



中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
ISSN 2096-6237, CN 13-1432/S

《中国生态农业学报(中英文)》网络首发论文

题目: 1992—2015 年中亚五国 LUCC 特征及耕地驱动力研究
作者: 韩海青, 王旭红, 牛林芝, 梁秀娟, 蒋晓辉, 谭竹婷
DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200406
收稿日期: 2020-06-01
网络首发日期: 2020-09-23
引用格式: 韩海青, 王旭红, 牛林芝, 梁秀娟, 蒋晓辉, 谭竹婷. 1992—2015 年中亚五国 LUCC 特征及耕地驱动力研究. 中国生态农业学报(中英文).
<https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200406>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200406

韩海青, 王旭红, 牛林芝, 梁秀娟, 蒋晓辉, 谭竹婷. 1992—2015 年中亚五国 LUCC 特征及耕地驱动力研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200406

HAN H Q, WANG X H, NIU L Z, LIANG X J, JIANG X H, TAN Z T. The LUCC characteristics and driving forces of cultivated land in the five Central Asian countries from 1992 to 2015[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200406

1992—2015 年中亚五国 LUCC 特征及耕地驱动力研究*

韩海青^{1,2}, 王旭红^{1,2**}, 牛林芝^{1,2}, 梁秀娟^{1,2}, 蒋晓辉^{1,2}, 谭竹婷³

(1. 西北大学城市与环境学院 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室 西安 710127;

3. 湘潭大学土木工程与力学学院 湘潭 411100)

摘 要: 中亚五国地处亚欧大陆的中心地带, 是“一带一路”全球发展战略中重要的沿线节点之一。借助 GIS 空间统计分析方法, 以欧空局气候变化项目全球土地覆盖数据为基础, 利用土地利用程度、动态度和转移矩阵对中亚五国 1992—2015 年土地利用/覆盖变化(LUCC)特征进行分析, 并运用地理探测器对耕地驱动力进行深入研究。结果表明: 1)1992—2015 年, 中亚五国的土地利用格局总体上表现为耕地和城镇用地的持续增加, 林地、草地和水域呈减少的趋势。耕地的增加主要来自林地(7.88 万 km²)和草地(5.27 万 km²)的转入, 城镇用地的增加主要来自耕地(0.50 万 km²)的转入, 耕地是仅次于城镇用地增速较快、变化最为显著的土地利用类型; 城镇用地在各国均呈现增加的趋势, 耕地除了乌兹别克斯坦之外, 在其他 4 国均呈现增加的趋势。2)1992—2015 年中亚五国土地利用程度总体上呈现缓慢上升的趋势(土地利用程度综合指数从 1992 年的 193.34 增加到 2015 年的 197.41), 即土地利用处于发展阶段; 土地利用程度为耕地>林地>草地>未利用地>水域>城镇用地。3)地理探测器对耕地变化的驱动因素的分析结果表明, 自然因素中年平均降水量对耕地变化的作用较为显著, 但在短时间内社会和农业因素发挥决定性的作用; 因子探测表明人口总数(0.882)和农村人口(0.881)对耕地扩张的影响力最大, 其次为粮食单产(0.746); 交互探测表明各因子交互作用均为互相增强, 其中, 农村人口与粮食单产的叠加作用对耕地扩张的解释力度最大(0.972), 影响耕地扩张的主要因素可归纳为人口增长和粮食单产提高。本研究可为中亚五国土地利用格局演变、区域土地利用规划和土地资源可持续利用提供决策支持。

关键词: 土地利用/覆盖变化(LUCC); 耕地; 驱动力; 地理探测器; 中亚五国

中图分类号: F301.2

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



The LUCC characteristics and driving forces of cultivated land in the five Central Asian countries from 1992 to 2015*

HAN Haiqing^{1,2}, WANG Xuhong^{1,2**}, NIU Linzhi^{1,2}, LIANG Xiujuan^{1,2}, JIANG Xiaohui^{1,2}, TAN Zhuting³

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The five Central Asian countries, located in the center of the Eurasian continent, constitute one of the important nodes along the "Belt and Road", a global development initiative launched by China. On the basis of the global land cover data of the European Space Agency Climate Change Initiative, the Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) characteristics of the five Central Asian countries from 1992 to 2015 were analyzed using land use degree, dynamic attitude, and transfer matrix according to GIS spatial analysis, and the driving force of cultivated land was deeply exploited by utilizing geographical detectors. The results showed

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA2004030201)、国家自然科学基金项目(41971387, 41071271)和陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JM-430)资助

**通信作者: 王旭红, 研究方向为环境遥感。E-mail: jqy_wxh@nwnu.edu.cn

韩海青, 研究方向为土地利用/覆盖变化。E-mail: hanhaiqing@stumail.nwnu.edu.cn

收稿日期: 2020-06-01 接受日期: 2020-09-14

* The study was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA2004030201), the National Natural Science Foundation of China (41971387, 41071271) and the Basic Research Program of Natural Science of Shaanxi Province (2020JM-430).

**Corresponding author, E-mail: jqy_wxh@nwnu.edu.cn

Received Jun. 1, 2020; accepted Sep. 14, 2020

that: ① From 1992 to 2015, the land use pattern of the five Central Asian countries showed the continuous increase of cultivated land and urban land, and the decrease of forest land, grassland, and water area. The increase of cultivated land mainly came from the transfer of forest land ($7.88 \times 10^4 \text{ km}^2$) and grassland ($5.27 \times 10^4 \text{ km}^2$); the increase of urban land mainly came from the transfer of cultivated land ($0.50 \times 10^4 \text{ km}^2$). To be specific, the cultivated land in Kazakhstan was mainly from the transfer of forest land and grassland; the cultivated land in Kyrgyzstan and Tajikistan was mainly from the transfer of grassland; the cultivated land in Turkmenistan was mainly from the transfer of unused land; and the cultivated land in Uzbekistan was mainly transferred out to urban land, forest land, and grassland. The transfer between these land use types is closely related to human activities. Cultivated land ranked in the second place (following urban land) in the growth rate, and it was the most variable land use type in the five Central Asian countries. Urban land increased in all the five Central Asian countries, and so did cultivated land (except in Uzbekistan); ② From 1992 to 2015, on the whole, the land use degree generally showed a slowly rising trend in the five Central Asian countries (from 193.34 in 1992 to 197.41 in 2015), meaning that land use was in the stage of development. Various land use types can be ranked as follows in the descending order of land use degree: cultivated land > forest land > grassland > unused land > water area > urban land; ③ The driving factors of cultivated land change were analyzed with geographical detectors. The results showed that, among natural factors, annual average precipitation had a significant effect on changes of cultivated land, but social and agricultural factors played a decisive role in the short term. Factor detection showed that the total population (0.882) and the rural population (0.881) had the greatest influence on the expansion of cultivated land, followed by the per unit area yield of grain (0.746). Interactive detection showed that the interactions of various factors were mutually reinforcing. In particular, the superposition of the rural population and crop production index had the greatest explanatory power for the expansion of cultivated land (0.972). The main factors affecting the expansion of cultivated land can be summarized as population growth and improvement of agricultural production level. This paper aims to provide decision support for the evolution of land use patterns, the planning of regional land use, and the sustainable use of land resources in the five Central Asian countries.

Key words: LUCC; Cultivated land; Driving force; Geodetector; Five Central Asian countries

中亚五国处于北半球大陆温带、暖温带地区,是亚洲大陆主要的干旱区^[1]。地处青藏高原的西侧,帕米尔高原的西北角,是生态环境十分脆弱的地区之一^[2]。自1991年苏联解体后,中亚五国相继独立,经济和政治政策发生了重大变化,导致土地利用发生了显著的时空变化,特别是近年来,随人口的增长和城镇化进程的加快,该地区的人地矛盾更加严重^[3-4]。

土地利用与覆盖变化(LUCC)是全球环境变化的关键研究内容,亦是人与自然环境连接最紧密的纽带^[5-7]。自“土地利用/覆盖变化”研究计划实施以来^[8-9],国内外的学者们已在LUCC的动态变化、驱动力、环境效应、趋势模拟与预测等方面做了大量研究^[10],其中,Gao等^[11]研究了中国南方东江流域LUCC及背后驱动力,以期辅助管理者规划、设计和实施土地资源管理;Cui等^[12]以中国干旱地区典型的内陆湖泊—博斯腾湖为研究对象,分析LUCC对流域水质的影响;Batunacun等^[13]以内蒙古锡林郭勒为研究区,发现该区LUCC格局以土地退化为主,以此作为评价土地退化的基础,以便制定更好的防治土地退化的措施。中亚地区是“一带一路”倡议中一条重要的沿线,“一带一路”目的在于促进中国经济向全球化的方向发展,而LUCC是决定区域经济发展至关重要的因素。同时,在“一带一路”倡议实施的过程中,土地利用方式也会受到这一举措的影响,进而对生态环境和气候造成影响。因此,中亚地区LUCC监测对内陆干旱区生态环境建设意义重大。近年来,学者们对中亚地区的LUCC已做了一些研究,如韩其飞等^[14]利用UMD、GLC和GlobCover等多期遥感影像,分析1981—2009年中亚地区LUCC的特征与趋势,并将人口、经济和政策等因素划为LUCC的主要原因;阿里木江·卡斯木等^[15]利用1990—2000年Landsat TM/Landsat ETM+遥感影像,阐述了中亚五国首都城市的时空扩展变化特征;阮宏威等^[16]以欧洲太空局气候变化项目(Climatic Change Initiative, CCI)土地覆盖数据为研究数据,并结合蒸散发数据,探讨了中亚五国1992—2015年在土地利用方面的动态变化,分析了耕地与蒸散发的关系。

