征

北方农牧交错带人地系统发展水平呈现上升性。农牧业、村庄、乡域、城镇子系统发展水平均表现为递增态势, 指数均值分别由2000年的0.08、0.14、0.13、0.10增至2020年的0.25、0.22、0.57、0.31(表4); 农牧业、村庄子系统发展水平相对滞后, 且村庄子系统发展速度缓慢, 乡域子系统发展水平增幅明显。从不同区域来看, 长城沿线沙化退化地区各子系统发展水平相对较好, 农牧业、乡域及城镇子系统发展水平增幅较大; 黄土丘陵沟壑地区各子系统发展水平相对滞后, 农牧业子系统发展尤为落后, 乡域子系统增幅明显; 京津冀水源涵养地区乡域子系统发展水平相对较高且增幅明显, 村庄及城镇子系统发展较为落后。

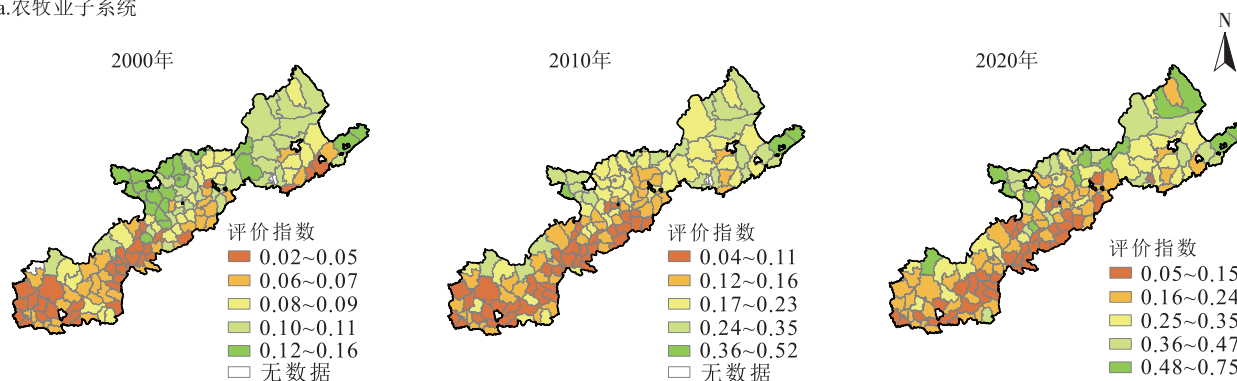
北方农牧交错带人地系统发展水平呈现空间非均衡性。农牧业、村庄、乡域、城镇子系统发展水平分异程度均为增大趋势, 标准差分别由2000年的0.03、0.05、0.04、0.05增至2020年的0.14、0.10、0.11、0.12, 采用自然间断点分级法(Jenks)得到县域尺度各子系统发展水平时空格局变化(图2)。2000年, 西南部的陕甘宁地区农牧业系统发展水平极低, 中部及东部发展水平相对较高; 2010年, 沿西南-东北方向形成带状低值区; 2020年, 低值带向西南移动, 北部、东部地区农牧业系统发展持续向好, 总体形成由东北向西南递减的空间格局。村庄系统发展水平在2000年整体表现为由西北向东南递减, 南侧形成带状低值区; 2010年北侧高值区范围扩大, 区域分异增大; 2020年整体分布格局变化不大。乡域系统发展水平空间格局在2000年整体为中部高、东西低, 陕甘宁地区以及内蒙古东部出现块状低值区; 2010年空间格局发生显著变化, 陕北以及内蒙古东部、辽宁地区发展迅速, 成为新的高值区; 2020年整体分布格局变化不大。

表4 2000—2020年北方农牧交错带人地系统发展水平时序变化

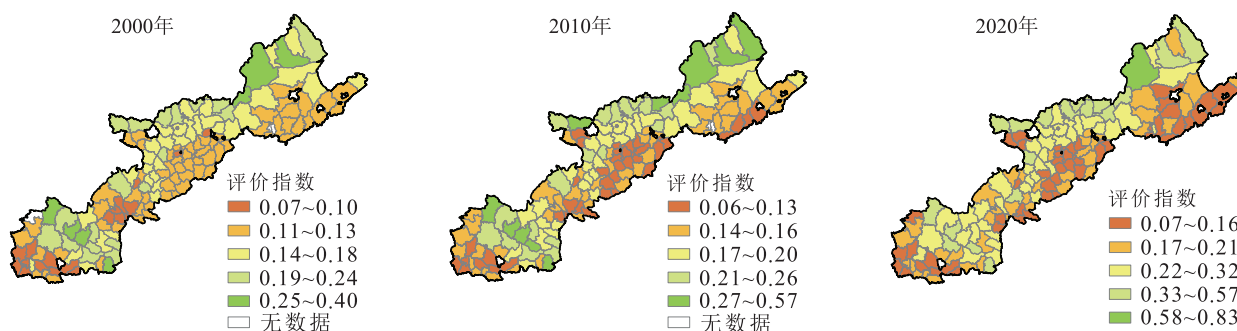
Table 4 Temporal variation of human-land system development in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