土地利用的驱动机制是揭示土地利用变化的重要途径,驱动力研究常用主成分分析方法、Logistic回归模型和灰色关联度分析法等方法。近年来,地理探测器在解释变量驱动力方面获得广泛使用,该方法与传统统计分析方法相比,独特之处在于方便易用,对类别变量的处理不需要太多的线性假设^[17]。另外,当自变量为数值型变量时,通过离散化将其转化为类型量,运用地理探测器建立的因变量与自变量之间的关系将比经典回归更加可靠^[18]。该方法不仅可以应用在建成区扩张、人居环境满意度等社会经济研究之中^[19-20],而且可以应用在净初级生产力(NPP)时空格局演变、人口的空间分异性、石漠化空间分布等方面^[21-23]。基于地理探测器的特性,同样适用于研究土地利用变化的空间分异性。

综上所述,对中亚五国LUCC的区域分异性和驱动机理,特别是利用地理探测器对单一土地利用类型如耕地的变化驱动力的研究仍需加强。因此,本文以中亚五国为研究区,利用GIS空间统计和地理探测器

分析方法, 剖析了 1992—2015 年中亚五国 LUCC 的区域特征与耕地驱动力。以期为实施“一带一路”倡议以及中亚地区土地资源可持续利用提供借鉴。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

研究区是中亚五国, 包括哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦。面积约 400 万 km², 人口 7 249.94 万人。经纬度为 46°29'47"~87°18'55"E, 35°07'43"~55°26'28"N (图 1)。西临里海, 东接中国, 北至西伯利亚平原, 南与阿富汗为邻^[24]。地势东南高, 西北低, 海拔-132~6 250 m。地貌类型从东向西分别为高山、低山丘陵和平原。气候类型是典型的温带沙漠、草原的大陆性气候^[25]。降水自西向东呈降低的趋势, 且由西南至东北, 冬、春季降水较多, 夏季降水较少。年平均温度较低, 且年内变化大, 年际变化明显^[26]。

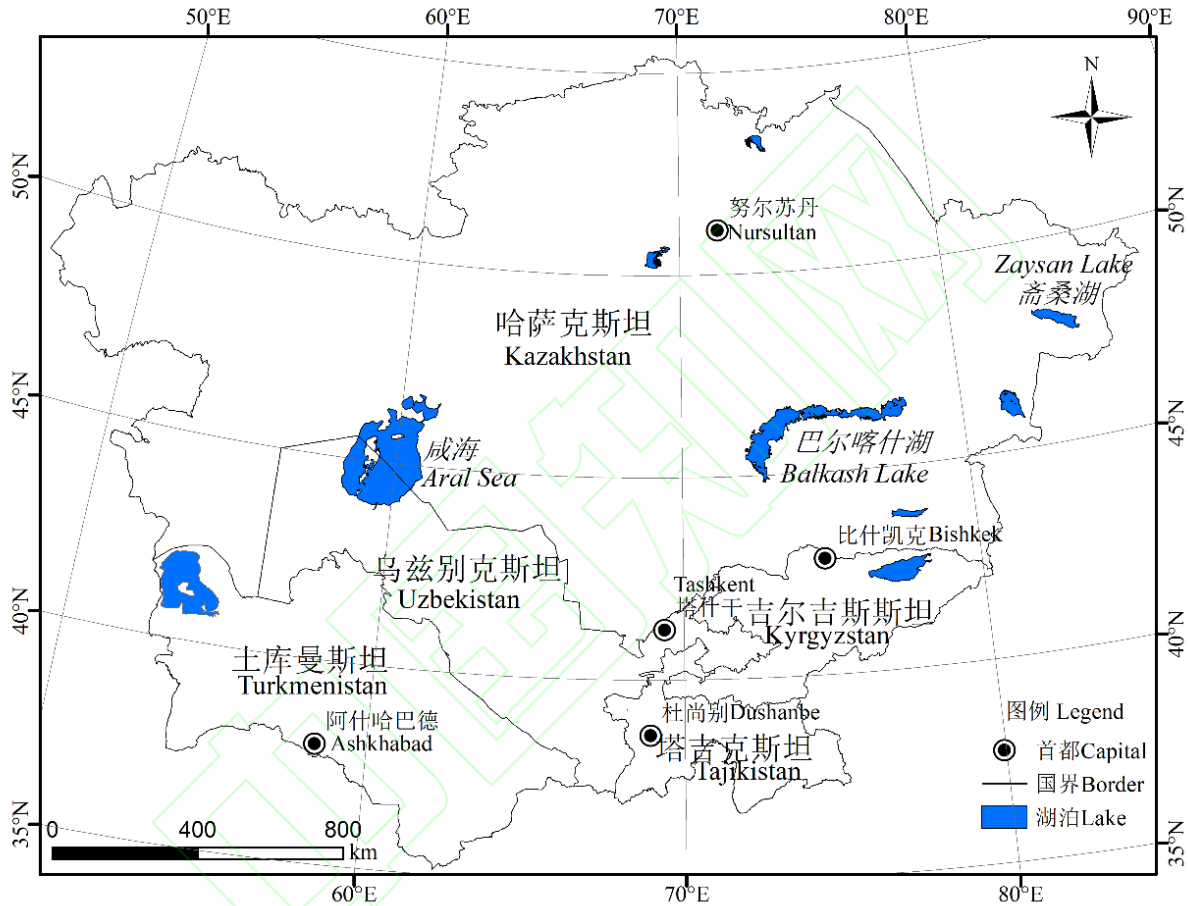


图 1 研究区位置及范围

Fig. 1 Location and scope of the study area

1.2 研究数据

土地利用数据源自 CCI 全球土地覆盖产品(<https://www.esa-landcover-cci.org/>), 空间分辨率为 300 m, 利用中亚五国的矢量数据边界对数据进行裁剪获得中亚栅格数据。CCI 土地利用数据包括 22 种土地利用类型, 参照 Globcover 土地覆盖分类系统, 将其重分类为城镇用地、耕地、林地、草地、水域和未利用地(表 1)。气温和降水等自然因素数据采用全球陆地数据同化系统 GLDAS(<https://disc.gsfc.nasa.gov/hydrology>), 选择 Noah 陆地表面模型 L4 月均(0.25°×0.25°)V2.0 和 V2.1 产品, 其中气温采用 V2.0(1992—1999 年)和 V2.1(2000—2015 年)的数据集, 降水采用 V2.0(1992—2014 年)的数据集。高程数据选用 SRTM(<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 空间分辨率为 90 m; 社会经济数据来自世界银行网站(<https://data.worldbank.org/cn/>)和联合国粮农组织数据库(<http://www.fao.org/faostat/zh/#home>)。

表 1 中亚五国土地利用与土地覆盖类型重分类

Table 1 Reclassification of land use and land cover in the five Central Asian countries

欧洲太空局气候变化项目土地利用与土地覆盖分类系统 Land use and land cover classification system of Climate Change Initiative	代码 Code	重分类 Reclassification
雨养农地 Rainfed farmland	10, 11, 12	耕地
水淹或灌溉农地 Flooded or irrigated farmland	20	Cultivated land
耕作(50%~70%)/其他自然植被(20%~50%)镶嵌 Cultivation (50%~70%)/other natural vegetation (20%~50%) mosaic	30	
耕作(20%~50%)/其他自然植物(50%~70%)镶嵌 Cultivation (20%~50%) / other natural vegetation (50%~70%) mosaic	40	
郁闭或敞开(>15%)常绿阔叶林 Closed or open (>15%) evergreen broadleaved forest	50	林地
郁闭或敞开(>15%)落叶阔叶林 Closed or open (>15%) deciduous broadleaved forest	60, 61	Forest land
郁闭或敞开(>15%)常绿针叶林 Closed or open (>15%) evergreen coniferous forest	70, 71, 72	
郁闭或敞开(>15%)落叶针叶林 Canopy closed or open (>15%) deciduous coniferous forest	80, 81	
针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	90	
林地和灌丛(≥50%)/草地(<50%)镶嵌体 Woodland and shrub (≥50%)/grassland (<50%) mosaic	100	
淡水或咸水水淹林地 Flooded woodland with fresh or salt water	160	
咸水水淹林地 Salt water flooded woodland	170	
灌木 Shrub	120, 122	
稀疏植被(林地、灌木) Sparse vegetation (woodland, shrub)	150	
草地(≥50%)/林地和灌丛(<50%)镶嵌体 Grassland (≥50%) / woodland and shrub (<50%) mosaic	110	草地
草地 Grassland	130	Grassland
稀疏草地(<15%) Sparse grassland (<15%)	153	
裸地 Bare land	200, 201, 202	未利用地 Unused land
郁闭或敞开(>15%)各种有规律水淹或长期水浸草地 Closed or open (>15%) various regularly flooded or chronically flooded grasslands	180	水域
水体 Water body	210	Water area
永久冰雪 Permanent ice and snow	220	
人工地表或附属区域 Artificial surface or ancillary area	190	城镇用地 Urban land

2 研究方法

2.1 土地利用变化分析方法

2.1.1 土地利用动态度

指研究区内某一土地利用类型在一定时期内数量上的变化^[27], 公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100 \% \quad (1)$$

式中: K 为土地利用动态度, U_a 、 U_b 为研究初、末期某一地类的面积, T 为时长。

2.1.2 土地利用程度

是表征人类活动对土地生态系统干扰的程度^[28]。根据刘纪远提出的综合分析方法^[28], 土地利用按照土地自然综合体的平衡状态被分为 4 级, 并赋予指数(表 2), 利用土地利用程度变化量反映土地利用的发展情况, 公式如下:

$$\Delta L_{b-a} = L_b - L_a = 100 \times \left(\sum_{i=1}^n A_i \times C_b - \sum_{i=1}^n A_i \times C_a \right) \quad (2)$$

式中: L_a 、 L_b 为 a 、 b 时间的土地利用程度综合指数, ΔL_{b-a} 为其变化量; C_a 、 C_b 为 a 、 b 时间某地类的面积占比, A_i 为分级指数, n 则为土地利用程度分级数。若 $\Delta L_{b-a} > 0$, 则土地利用为发展期, 反之, 为调整期或衰退期。

表 2 土地利用类型及分级表

Table 2 land use type and its classification

土地分级 Land classification	未利用土地级 Grade of unused land	林、草、水用地级 Grade of forestland, grassland and water area	农业用地级 Grade of agricultural land	城镇聚落地级 Grade of urban settlement land
土地利用类型 Land use type	未利用地 Unused land	林地、草地、水域 Forest land, grassland and water area	耕地 Cultivated land	城镇用地 Urban land
分级指数 Grading index	1	2	3	4

2.2 驱动力分析方法

2.2.1 探测指标体系

通过借鉴相关文献，再结合指标的可获得性，文中选取统计数值(社会经济、农业因素))和格网数据(自然因素)作为进行地理探测的空间分析数据源，所构建的指标体系表 3 所示。

表 3 中亚五国土地利用/覆盖变化驱动力分析的指标体系

Table 3 Indicators system of driving forces of land use/cover change in the five Central Asian countries

维度 Dimension	指标 Index
自然因素 Natural factor	年平均降水量 Annual mean precipitation (X_1)
	年平均气温 Annual mean temperature (X_2)
	海拔高度 Altitude (X_3)
社会因素 Social factor	人口总数 Total population (X_4)
	农村人口 Rural population (X_5)
经济因素 Economical factor	国内生产总值 GDP (X_6)
	工业增加值 Industrial added value (X_7)
	农业增加值 Added value of agriculture (X_8)
农业因素 Agricultural factor	粮食单产 Grain yield per unit area land (X_9)

2.2.2 离散化处理

离散化能够有效减少时间复杂度，克服因子间的单位差别^[29]。其中，降水和气温的年平均值，利用自然间断法被离散为 6 个级别(图 2)，在地理探测器验证得到的 q 统计值最大，分类效果最好。海拔高度划分为 4 类: 0~200 m、200~500 m、500~1 000 m、>1 000 m。社会经济和农业因素在 SPSS 软件中进行离散化处理^[30]，分为 5 类。然后，利用“创建渔网”工具，对研究区进行规则格网划分，设置格网大小为 100 km×100 km，剔除无值的点值，最终生成 1 471 个采样点。

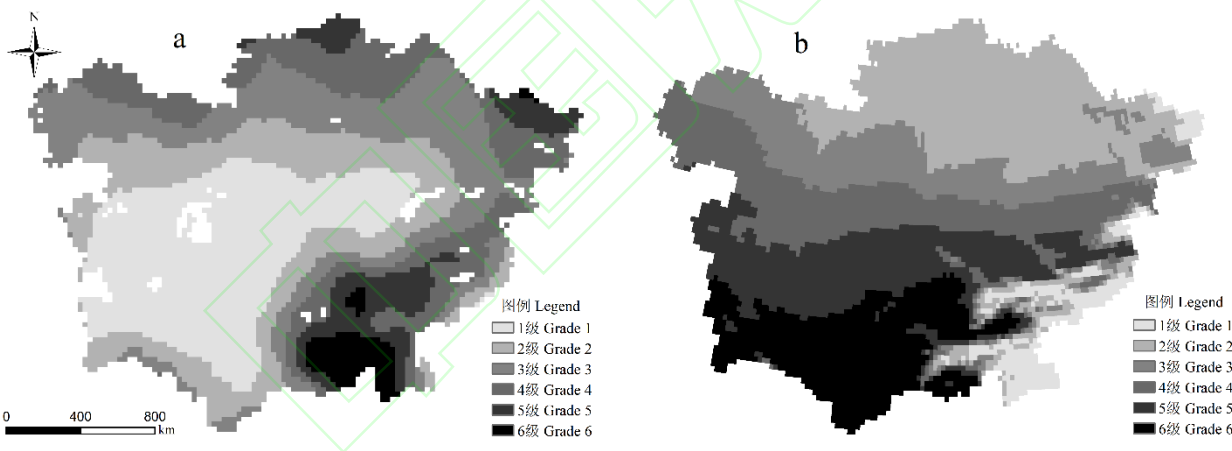


图 2 1992—2015 年中亚五国降水(a)和气温(b)分级

Fig. 2 Classification of precipitation (a) and temperature (b) in five Central Asian countries from 1992 to 2015

2.2.3 地理探测器

地理探测器是一种具有风险、因子、生态、交互 4 个层次分析方法的空间分析模型。其中，因子探测主要用来识别影响因变量的自变量，而交互探测是用来判断不同自变量同时作用于因变量时，其作用效果是增强或减弱^[18,31]，交互类型如表 4 所示。因子探测用 q 统计量来度量，其取值范围在 0~1 之间，表示自变量 X 解释了 $100 \times q\%$ 的因变量 Y ，值越大解释能力越强。计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ ，表示自变量 X 的分层; N 和 N_i 分别为总体和 i 层的单元数; σ^2 和 σ_i^2 分别为整个研究区域和 i 层的方差。

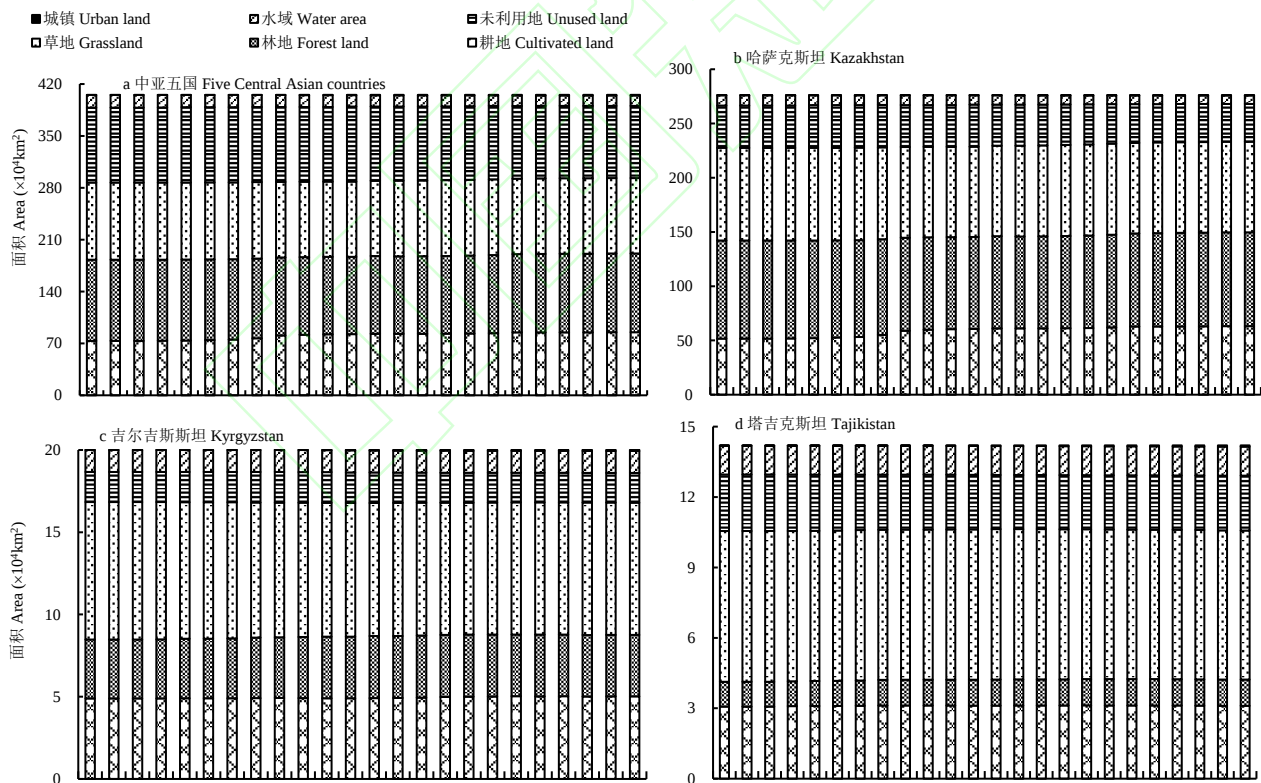
表 4 交互探测器交互作用类型
Table 4 Interaction types of interaction detector

判断依据 Criterion	交互作用 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱 Nonlinear attenuation
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1 \cap X_2)]$	单因子非线性减弱 Single factor nonlinear attenuation
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), (X_2)]$	双因子增强 Two-factor enhancement
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立 Independent
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强 Nonlinear enhancement