分区 Region	农牧业 Agriculture and animal husbandry			村庄 Village			乡域 Rural area			城镇 Township		
	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年
长城沿线沙化退化地区	0.09	0.19	0.29	0.14	0.17	0.22	0.13	0.30	0.58	0.11	0.23	0.32
黄土丘陵沟壑地区	0.05	0.12	0.18	0.14	0.17	0.22	0.11	0.28	0.53	0.10	0.19	0.31
京津冀水源涵养地区	0.08	0.16	0.26	0.13	0.15	0.20	0.16	0.29	0.61	0.11	0.19	0.30
北方农牧交错带(平均)	0.08	0.16	0.25	0.14	0.17	0.22	0.13	0.29	0.57	0.10	0.21	0.31

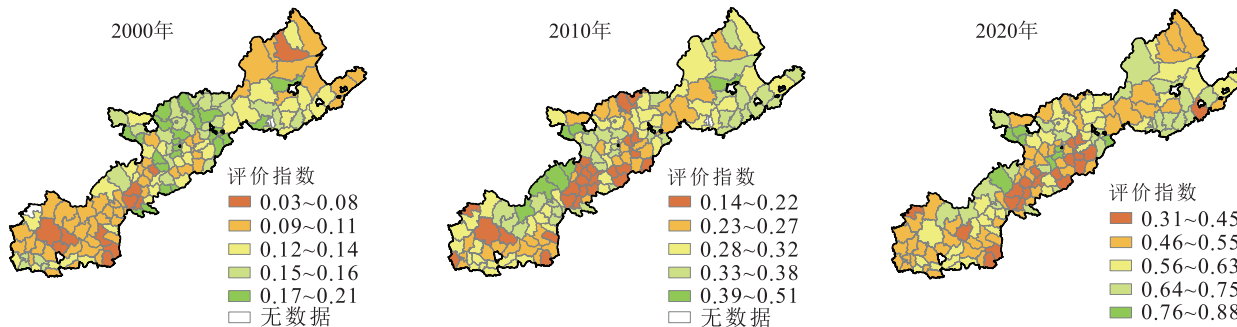
a. 农牧业子系统



b. 村庄子系统



c. 乡域子系统



d. 城镇子系统

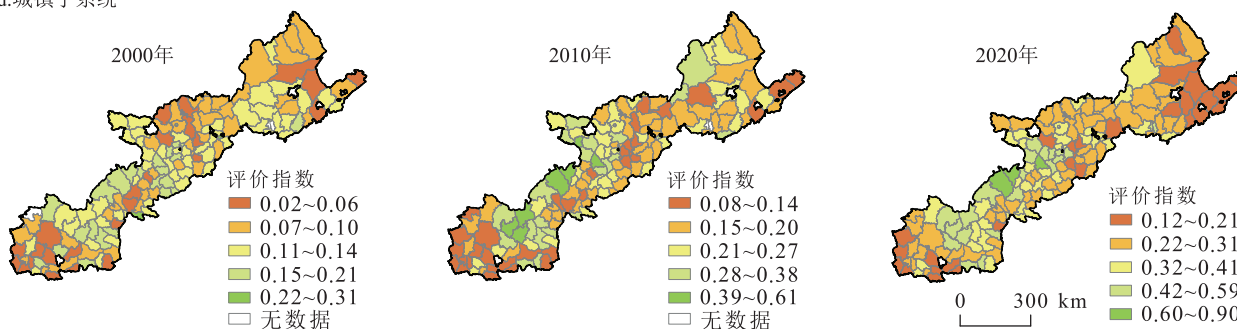


图2 2000—2020年北方农牧交错带各子系统发展水平时空变化

Figure 2 Temporal and spatial variation of subsystem development in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