3 结果与分析

3.1 中亚五国土地利用的时空变化

在 1992—2015 年间, 中亚五国的土地利用在时间和空间上产生了显著的变化, 总体上表现为耕地面积和城镇用地面积的持续增加(耕地平均每年增加 6 099.41 km², 城镇用地平均每年增加 330.53 km²); 水域面积的逐年减少(平均每年减少 1 568.05 km²); 林地面积虽先减后增(大致上以 2002 年为界), 但总体上减少了 3.4 万 km²; 草地面积表现为减少(1992—2003 年)—增加(2004—2008 年)—减少(2008—2015 年), 而总体上减少了 2.22 万 km²(图 3a)。从中亚各国来看, 各国的土地利用类型变化趋势既具有一致性又具有差异性, 城镇用地面积在各国中均呈现增加的趋势, 其中, 在乌兹别克斯坦面积增加最快, 平均每年增加 151.41 km²; 耕地面积仅在乌兹别克斯坦总体上呈现减少的趋势, 其他 4 国均呈现增加的趋势(其中在哈萨克斯坦耕地面积增加最快, 平均每年增加 6 028.2 km²); 而草地面积在各国的变化恰好与耕地相反; 林地仅在哈萨克斯坦总体上表现为减少的趋势(平均每年减少 2 203.53 km²); 水域在吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦呈现增加的趋势且平均每年面积增加较缓慢, 在其他 3 国呈现减少的趋势, 其中在哈萨克斯坦减少最快, 平均每年减少 845.39 km²(图 3b-f)。



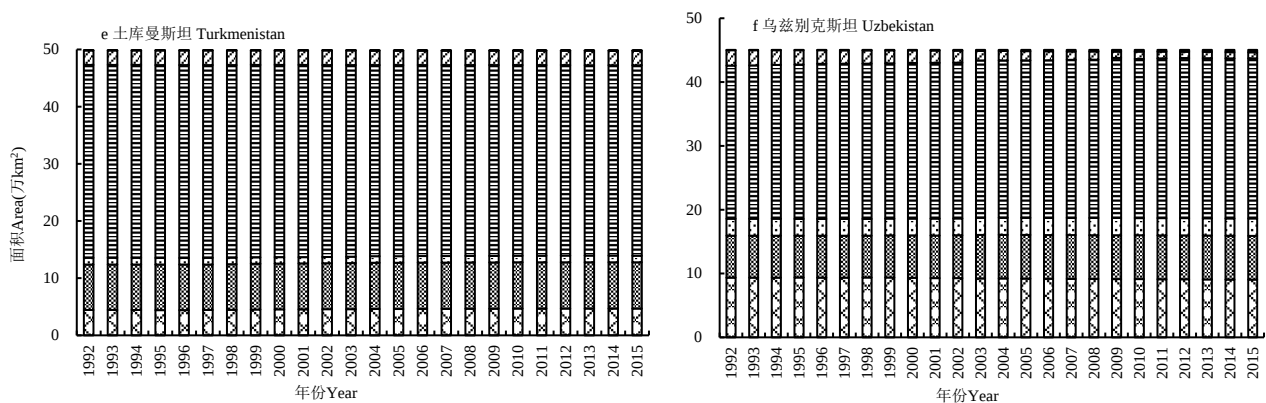


图3 1992—2015年中亚各国土地利用类型面积变化

Fig. 3 Change in area of land use types in Central Asian countries from 1992 to 2015

在空间上,耕地主要分布在哈萨克斯坦北部的图尔盖台地,其扩张也主要体现在哈萨克斯坦北部区域,林地和草地主要分布在里海沿岸低地和哈萨克丘陵,草地还有少部分分布在塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦的高山区域,水域主要包括河流、湖泊和冰雪融水,其中咸海南湖湖泊面积呈萎缩减少的态势^[32],城镇用地的面积最小,主要分布在中亚五国的北部和东南部,其扩张集中在东南部区域(图4)。

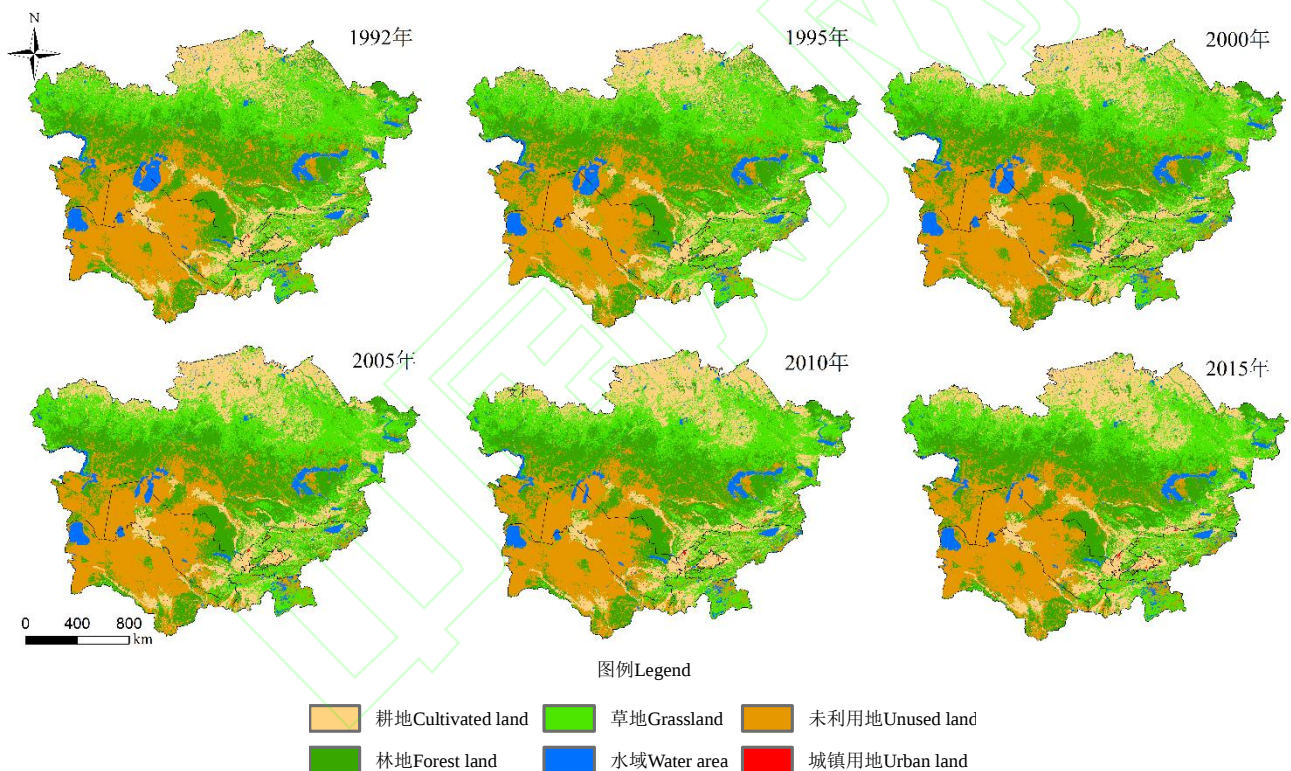


图4 1992—2015年中亚五国6个时期土地利用现状图

Fig. 4 Maps of land use in the five Central Asian countries in different periods from 1992 to 2015

3.2 土地利用转移分析

土地利用转移矩阵是描述土地利用类型之间相互转换的数量和转移的方向^[28]。通过转移矩阵分析,1992—2015年,中亚五国各土地利用类型显然存在着转移关系(表5)。其中,耕地以转入为主,林地和草地是主要的输入类型,分别转入7.88万 km^2 和5.27万 km^2 ;耕地亦有转出地类,其中0.50万 km^2 转为城镇用地。未利用地以转出为主,林地(4.58万 km^2)和草地(1.93万 km^2)是其主要转出类型。水域有3.07万 km^2 转为未利用地。但各国土地利用类型的转移情况存在明显差异,其中,哈萨克斯坦耕地以转入为主,主要来自林地和草地的转入,共转入12.66万 km^2 ,林地和草地分别转出9.66万 km^2 和5.89万 km^2 ,未利用地也有部分转出为林地和草地,水域有1.55万 km^2 转出为未利用地,城镇用地主要是来自耕地的转入;吉尔吉斯斯坦耕地和林地主要来自草地的转入,未利用地主要转出为草地,水域面积保持不变,城镇用地主要来自耕

地和草地的转入；塔吉克斯坦耕地主要来自草地的转入，林地主要来自草地和未利用地的转入，水域面积保持不变，城镇用地全部来自耕地的转入；土库曼斯坦耕地和林地主要来自未利用地的转入，草地也有部分转出为耕地，城镇用地主要来自耕地的转入；乌兹别克斯坦耕地主要转出为城镇用地、林地和草地，而林地和草地更大部分是由未利用地转化而来，未利用地增加的面积主要是来自水域的转入，城镇用地主要来自耕地的转入，另外一部分是来自草地的转入。

表 5 中亚五国 1992—2015 年各时期土地利用转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of land use in the five Central Asian countries from 1992 to 2015		2015							×10 ⁴ km ²
1992		耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	未利用地 Unused land	水域 Water area	城镇用地 Urban land	转出 Roll out	
中亚五国 Five Central Asian countries	耕地 Cultivated land	71.37	0.66	0.75	0.11	0.03	0.5	2.05	
	林地 Forest land	7.88	99.44	1.98	0.22	0.07	0.04	10.19	
	草地 Grassland	5.27	1.38	97.01	0.25	0.03	0.11	7.04	
	未利用地 Unused land	0.48	4.58	1.93	93.81	0.13	0.02	7.14	
	水域 Water area	0.1	0.18	0.15	3.07	13.62	0	3.5	
	城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.25	0	
哈萨克斯坦 Kazakhstan	转入 Roll in	13.73	6.8	4.81	3.65	0.26	0.67	29.92	
	耕地 Cultivated land	50.55	0.39	0.53	0.03	0.03	0.11	1.09	
	林地 Forest land	7.66	80.78	1.73	0.18	0.06	0.03	9.66	
	草地 Grassland	4.74	1.00	79.54	0.08	0.01	0.06	5.89	
	未利用地 Unused land	0.17	4.08	1.59	33.07	0.06	0.01	5.91	
	水域 Water area	0.09	0.16	0.14	1.55	7.62	0	1.94	
吉尔吉斯斯坦 Kyrgyzstan	城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.17	0	
	转入 Roll in	12.66	5.63	3.99	1.84	0.16	0.21	24.49	
	耕地 Cultivated land	4.65	0.08	0.11	0	0	0.05	0.24	
	林地 Forest land	0.08	3.34	0.15	0.01	0	0	0.24	
	草地 Grassland	0.29	0.28	7.71	0.07	0	0.01	0.65	
	未利用地 Unused land	0.01	0.03	0.07	1.72	0	0	0.11	
塔吉克斯坦 Tajikistan	水域 Water area	0	0	0	0	1.33	0	0	
	城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.01	0	
	转入 Roll in	0.38	0.39	0.33	0.08	0	0.06	1.24	
	耕地 Cultivated land	3.01	0.01	0.01	0.01	0	0.04	0.07	
	林地 Forest land	0.01	1.01	0.02	0.01	0	0	0.04	
	草地 Grassland	0.08	0.04	6.24	0.06	0	0	0.18	
土库曼斯坦 Turkmenistan	未利用地 Unused land	0	0.06	0.08	2.26	0	0	0.14	
	水域 Water area	0	0	0	0	1.23	0	0	
	城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.01	0	
	转入 Roll in	0.09	0.11	0.11	0.08	0	0.04	0.43	
	耕地 Cultivated land	4.33	0.03	0.01	0.03	0	0.03	0.1	
	林地 Forest land	0.05	7.89	0.01	0.01	0	0	0.07	
乌兹别克斯坦 Uzbekistan	草地 Grassland	0.08	0.02	1.04	0.02	0	0.01	0.13	
	未利用地 Unused land	0.24	0.15	0.08	33.22	0.02	0.01	0.5	
	水域 Water area	0	0	0	0.02	2.52	0	0.02	
	城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.01	0	
	转入 Roll in	0.37	0.2	0.1	0.08	0.02	0.05	0.82	
	耕地 Cultivated land	8.81	0.15	0.09	0.03	0	0.28	0.55	
乌兹别克斯坦 Uzbekistan	林地 Forest land	0.09	6.40	0.06	0.02	0.01	0	0.18	
	草地 Grassland	0.09	0.04	2.46	0.02	0.01	0.03	0.19	
	未利用地 Unused land	0.06	0.26	0.11	23.52	0.04	0	0.47	
	水域 Water area	0.01	0.01	0.01	1.49	0.90	0	1.52	
	城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.06	0	
	转入 Roll in	0.25	0.46	0.27	1.56	0.06	0.31	2.91	

3.3 土地利用动态度分析

通过图 4 分析, 1992—2015 年中亚五国城镇用地面积增加最快, 年均增加率为 11.56%; 耕地次之, 年均增加率为 0.69%; 而林地、草地、未利用地和水域呈现减少的趋势。总体上看, 城镇用地和耕地是中亚五国变化最为显著的土地利用类型。从各时段来看, 中亚五国耕地和城镇用地在各时段均呈现增加趋势, 其中

耕地在 1995—2000 年增长率最快, 年均增长率达 1.97%, 远高于其他时段。而城镇用地在 2000—2005 年增加速率最快, 达到 19.70%; 水域在各时段内均呈现减少的趋势, 草地仅在 2000—2005 年有缓慢的增加, 而林地仅在 2005—2010 年和 2010—2015 年有缓慢的增加(图 5a)。

对于中亚各国来说, 五国中城镇用地面积在各时段内均呈现增长的趋势, 而且在 2000—2005 年间年均增长率最大, 其中吉尔吉斯斯坦的城镇用地在 2000—2005 年间年均增长率又远高于其他国家, 达到 116.10%(图 5c)。但是, 耕地等其他土地利用类型在五国中变化情况不同。其中, 哈萨克斯坦耕地面积在各时段内均呈现增长的趋势, 在 1995—2000 年年均增加率最大, 为 2.76%(图 5b); 吉尔吉斯斯坦耕地面积仅在最近的 2010—2015 年有缓慢的下降; 塔吉克斯坦耕地面积仅在 2010—2015 年有下降的趋势; 土库曼斯坦耕地面积仅在 1992—1995 年呈现下降的趋势; 土库曼斯坦林地面积在各时段内均呈现增长的趋势, 是五国中唯一的在各时段内林地面积持续增长的国家, 其它土地利用类型不再赘述。

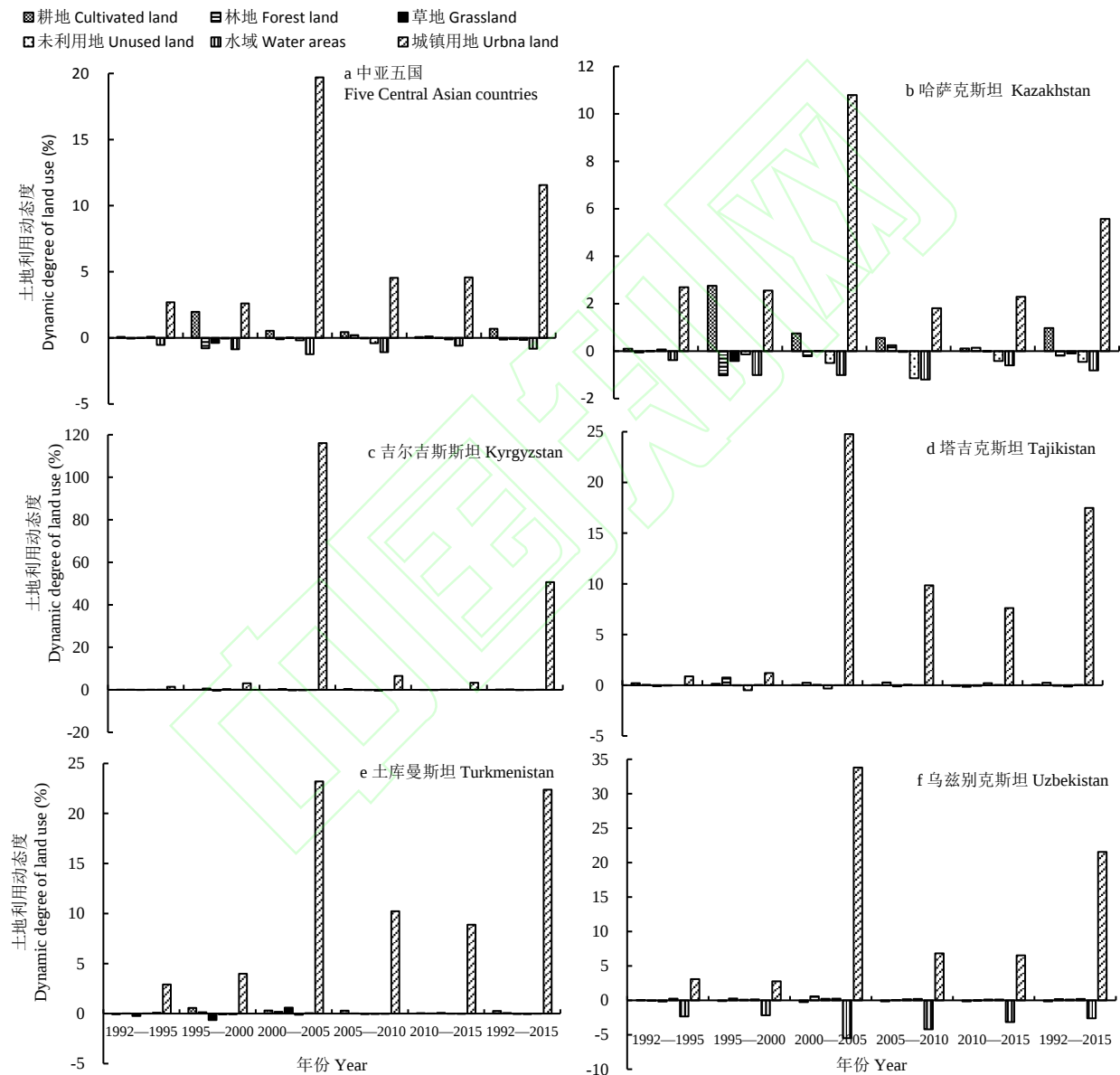


图 5 中亚五国不同时期的土地利用动态度

Fig. 5 Dynamic degree of land use in the five Central Asian countries from 1992 to 2015

3.4 土地利用程度变化分析

1992—2015 年中亚五国土地利用程度总体上呈缓慢上升的趋势, 表明土地利用处于发展阶段。在各年间, 耕地的土地利用程度均为最大, 林地次之, 城镇用地最小。从单一土地利用类型来看, 呈现不同的变化态势。其中, 耕地和城镇用地呈现增加的趋势, 即都在不同程度上处于发展期, 而林地、水域、草地与之相反, 呈衰退趋势(图 6)。