2000年,城镇系统发展水平高值区较少,陕北和晋北地区相对较好;2010年陕北及内蒙古中部地区发展水平相对较好,形成高值区;2020年城镇系统发展水

平整体空间格局变化不大,低值区较多,高值区较少。

2.2 人地系统耦合协调度时空特征

2.2.1 耦合度时空特征

北方农牧交错带人地系统农牧业、村庄、乡域、城镇4个子系统间的耦合度较高。2000—2020年,北方农牧交错带及三大分区耦合度均值始终处于0.8~1的高水平耦合阶段,呈现出先升高后降低的趋势。各县域人地系统的耦合度值均大于0.50,处于磨合阶段或高水平耦合阶段(图3),2000年人地系统耦合度呈现明显的组团状分布格局,陕甘宁及内蒙古地区耦合度相对较低;2010年耦合度区域分异变小,陕北及辽宁少数县域耦合度较低,大部分地区耦合度较高;2020年耦合度区域分异增大,南部县域单元耦合度略有降低,呈现由西北向东南递减的空间格局。

2.2.2 协调度时空特征

北方农牧交错带人地系统农牧业、村庄、乡域、城镇4个子系统间的协调度不断提高,协调度均值由2000年的0.32增加至2020年的0.54,整体由轻度失调衰退向勉强协调发展转变,协调度空间分异程度有增大趋势,标准差由2000年的0.04增加至2020年的0.07。北方农牧交错带人地系统耦合协调度稳步上升,但当前协调发展水平仍然较低(图4)。2000年各县(市、区)处于中度失调衰退的有39个,处于轻度失

调衰退的有103个,均属于失调衰退类,总体协调发展水平较差,尤其是西部陕甘宁地区;2010年处于轻度失调衰退的县域单元有38个,处于濒临失调衰退的有85个,处于勉强协调发展的有20个,整体从以轻度失调衰退为主,转变为以濒临失调衰退为主,协调发展水平有了稳步提升,但总体发展水平仍不高,西部甘肃、宁夏地区及中部晋北地区发展缓慢;2020年处于濒临失调衰退的县域单元有38个,处于勉强协调发展的有78个,处于初级协调发展的有27个,处于中级协调发展的有2个,整体转变为以勉强协调发展为主,形成由西北向东南递减的空间格局(表5)。

从不同分区来看,长城沿线沙化退化地区2000年有83.12%的县域单元处于轻度失调衰退;2010年,51.95%处于濒临失调衰退,集中在中部的内蒙古及东部的辽宁、内蒙古地区,25.97%处于轻度失调衰退,主要分布于晋北地区,22.08%处于勉强协调发展,主要分布于北部的陕北、内蒙古地区;2020年,42.86%处于勉强协调发展,28.57%处于濒临失调衰退,主要分布于晋北及辽宁地区,25.97%处于初级协调发展,集中在北部的内蒙古及陕北一带,长城沿线

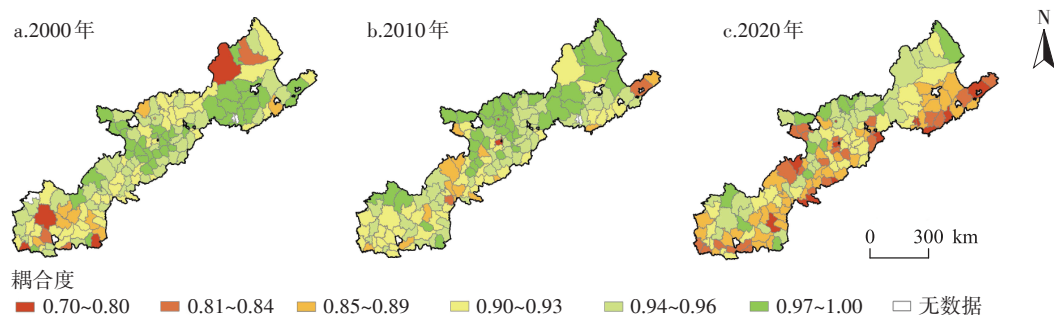


图3 2000—2020年北方农牧交错带人地系统耦合度时空变化

Figure 3 Temporal and spatial variation of coupling degree of human-land system in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