从中亚各国来看,哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦和土库曼斯坦土地利用程度均处于发展阶段。其中,吉尔吉斯斯坦土地利用程度居五国之首,在 2015 年达到 216.73,耕地的增加是导致其在五国中呈现最高值的主要因素。哈萨克斯坦次之,仅有乌兹别克斯坦土地利用程度处于衰退阶段,与耕地的衰退密切相关。由此可见,耕地是反映中亚五国土地利用发展阶段的重要指标。对于除耕地外的土地利用类型来说,城镇用地在中亚各国中均处于发展期,而林地、草地和水域的土地利用程度在各国发展情况不同。其中,哈萨克斯坦的水域和草地处于衰退期,林地以 2005 年为界,土地利用程度先降后升,但整体上低于研究初期。

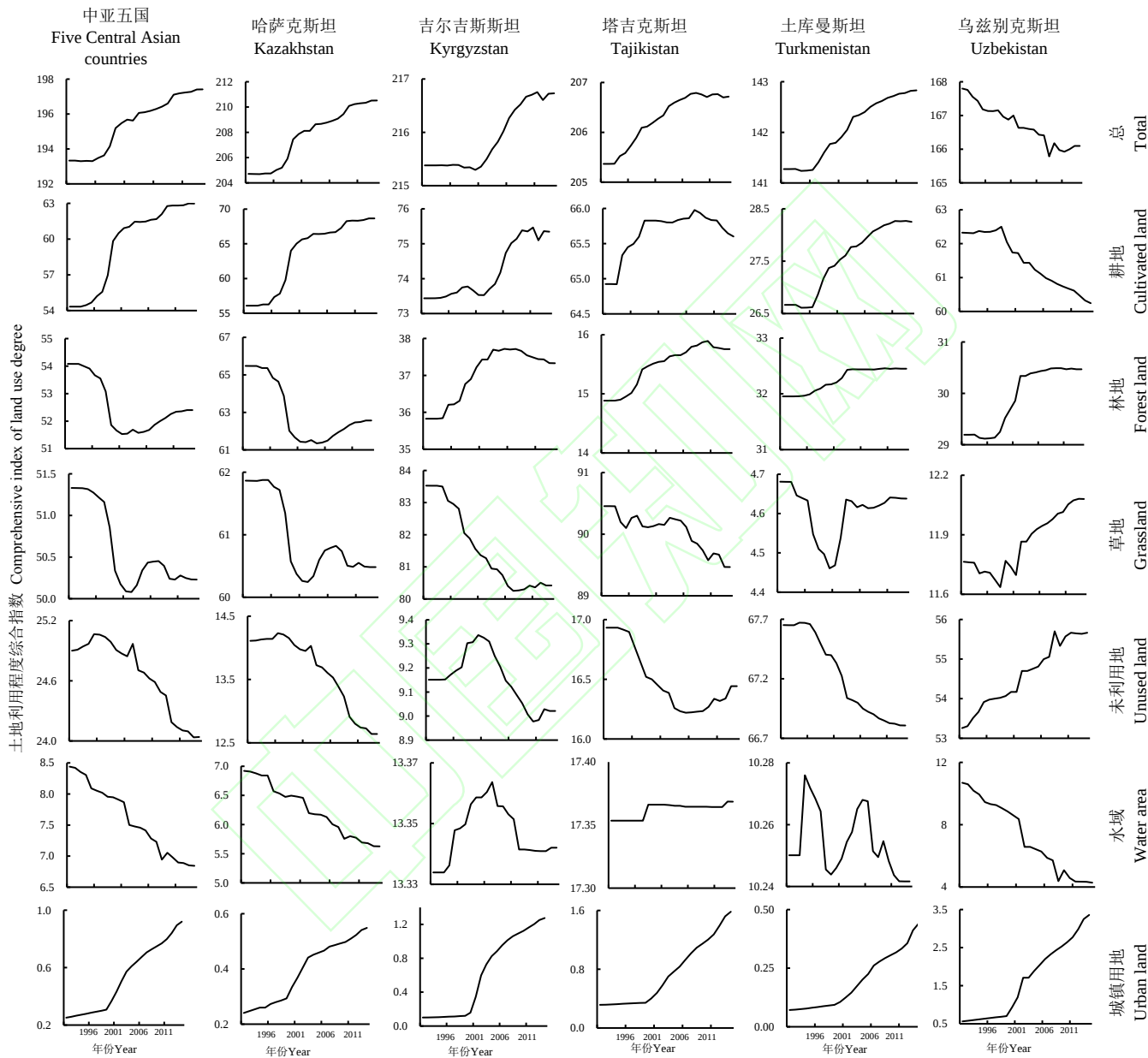


图 6 1992—2015 年中亚五国土地利用程度变化情况
Fig. 6 Changes in land use degree in the five Central Asian countries from 1992 to 2015

3.5 耕地变化的驱动力分析

土地利用变化的过程极其复杂,受很多因素制约,其中最重要的是自然因素和社会经济因素的影响^[33]。从中亚五国 1992—2015 年的土地利用变化来看,耕地是土地利用变化最为显著的类型之一,而且耕地的数量与生活保障、环境保护等关系重大,保障耕地面积一直是土地管理的重要工作^[34-35]。因此,以耕地为例从中亚五国整体的角度,利用地理探测器对其驱动力进行分析。

3.5.1 自然因素探测结果及分析

1)因子探测结果:用因子探测器定量探测自然因素对耕地扩张的作用强度,以 1992 年、2005 年和 2015

年 3 个时段的因子探测 q 值来说明(表 6), 各年中各因子对耕地面积扩张的作用强度排序均为: 年平均降水量>年平均气温>海拔高度, 表明对中亚五国而言, 年平均降水量对耕地面积变化的作用最为明显。通过一元线性回归方程分析(图 7), 24 年间(1992—2015 年), 中亚五国年均气温呈现升高趋势(增速为 $0.076\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$), 降水整体上表现出增加趋势(增速为 $1.074\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)。降水量是影响农作物生长非常重要的自然条件, 中亚五国年平均降水量呈现逐年增长趋势且降水集中在冬、春季, 这期间是冬小麦、玉米和水稻等农作物种植和生长的时间, 因此降水量的增加有利于农作物的生长, 而且气温升高能给农作物提供更多的热量, 这些对于农作物生长有利的自然环境变化是耕地扩张的动力。

表 6 1992—2015 年中亚五国不同时期各自然因子的作用强度

Table 6 Relative effect of natural factors in different periods in the five Central Asian countries during 1992–2015

年份 Year	年平均降水量 Annual mean precipitation (X_1)	年平均气温 Annual mean temperature (X_2)	海拔高度 Altitude (X_3)
1992	0.114	0.095	0.006
2005	0.135	0.118	0.003
2015	0.104	0.091	0.010

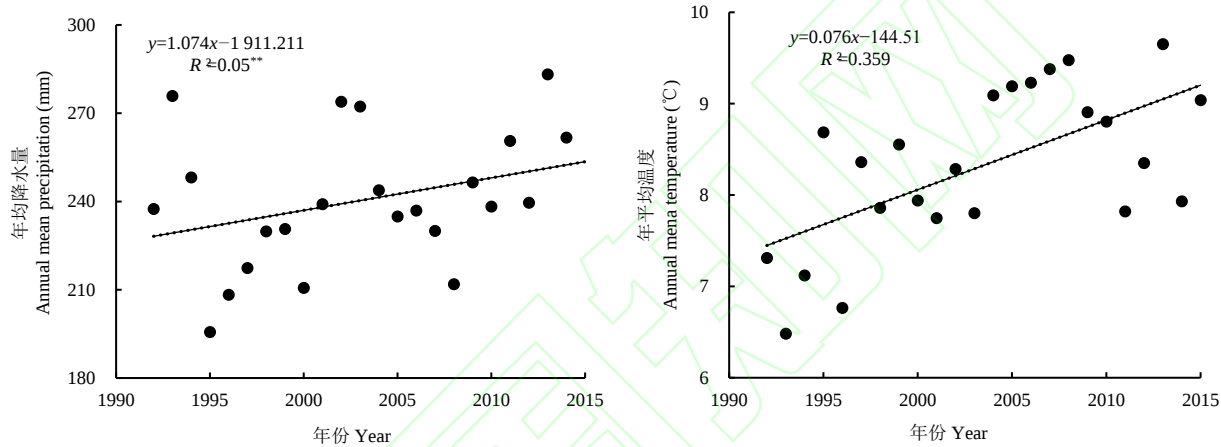


图 7 1992—2015 年中亚五国年平均降水量和年平均气温变化以及拟合趋势线

Fig.7 The change of annual mean precipitation and annual mean temperature and linear regression in the five Central Asian countries during 1992—2015

“**”代表达到 0.01 显著水平。“**”represents significance at $P<0.01$ level.

2)交互探测结果: 以 2015 年的结果(表 7)为例(1992 年和 2005 年的结果与其作用方式相同), 各因子交互作用均为互相增强, 说明各因素间具有明显的关联性与协调性。其中海拔高度对耕地面积扩张的解释力度最小, 但海拔高度制约气温、降水等自然因素的变化, 与这些因素共同作用时, 均呈现非线性增强, 尤其与年平均降水量共同作用时, 解释力度较大。

表 7 2015 年中亚五国各自然因子交互探测结果

Table 7 Interactive detection result of natural factors in the five Central Asian countries in 2015

	年平均降水量 Annual mean precipitation (X_1)	年平均气温 Annual mean temperature (X_2)	海拔高度 Altitude (X_3)
年平均降水量 Annual mean precipitation (X_1)	0.104		
年平均气温 Annual mean temperature (X_2)	0.181	0.091	0.161
海拔高度 Altitude (X_3)	0.163	0.161	0.010

年平均降水量和年平均气温交互探测结果满足 $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1 \cap X_2)]$; 平均降水量和海拔高度、年平均气温和海拔高度交互探测结果满足均满足 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$, 所以各因子交互作用均为互相增强。The interactive detection results of annual mean precipitation and annual mean temperature meet the requirements of $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1 \cap X_2)]$; the interactive detection results of annual mean precipitation and altitude, annual mean temperature and altitude meet the requirements of $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$; so the interaction of each factor is mutually enhanced.