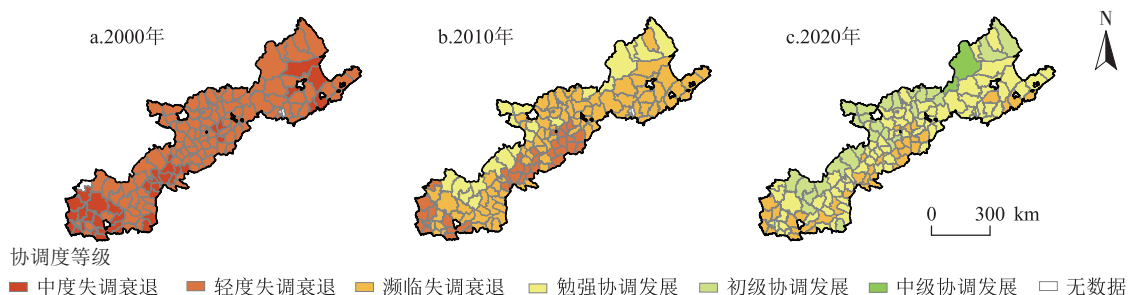


图4 2000—2020年北方农牧交错带人地系统协调度时空变化

Figure 4 Temporal and spatial variation of coordination degree of human-land system in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

沙化退化地区人地系统由失调衰退向协调发展稳步转变,内蒙古及陕北地区发展较快,晋北地区发展相对较慢。黄土丘陵沟壑地区在2000年时,60.47%的县域单元处于中度失调衰退,主要分布于西部的甘肃、宁夏地区,39.53%处于轻度失调衰退,分布于东部的陕北地区;2010年,56.82%处于濒临失调衰退,主要分布于中部和东部的甘肃、陕北地区,36.36%处于轻度失调衰退,集中在西部甘肃、宁夏地区;2020年,56.82%的县域单元处于勉强协调发展,34.09%的县域仍处于濒临失调衰退,黄土丘陵沟壑地区人地系统由失调衰退向过度类转变,陕北地区发展较快,甘肃、宁夏地区发展相对较慢。京津冀水源涵养地区在2000年时,所有县域单元均处于轻度失调衰退;2010年,90.91%的县域单元处于濒临失调衰退;2020年,83.33%的县域单元处于勉强协调发展,在区域内均布,京津冀水源涵养地区人地系统由失调衰退向过度类转变,持续稳步发展(表5)。

2.3 人地系统协调的障碍度测算

采用障碍度大于3%作为识别明显障碍因子的

原则,2000—2020年,阻碍北方农牧交错带人地系统协调水平提升的主要障碍指标为乡村人均草地面积、人均GDP、乡村人均肉产量,且乡村人均草地面积的障碍度增幅明显;农牧民人均纯收入障碍程度不断下降,尤其是在2010—2020年间,下降程度明显。从分区来看,除主要障碍指标外,长城沿线沙化退化地区的乡村人均耕地面积障碍度也不断增加,黄土丘陵沟壑地区及京津冀水源涵养地区的乡村人均粮食产量、乡村人均耕地面积障碍度不断增加(表6)。

2000—2020年,各子系统障碍度排序始终为农牧业>村庄>城镇>乡域,农牧业、村庄子系统的障碍作用尤为突出且障碍度不断增强,乡域子系统的障碍作用明显减弱。长城沿线沙化退化地区村庄子系统障碍度相对较大,农业、城镇子系统障碍度有所增加,乡域子系统障碍度减小;黄土丘陵沟壑地区农牧业子系统障碍程度突出,村庄子系统障碍度有所增加,乡域、城镇子系统障碍度减小;京津冀水源涵养地区城镇子系统障碍度相对较大,农牧业、村庄子系统障碍度有所增加,乡域子系统障碍度明显减弱(表7)。

表5 2000—2020年北方农牧交错带人地系统协调等级占比及分布

Table 5 Proportion and distribution of human-land system coordination level in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

分区 Region	2000年							
	中度失调衰退 Moderate dissonance			轻度失调衰退 Mild dissonance				
	数量(比例) Number(Proportion)	分布 Distribution		数量(比例) Number(Proportion)	分布 Distribution			
长城沿线沙化退化地区	13(16.88%)	东部、南部		64(83.12%)	均布			
黄土丘陵沟壑地区	26(60.47%)	西部		17(39.53%)	东部			
京津冀水源涵养地区	0	—		22(100.00%)	均布			
分区 Region	2010年							
	轻度失调衰退 Mild dissonance		濒临失调衰退 On the verge of dissonance		勉强协调发展 Barely coordinated development			
	数量(比例) Number(Proportion)	分布 Distribution	数量(比例) Number(Proportion)	分布 Distribution	数量(比例) Number(Proportion)	分布 Distribution		
长城沿线沙化退化地区	20(25.97%)	南部	40(51.95%)	中部、东部	17(22.08%)	北部		
黄土丘陵沟壑地区	16(36.36%)	西部	25(56.82%)	中部、东部	3(6.82%)	北部		
京津冀水源涵养地区	2(9.09%)	西南部	20(90.91%)	均布	0	—		
分区 Region	2020年							
	濒临失调衰退 On the verge of dissonance		勉强协调发展 Barely coordinated development		初级协调发展 Primary coordinated development		中级协调发展 Intermediate coordinated development	
	数量(比例) Number (Proportion)	分布 Distribution	数量(比例) Number (Proportion)	分布 Distribution	数量(比例) Number (Proportion)	分布 Distribution	数量(比例) Number (Proportion)	分布 Distribution
长城沿线沙化退化地区	22(28.57%)	南部	33(42.86%)	均布	20(25.97%)	北部	2(2.60%)	北部
黄土丘陵沟壑地区	15(34.09%)	中南部	25(56.82%)	均布	4(9.09%)	中部	0	—
京津冀水源涵养地区	1(4.17%)	西南部	20(83.33%)	均布	3(12.50%)	北部	0	—

表6 2000—2020年北方农牧交错带人地系统协调主要障碍指标及障碍度排序

Table 6 The major obstacle indexes and the rank of obstacle degrees of human-land system coordination in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

分区 Region	年份 Year	项目 Item	1	2	3	4	5	6	7	8
长城沿线沙化退化地区	2000	指标	V14	V7	V2	V11	V1	V3	V5	V12
		障碍度/%	17.20	16.35	13.35	12.83	10.67	10.20	6.97	3.98
	2010	指标	V7	V14	V2	V11	V1	V3	V5	V12
		障碍度/%	18.15	17.35	13.44	11.97	11.04	9.83	7.42	3.69
	2020	指标	V7	V14	V2	V1	V3	V5	V11	V12
		障碍度/%	20.94	18.10	14.23	10.82	10.16	7.66	7.08	3.86
黄土丘陵沟壑地区	2000	指标	V14	V7	V2	V11	V1	V3	V5	V12
		障碍度/%	16.82	15.96	13.79	12.75	10.63	10.34	6.83	4.19
	2010	指标	V7	V14	V2	V11	V1	V3	V5	V12
		障碍度/%	17.28	17.06	14.66	12.05	10.97	10.04	7.34	3.80
	2020	指标	V7	V14	V2	V1	V3	V11	V5	V12
		障碍度/%	19.33	17.28	16.07	11.55	10.16	8.34	7.59	3.45
京津冀水源涵养地区	2000	指标	V14	V7	V2	V11	V1	V3	V5	V12
		障碍度/%	17.12	16.79	13.03	12.90	11.13	10.41	7.25	4.35
	2010	指标	V7	V14	V2	V11	V1	V3	V5	V12
		障碍度/%	18.26	17.41	12.74	12.35	11.49	10.17	7.62	3.85
	2020	指标	V7	V14	V2	V1	V3	V5	V11	V9
		障碍度/%	21.38	19.02	12.64	12.55	10.81	7.67	6.98	3.13

表7 2000—2020年北方农牧交错带人地系统协调障碍子系统及障碍度(%)

Table 7 The obstacle subsystems and the obstacle degrees of human-land system coordination in farming-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020(%)

分区 Region	年份 Year	农牧业子系统 Agriculture and animal husbandry	村庄子系统 Village	乡域子系统 Rural area	城镇子系统 Township
长城沿线沙化退化地区	2000	34.27	24.64	18.37	22.72
	2010	34.42	26.84	16.80	21.94
	2020	35.35	29.84	11.77	23.03
黄土丘陵沟壑地区	2000	34.81	24.23	18.53	22.43
	2010	35.78	25.72	16.53	21.97
	2020	37.92	27.88	12.40	21.80
京津冀水源涵养地区	2000	34.61	24.95	17.78	22.66
	2010	34.47	26.60	16.42	22.51
	2020	36.09	29.74	10.89	23.28

3 讨论

北方农牧交错带人地系统耦合度始终处于高水平耦合阶段,而当前协调发展水平仍较低,且空间分异程度有增大趋势,不利于农牧区可持续发展。其中,农牧业子系统障碍作用最强,乡村人均肉产量、乡村人均粮食产量均为阻碍人地系统协调水平提升的主要障碍因素,表明北方农牧交错带亟需解决农牧业可持续发展问题。高树琴等^[34]研究发现,北方农牧交