3.5.2 社会经济因素探测结果及分析

1)因子探测结果: 各社会经济、农业因素单独作用对耕地面积扩张均具有一定的影响力(表 8), 其中人口总数和农村人口对耕地面积扩张的影响力最大, q 值分别为 0.882 和 0.881, 其次为粮食单产, q 值为 0.746, 农业增加值对耕地面积扩张的影响力最小, 为 0.499, 略接近于 50%, 其余因子对耕地面积扩张的影响力较强。上述研究结果表明: 人口因素是该地区耕地面积扩张的主要原因之一, 中亚地区以灌溉农业为主, 自

1992 年以来, 随着中亚五国的总人口持续增加(总人口增加了 1701.2 万人), 农村人口也在逐年上升, 致使人均灌溉面积不断减少, 促使中亚五国不断开垦灌溉耕地, 来满足农村人口对生产与生活的需求; 其次, 粮食单产是导致该地区耕地面积扩张的另一主要原因, 中亚五国以谷物种植为主, 包括大麦、小麦、水稻和土豆等, 各国中小麦的种植面积占比较高, 粮食单产在波动变化中呈逐年增长的趋势, 其单产的提高是一个良好的变化趋势推动着耕地面积扩张, 一方面来应对人口增加带来的对粮食更大的需求, 另一方面可用于出口。

表 8 1992—2015 年中亚五国各社会经济因素的作用强度

Table 8 Relative effects of socio-economic factors in different periods in the five Central Asian countries during 1992-2015						
	人口总数 Total population (X_4)	农村人口 Rural population (X_5)	国内生产总值 GDP (X_6)	工业增加值 Industrial added value (X_7)	农业增加值 Added value of agriculture (X_8)	粮食单产 Grain yield per unit area land (X_9)
q statistic	0.882	0.881	0.591	0.591	0.499	0.746

2)交互探测结果: 各因素耦合叠加均为双因子增强(表 9), 其中农村人口与粮食单产叠加后对耕地面积扩张的解释力度最大, 达到 0.972, 人口总数与粮食单产叠加后的解释力度次之, q 值最小的农业增加值与其他因子叠加后解释力度也有明显的增强, 其中农业增加值与农村人口叠加后的解释力度较大, 为 0.888, 表明这些社会经济因子并不是独立影响耕地变化, 共同作用于耕地时影响作用更强。

表 9 1992—2015 年中亚五国各社会经济因素交互探测结果

Table 9 Interactive detection result of socio-economic factors in the five Central Asian countries during 1992-2015						
	人口总数 Total population (X_4)	农村人口 Rural population (X_5)	国内生产总值 GDP (X_6)	工业增加值 Industrial added value (X_7)	农业增加值 Added value of agriculture (X_8)	粮食单产 Grain yield per unit area land (X_9)
人口总数 Total population (X_4)	0.882					
农村人口 Rural population (X_5)	0.887	0.881				
国内生产总值 GDP (X_6)	0.888	0.888	0.591			
工业增加值 Industrial added value (X_7)	0.888	0.888	0.608	0.591		
农业增加值 Added value of agriculture (X_8)	0.887	0.888	0.640	0.640	0.499	
粮食单产 Grain yield per unit area land (X_9)	0.971	0.972	0.844	0.844	0.856	0.746

总体而言, 影响耕地变化的各方面因素相比, 在短时间内社会和农业因素发挥决定作用, 影响中亚五国耕地面积扩张的主要因素归纳为人口增长和粮食单产提高。

4 讨论

4.1 基于降水分区的中亚五国耕地变化自然驱动力研究

以上的讨论主要是按行政界线来划分区域的。中亚作为干旱区, 降水的区域差异性必然对耕地变化产生一定的制约作用。因此, 按降水量差异来划分区域, 能更清晰的揭示耕地变化的驱动力。根据已有的研究成果^[36], 中亚五国按照降水的空间差异被划分为 5 个区域(图 8), 年平均降水量大小为 IV 区(336.21mm)> II 区(276.74mm)> I 区(249.93mm)> V 区(154.79mm)> III 区(127.54mm)。如图 8 所示, 在各降水分区中, 耕地面积由多到少排序为 II 区>IV 区> I 区>V 区>III 区, 可见耕地分布与区域降水量多寡具有明显的一致性。其中, 耕地面积在 I 区、II 区、III 区和 V 区主要呈现增长的趋势, 而在 IV 区呈现先增长、后减少(以 2005 年为界)的趋势。这是由于 I 区和 II 区地处哈萨克斯坦北部的丘陵、平原地区, 气候条件相对较好, 降水量较多, 有利于耕地的扩张^[16]。III 区即荒漠区, 降水稀少, 其耕地却有缓慢增加的趋势, 可能原因是除降水影响外, 其他水量补给因素如引水灌溉, 耕地多沿河分布^[16]。IV 区即吉尔吉斯斯坦区, 包括哈萨克斯坦东南、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦, 年均降水量较多, 但由于地处天山山地和帕米尔高原区, 受到地形因素的限制, 不利于耕地的开发, 导致其耕地有减少的趋势。V 区地处土库曼斯坦, 年均降水量较少, 引水灌溉是促进耕地增长的主要因素。

以 2015 年为例, 按照降水分区探讨降水量、气温和海拔高度 3 类自然因子对各分区耕地变化的综合影响, 因子探测结果表明(表 10), 在 I 区和 II 区中年平均气温对耕地变化的影响力较大, 而在 III、IV 和 V 区中年平均降水量对耕地变化的影响力较大, 由于各分区的气候和地形条件不同, 不同的自然因子对各分区的耕地

变化的影响力度存在差异。

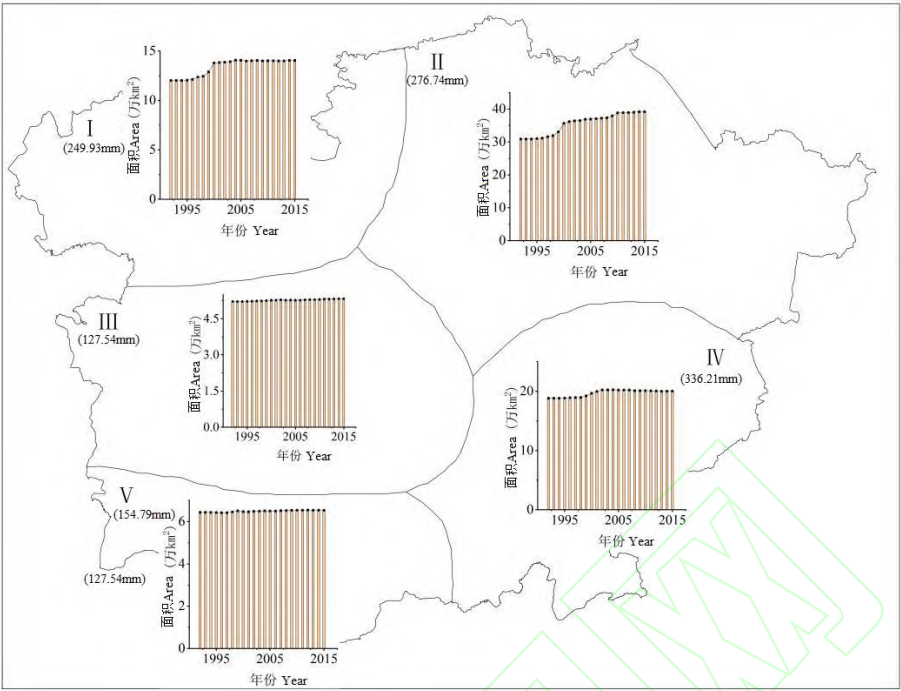


图 8 1992—2015 年中亚五国各降水分区的耕地面积变化(据文献[35]改绘)

Fig. 8 Changes of arable land areas in precipitation zones of five Central Asian countries from 1992 to 2015 ()

表 10 2015 年中亚五国各降水分区自然因素作用强度(地理探测器 q 值)的变化趋势

Table 10 Changes of relative effect of natural factors in precipitation zones of five Central Asian countries in 2015

降水分区 Precipitation zone	年平均降水量 Annual mean precipitation	年平均气温 Annual mean temperature	海拔 Altitude
I	0.299	0.339	0.071
II	0.256	0.267	0.074
III	0.042	0.033	0.047
IV	0.150	0.111	0.056
V	0.114	0.044	0.044

4.2 CCI 土地覆盖数据不确定性分析

CCI 全球土地覆盖数据是包含所有土地利用类型的、连续的、长时间序列的数据产品，它能获得长时间系列的陆地覆盖是利用 5 个观测系统，通过全球日地表反射来实现的，旨在随着时间的推移保持良好的一致性。经地面参考数据验证，总体精度为 74.4%^[37]，准确率较高。Li 等^[38]学者已利用 CCI 全球土地覆盖数据研究中亚土地覆盖类型的动态变化过程。本文利用 CCI 土地覆盖数据，是在原 22 种土地利用类型的基础上，参照前人的研究成果重新分类为 6 种主要土地利用类型，来研究其连续的土地利用格局变化，具有可行性。

本文仅是从中亚五国整体的角度研究耕地面积扩张的驱动因素，但中亚五国地域广阔，社会经济基础和发展状况各国有所不同，区域之间存在着明显的差异，这是未来研究的重要方向。

5 结论

以中亚五国为研究区，利用土地利用程度、动态度和转移矩阵分析中亚五国 1992—2015 年 LUCC 特征，并从自然、社会与经济、农业 4 个维度选取 9 个指标来构建指标体系，采用地理探测器分析耕地的驱动力。主要结论如下：

(1)在 1992—2015 年间，中亚五国的土地利用变化主要为耕地和城镇用地的持续增加，水域的持续减少，林地、草地则呈现为下降态势。耕地的增加主要是来自林地和草地，城镇用地的增加主要是来自耕地。这说明人类活动对该地区土地利用格局的变化有很大的影响，该地区在未来的土地利用规划中要考虑保护林、草地等。

(2)土地利用动态度分析的结果表明，城镇用地面积增加最快，耕地次之，二者成为中亚五国变化最为

剧烈的土地利用类型,由此可见该地区在城市扩张的同时,也保证了耕地的数量,满足了人口增加对耕地的需求,这对于人口的增长来说,具有积极的影响。耕地作为一种可再生资源,既为城市发展提供生长空间,还为人类提供粮食需求,在土地决策制定中必须要把保证耕地的数量放在重要的位置上。

(3)1992—2015 年中亚五国土地利用程度总体上呈现缓慢上升的趋势。其中,处于发展期的是耕地和城镇用地,而林地、草地和水域与之相反。对于中亚各国来说,除乌兹别克斯坦之外,其他四国土地利用程度均处于发展阶段,以吉尔吉斯斯坦土地利用程度最高。

(4)基于地理探测器模型分析,在短期内社会和农业因素对耕地面积变化起决定性作用,各影响因子交互作用均为互相增强,主要影响因素可以归纳为人口增长和粮食单产提高两个方面。通过对影响 LUCC 的社会经济和农业因素的深入了解,可以为未来提出相关决策提供参考。

参考文献 References

- [1] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征度[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1-12
HU R J, JIANG F Q, WANG Y J, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of central Asia[J]. Arid Land Research, 2014, 31(1): 1-12
- [2] 陈曦, 罗格平, 吴世新, 等. 中亚干旱区土地利用与土地覆盖变化[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 21-25
CHEN X, LUO G P, WU S X, et al. Land Use/Cover Change in Arid Land of Central Asia[M]. Beijing: Science Press, 2015: 21-25
- [3] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 79-93
YANG S T, YU X Y, DING J L, et al. A review of water issues research in Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 79-93
- [4] 范彬彬, 罗格平, 胡增运, 等. 中亚土地资源开发与利用分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 928-937
FAN B B, LUO G P, HU Z Y, et al. Land resource development and utilization in Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(6): 928-937
- [5] LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 195-210
- [6] REN Y J, LÜ Y H, FU B J, et al. Driving factors of land change in China's Loess Plateau: Quantification using geographically weighted regression and management implications[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 453
- [7] SHEN G, YANG X C, JIN Y X, et al. Land use changes in the Zoige Plateau based on the object-oriented method and their effects on landscape patterns[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1): 14
- [8] NING J, LIU J Y, KUANG W H, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 547-562
- [9] GAO X Y, CHENG W M, WANG N, et al. Spatio-temporal distribution and transformation of cropland in geomorphologic regions of China during 1990-2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2): 180-196
- [10] 张丽, 杨国范, 刘吉平. 1986~2012 年抚顺市土地利用动态变化及热点分析[J]. 地理科学, 2014, 34(2): 185-191
ZHANG L, YANG G F, LIU J P. The dynamic changes and hot spots of land use in Fushun city from 1986 to 2012[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(2): 185-191
- [11] GAO C J, ZHOU P, JIA P, et al. Spatial driving forces of dominant land use/land cover transformations in the Dongjiang River watershed, Southern China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2016, 188(2): 84
- [12] CUI H, ZHOU X D, GUO M J, et al. Land use change and its effects on water quality in typical inland lake of arid area in China[J]. Journal of environmental biology, 2016, 37(4): 603-609
- [13] BATUNACUN, NENDEL C, HU Y F, et al. Land - use change and land degradation on the Mongolian Plateau from 1975 to 2015—A case study from Xilingol, China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(6): 1595-1606
- [14] 韩其飞, 罗格平, 白洁, 等. 基于多期数据集的中亚五国土地利用/覆盖变化分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 909-918
HAN Q F, LUO G P, BAI J, et al. Characteristics of land use and cover change in Central Asia in recent 30 years[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(6): 909-918
- [15] 阿里木江·卡斯木, 唐兵, 安瓦尔·买买提明. 基于遥感数据的中亚五国城市时空扩展变化研究[J]. 人文地理, 2012, 27(4): 83-87
ALIMUJIANG K, TANG B, ANWAER M. Study on spatio-temporal dynamics of urban expansion in five Central Asian cities based on remote sensing data[J]. Human Geography, 2012, 27(4): 83-87
- [16] 阮宏威, 于静洁. 1992—2015 年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1292-1304
RUAN H W, YU J J. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1292-1304

- [17] 吕晨, 蓝修婷, 孙威. 地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1385–1397
LYU C, LAN X T, SUN W. A study on the relationship between natural factors and population distribution in Beijing using geographical detector[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1385–1397
- [18] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116–134
- [19] JU H R, ZHANG Z X, ZUO L J, et al. Driving forces and their interactions of builtup land expansion based on the geographical detector—a case study of Beijing, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(11), 2188–2207
- [20] 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 966–975
ZHAN D S, ZHANG W Z, YU J H, et al. Analysis of influencing mechanism of residents'livability satisfaction in Beijing using geographical detector[J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 966–975
- [21] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J]. 生态学报, 2019(20): 1–11
PAN H Y, HUANG P, XU J. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min river based on geographical detector analyses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019(20): 1–11
- [22] 李佳泓, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 148–160
LI J M, LU D D, XU C D, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 148–160
- [23] 王正雄, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 1025–1039
WANG Z X, JIANG Y J, ZHANG Y Z, et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors[J]. Acta geographica sinica, 2019, 74(5): 1025–1039
- [24] CHEN X, BAI J, LI X Y, et al, et al. Change in land use/land cover and ecosystem services in Central Asia during 1990–2009[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(1): 116–127
- [25] ZHU X, WEI Z G, DONG W J, et al. Dynamical downscaling simulation and projection for mean and extreme temperature and precipitation over central Asia[J]. Climate Dynamics, 2020, 54(7–8): 3279–3306
- [26] 徐婷, 邵华, 张弛. 近 32a 中亚地区气温时空格局分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(01): 25–35
XU T, SHAO H, ZHANG C. Temporal pattern analysis of air temperature change in Central Asia during 1980–2011[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 25–35
- [27] GAO P, NIU X, WANG B, et al. Land use changes and its driving forces in hilly ecological restoration area based on gis and rs of northern china [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1–11
- [28] 秦富仓, 周佳宁, 刘佳, 等. 内蒙古多伦县土地利用动态变化及驱动力[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 31–37
QIN F C, ZHOU J N, LIU J, et al. Land use change dynamics and driving forces in Duolun County, Inner Mongolia[J]. Arid Land Resources and Environment, 016, 30(6): 31–37
- [29] 王莉红, 张军民. 基于地理探测器的绿洲城镇空间扩张驱动力分析——以新疆石河子市为例[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(4): 68–74
WANG L H, ZHANG J M. Driving force analysis of spatial expansion of oasis towns based on geographical detectors: take Shihezi city in Xinjiang as an example[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(4): 68–74
- [30] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1288–1300
XU C X, LU C X, HUANG S L. Study on ecological vulnerability and its influencing factors in Zhangjiakou area. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1288–1300
- [31] CAO F, GE Y, WANG J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment [J]. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(1): 78–92
- [32] 李均力, 陈曦, 包安明. 2003~2009 年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1219–1229.
LI J L, CHEN X, BAO A M. Spatial and temporal characteristics of lake water level changes in central Asia during 2003~2009[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1219–1229
- [33] LIU Y Q, LONG H L. 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
- [34] 赵锐锋, 王福红, 张丽华, 等. 黑河中游地区耕地景观演变及社会经济驱动力分析[J]. 地理科学, 2017, 37(6): 920–928

- ZHAO R F, WANG F H , ZHANG L H, et al. Dynamic of farmland landscape and its socioeconomic driving forces in the middle reaches of the Heihe river[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(6): 920–928
- [35] KANG C, ZHANG Y L, PAUDEL B, et al. Exploring the factors driving changes in farmland within the Tumen/ Tuman River Basin [J]. *International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9), 1–24
- [36] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(11): 1647–1657
- CHEN F H, HUANG W, JIN L Y, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming[J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 41(11): 1647–1657
- [37] TSENDBAZAR N E, DE BRUIN S, FRITZ S, et al. Spatial Accuracy Assessment and Integration of Global Land Cover Datasets[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7: 15804–15821
- [38] LI W, MACBEAN N, CIAIS P, et al. Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992-2015). *Earth System Science Data*, 2018, 10(1): 119–234