错带存在农牧结构失衡、生态草牧业不完善等问题,制约人地系统的耦合协调发展。北方农牧交错带作为农牧契合带,在保障国家大粮食安全中地位特殊,应予以足够重视,特别是黄土丘陵沟壑地区,由于历史时期陡坡耕地大面积开垦,土地肥力衰退,水土流失严重,粮食安全和生态环境的耦合问题应得到充分重视^[35]。北方农牧交错带村庄子系统障碍度不断增强,乡村人均草地面积、乡村人均耕地面积障碍程度大,存在土地退化、缺地少粮等问题,长城沿线沙化退

化地区土地沙化问题突出、生态环境脆弱,粮食产量相对较低,且优质饲草料种植面积不足^[36],京津冀水源涵养地区由于退耕还林、京津风沙源治理等生态工程实施,大量坡耕地退还为林地、草地,或面临粮食安全保障压力^[37]。乡域子系统发展水平增幅显著,2010—2020年,农村居民人均纯收入的障碍度明显减小,表明国家扶贫政策在北方农牧交错带脱贫过程中发挥了重要作用^[38],尤其是贫困程度较高的地区发展迅速,农牧民收入大幅提升,为实现贫困地区乡村转型与可持续发展奠定了基础^[39]。城镇子系统发展相对滞后,人均GDP是阻碍人地系统协调水平提升的主要障碍因素,且障碍度不断增强,产业化与城镇化发展较为落后,陕北及晋北地区的资源型城市面临发展转型等问题^[40]。

为进一步推进乡村振兴及区域可持续发展,北方农牧交错带应继续推进农牧结构调整,发挥区域农牧系统耦合的优势,发展种养生态循环模式,探索粮草种植模式,促进农牧业与生态环境协调发展;加快城镇化步伐,发展乡村二三产业,加快县域内城乡融合发展。在长城沿线沙化退化地区,应提高优质饲草料种植,适度扩大草食畜牧业规模;加快全域土地综合整治,改良沙化土地;注重陕北、晋北地区等资源型城市创新发展,推动绿色发展。在黄土丘陵沟壑地区,应继续推进退耕还林还草,发展特色牛羊产业;推进治沟造地等土地整治工程实施,增加优质耕地,减少侵蚀灾害,保障粮食安全;坚持增加耕地和保护环境并重,促进生态产业化;甘肃、宁夏及晋北地区做好防止返贫动态监测,建立帮扶长效机制。在京津冀水源涵养地区,应推动传统农区城镇化建设与产业化融合发展,促进乡村产业由单一农业向三产融合发展转型;建设生态循环农业,发挥水源涵养地的重要作用,使耕地、粮食、人口、生态协调发展。

4 结论

(1)2000—2020年,北方农牧交错带农牧业、村庄、乡域、城镇子系统发展水平不断提高,乡域子系统发展水平增幅明显;长城沿线沙化退化地区各子系统发展水平较高,黄土丘陵沟壑地区各子系统发展水平相对滞后,农牧业发展尤为落后,京津冀水源涵养地区乡域子系统发展水平相对较高且增幅明显,村庄及城镇子系统发展较为落后。

(2)2000—2020年,北方农牧交错带及三大分区人地系统耦合度始终处于高水平耦合阶段,协调度稳

步上升,由轻度失调衰退向勉强协调发展转变,但当前协调发展水平仍然较低,空间分异程度有增大趋势。长城沿线沙化退化地区及京津冀水源涵养地区协调度相对较高,黄土丘陵沟壑地区一直为最低,内蒙古及陕北地区发展较快,山西、甘肃、宁夏地区发展相对较慢。

(3)2000—2020年,阻碍北方农牧交错带人地系统协调水平提升的主要障碍因子为乡村人均草地面积、人均GDP、乡村人均肉产量,且乡村人均草地面积的障碍度明显增大,2010—2020年农牧民人均纯收入的障碍度明显减小;农牧业、村庄子系统的障碍作用尤为突出且障碍度不断增强,乡域子系统的障碍作用明显减弱,针对性分区治理对实现区域农牧业可持续发展、乡村振兴及城乡融合具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展[J]. 地理学报, 2016, 71(12): 2067–2088. LI X Y, YANG Y, LIU Y. Research progress in man-land relationship evolution and its resource-environment base in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2067–2088.
- [2] 吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统[J]. 经济地理, 1991, 11(3): 1–6. WU C J. The core of study of geography: Man-land relationship areal system[J]. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1–6.
- [3] STEFFEN W. Introducing the anthropocene: The human epoch[J]. *Ambio*, 2021, 50(10): 1784–1787.
- [4] DIFFENBAUGH N S, BURKE M. Global warming has increased global economic inequality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(20): 9808–9813.
- [5] PEROVIĆ V, KADOVIĆ R, ĐURĐEVIĆ V, et al. Major drivers of land degradation risk in western Serbia: Current trends and future scenarios[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107377.
- [6] 王永生, 施琳娜, 刘彦随. 乡村地域系统环境污染演化过程及驱动机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2495–2503. WANG Y S, SHI L N, LIU Y S. Evolution process of environmental pollution and its driving mechanisms in rural areal systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2495–2503.
- [7] 王永生, 刘彦随. 中国乡村生态环境污染现状及重构策略[J]. 地理科学进展, 2018, 37(5): 710–717. WANG Y S, LIU Y S. Pollution and restructuring strategies of rural ecological environment in China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(5): 710–717.
- [8] HANSEN J, HELLIN J, ROSENSTOCK T, et al. Climate risk management and rural poverty reduction[J]. *Agricultural Systems*, 2019, 172: 28–46.
- [9] 曹智, 刘彦随, 李裕瑞, 等. 中国专业村镇空间格局及其影响因素[J]. 地理学报, 2020, 75(8): 1647–1666. CAO Z, LIU Y S, LI Y R, et al. Spatial pattern and its influencing factors of specialized villages

- and towns in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(8): 1647–1666.
- [10] 李小龙, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系的历史演变过程及影响机制[J]. 地理研究, 2018, 37(8): 1495–1514. LI X Y, YANG Y, LIU Y. The evolution process and its mechanism of man-land relationship in China[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1495–1514.
- [11] 樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1060–1068. FAN J. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human-environment system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1060–1068.
- [12] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1221–1234. LIU Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221–1234.
- [13] 张博胜, 杨子生. 基于PSR模型的中国人地关系协调发展时空格局及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 252–262. ZHANG B S, YANG Z S. Spatio-temporal pattern and its influencing factors of coordinated development of man-land relationship in China using PSR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(13): 252–262.
- [14] 樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 597–607. FAN J. “Territorial system of human-environment interaction”: A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597–607.
- [15] 刘珣, 郭中领, 常春平, 等. 基于RWEQ和WEPS模型的中国北方农牧交错带潜在风蚀模拟[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 27–37. LIU J, GUO Z L, CHANG C P, et al. Potential wind erosion simulation in the agro-pastoral ecotone of northern China using RWEQ and WEPS models[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 27–37.
- [16] 李文龙, 石育中, 鲁大铭, 等. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1599–1612. LI W L, SHI Y Z, LU D M, et al. The spatio-temporal evolution of drought vulnerability in the ecotone between agriculture and animal husbandry in the north of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1599–1612.
- [17] 任强, 何春阳, 黄庆旭, 等. 中国北方农牧交错带贫困动态: 基于贫困距离指数的分析[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 404–416. REN Q, HE C Y, HUANG Q X, et al. The poverty dynamics in the agro-pastoral transitional zone in northern China: A multi-scale perspective based on the poverty gap index[J]. *Resources Science*, 2018, 40(2): 404–416.
- [18] 璩路路, 李裕瑞, 李琳娜, 等. 农牧交错带乡村空间发展类型及影响因素研究[J]. 经济地理, 2019, 39(10): 153–161. QU L L, LI Y R, LI L N, et al. Study on the types of rural spatial development and its influencing factors in agro-pastoral region[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(10): 153–161.
- [19] 石晓丽, 史文娇. 北方农牧交错带界线的变迁及其驱动力研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 1–11. SHI X L, SHI W J. Review on boundary shift of farming-pastoral ecotone in northern China and its driving forces[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20): 1–11.
- [20] CHEN X, JIANG L, ZHANG G L, et al. Green-depressing cropping system: A referential land use practice for fallow to ensure a harmonious human-land relationship in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. *Land Use Policy*, 2021, 100: 104917.
- [21] 常虹, 杨武, 石磊, 等. 基于土地利用的北方农牧交错区碳固定和土壤保持时空变化[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 484–493. CHANG H, YANG W, SHI L, et al. Spatial and temporal changes of carbon sequestration and soil conservation based on land-use in the farming pastoral ecotone of north China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 484–493.
- [22] 宋乃平, 卞莹莹, 王磊, 等. 农牧交错带农牧复合系统的可持续机制[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7931–7940. SONG N P, BIAN Y Y, WANG L, et al. Sustainable mechanism of agro-pastoral complex system in agro-pastoral ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7931–7940.
- [23] 李玉霖, 赵学勇, 刘新平, 等. 沙漠化土地及其治理研究推动北方农牧交错区生态恢复和农牧业可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 832–840. LI Y L, ZHAO X Y, LIU X P, et al. Research in desertification mechanism and reversion techniques promotes sustainable restoration of degraded ecosystem and agro-pastoral development[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(7): 832–840.
- [24] 李文龙, 匡文慧, 吕君, 等. 北方农牧交错区人地系统演化特征与影响机理——以内蒙古达茂旗为例[J]. 地理学报, 2021, 76(2): 487–502. LI W L, KUANG W H, LÜ J, et al. Adaptive evolution mechanism of rural human-land system in farming-and-pastoral areas of northern China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 487–502.
- [25] 刘彦随. 中国乡村振兴规划的基础理论与方法论[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1120–1133. LIU Y S. The basic theory and methodology of rural revitalization planning in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1120–1133.
- [26] 李进涛, 刘彦随, 杨园园, 等. 城镇化对农业农村的多维度影响: 基于省际面板数据实证研究[J]. 人文地理, 2019, 34(3): 137–145. LI J T, LIU Y S, YANG Y Y, et al. Multi-dimensional influence of urbanization on agriculture-rural: An empirical study based on provincial panel data[J]. *Human Geography*, 2019, 34(3): 137–145.
- [27] 周扬, 郭远智, 刘彦随. 中国乡村地域类型及分区发展途径[J]. 地理研究, 2019, 38(3): 467–481. ZHOU Y, GUO Y Z, LIU Y S. Areal types and their development paths in rural China[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(3): 467–481.
- [28] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. 经济问题, 2015(3): 115–119. YANG L, SUN Z C. The development of western new-type urbanization level evaluation based on entropy method[J]. *On Economic Problems*, 2015(3): 115–119.
- [29] 王敏晰, 马宇, 刘威, 等. 生态文明建设与资源循环利用耦合关系[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 577–587. WANG M X, MA Y, LIU W, et al. Coupling and coordination relationship between resource recycling and ecological civilization construction[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 577–587.

- [30] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1299-1307. MA L, JIN F J, LIU Y. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1299-1307.
- [31] 刘耀彬, 宋学锋. 城市化与生态环境的耦合度及其预测模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 91-96. LIU Y B, SONG X F. Coupling degree model and its forecasting model of urbanization and ecological environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(1): 91-96.
- [32] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177. LIAO C B. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 1999, 19(2): 171-177.
- [33] SHAO Z F, DING L, LI D, et al. Exploring the relationship between urbanization and ecological environment using remote sensing images and statistical data: A case study in the Yangtze River Delta, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5620.
- [34] 高树琴, 段瑞, 王竑晟, 等. 北方农牧交错带在保障国家大粮食安全中发挥重要作用[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 643-651. GAO S Q, DUAN R, WANG H S, et al. Farming-pastoral ecotone of northern China plays important role in ensuring national food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(6): 643-651.
- [35] PIMENTEL D. Soil erosion: A food and environmental threat[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2006, 8(1): 119-137.
- [36] 杨轩, 贾鹏飞, 侯青青, 等. 北方农牧交错带气候变化对粮草轮作生产的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 77-89. YANG X, JIA P F, HOU Q Q, et al. Investigating the impacts of climate change on the production of crop and forage rotational fields in the agro-pastoral interlaced zone in northern China[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(1): 77-89.
- [37] 陶泽涪, 王世清, 孙丕苓, 等. 中国北方农牧交错带耕地时空分异及驱动因素[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 153-163. TAO Z F, WANG S Q, SUN P L, et al. Spatio-temporal differentiation and driving factors of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 153-163.
- [38] LIU Y S, FANG F, LI Y H. Key issues of land use in China and implications for policy making[J]. *Land Use Policy*, 2014, 40(1): 6-12.
- [39] 王永生, 文琦, 刘彦随. 贫困地区乡村振兴与精准扶贫有效衔接研究[J]. 地理科学, 2020, 40(11): 1840-1847. WANG Y S, WEN Q, LIU Y S. Achieving effective connection between rural revitalization and targeted poverty alleviation in poverty-stricken regions[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(11): 1840-1847.
- [40] 崔丹, 卜晓燕, 徐祯, 等. 中国资源型城市高质量发展综合评估及影响机理[J]. 地理学报, 2021, 76(10): 2489-2503. CUI D, BU X Y, XU Z, et al. Comprehensive evaluation and impact mechanism of high-quality development of China's resource-based cities[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(10): 2489-2503.