

汉江流域耕地生产力变化趋势与持续性分析

胡砚霞¹ 王长青²¹

(1. 湖北大学区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;

2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430077)

【摘要】: 开展耕地生产力变化趋势研究对耕地占补平衡评估与耕地资源可持续利用具有重要意义。近 20 年来, 退耕还林(草)工程和城镇化对汉江流域耕地的分布与生产力产生了重大影响。基于 GoogleEarthEngine 云平台利用时间序列土地覆被与 MOD17A3NPP 数据集, 采用趋势分析、变异系数、Hurst 指数和 GIS 空间分析等方法对 2001~2019 年汉江流域耕地净初级生产力 (NPP) 的时空变化趋势、稳定性及持续性进行了分析, 并对汉江流域耕地生产力占补平衡状况及区域差异进行了探讨。结果表明: (1) 2001~2019 年汉江流域耕地 NPP 总体呈波动上升趋势, 2001~2010 年增长态势明显快于 2011~2019 年。(2) 汉江流域耕地 NPP 呈西高东低的分布格局, 79% 的耕地 NPP 值介于 400~600gC·m⁻²·a⁻¹, 集中分布在中上游河谷盆地; 耕地 NPP 呈显著增加的区域占全流域耕地的 53.20%, 主要位于中上游河谷盆地和南阳盆地, 呈显著减少的区域仅占 1.06%; 耕地 NPP 变化稳定的区域集中在上游河谷盆地以及下游荆门、应城等地, 不稳定区域主要位于十堰郧阳区、襄阳以及下游汉川、天门、武汉等地的城镇扩张区; 流域耕地 NPP 未来将处于持续增加的趋势。(3) 2001~2019 年汉江流域转入耕地占全流域耕地的 0.56%, 转出耕地占 4.70%, 转入耕地明显少于转出耕地, 汉江流域及其三级流域耕地生产力均呈较显著的占补负平衡, 且以唐白河流域最为突出。

【关键词】: 汉江流域 退耕还林 耕地生产力 趋势分析 占补平衡

【中图分类号】: F323.21 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1249-13

气候变化和人类活动影响下耕地占补平衡是实现土地退化零增长(联合国 2030 年可持续发展目标 SDG15.3.1)的关键环节^[1]。耕地生产力变化趋势分析是耕地占补平衡与持续性评估的基础, 有助于揭示农田生态系统对气候变化与人类活动的响应机制^[2], 对保障粮食安全和社会生态可持续发展、实现土地退化零增长目标具有重大意义。

汉江流域农业发展较早, 流域内江汉平原、汉中盆地是我国重要的农业区和商品粮基地^[3,4]。随着南水北调中线工程的推进, 丹江口大坝加高使库区河谷平原耕地损失严重^[5]。近 20 年来, 受退耕还林(草)工程、城镇化及耕地开垦等土地利用变化的影响, 汉江流域耕地在面积、分布和质量上均发生了较大变化, 耕地生产力的稳定性、持续性受到较大扰动^[6]。客观评估上述土地利用变化导致的流域耕地生产力变化, 建立耕地生产力时空变化特征快速评估体系, 对耕地生产力可能出现的收益与损失进行合理测算, 有利于评估流域耕地生产力占补平衡状况, 进而实现流域耕地资源的可持续利用^[7,8,9,10,11,12], 促进流域社会经济与生态环境和谐有序发展。

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质总量, 是光

作者简介: 胡砚霞(1987~), 女, 讲师, 主要研究方向为生态环境遥感监测。E-mail: yanxiahu@hubu.edu.cn; 王长青 E-mail: whiggssdkd@apm.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42174103); 中德合作交流项目(42061134010); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA15017700, XDB23030100)

合作用产生的有机质总量扣除自养呼吸消耗后剩余的部分。NPP 常作为表征植被变化和评价生态管理措施效果的一项重要指标^[13],也是衡量耕地生产力变化与可持续发展的重要因子^[14]。研究表明, NPP 可有效反映植被生产力状况,对气候变化和人类活动的敏感性高于 NDVI 等植被指数^[2,13]。随着遥感技术的发展,覆盖范围广、高时空分辨率的 NPP 获取方法已成为植被生产力时空特征及其驱动机制研究的重要手段。MOD17A3 是目前最常用的 NPP 数据产品,该数据集基于 MODISTerra 卫星遥感参数利用 Biome-BGC 模型与光能利用率模型计算得出全球陆地植被净初级生产力(NPP)^[15]。MOD17A3 数据已广泛用于植被生产力时空特征评估^[16,17,18,19,20],相关结果证实该数据能有效表征陆地生态系统生产力状况,且精度可靠^[17,21,22]。

国内学者围绕汉江流域植被覆盖及生产力动态变化开展了大量研究,主要集中在森林植被对水环境的影响^[23]、退耕恢复过程中的植被演替^[24]、植被覆盖/生产力变化与气候因子的关系^[25,26,27,28]、植被变化的水文效应^[29]及其对土壤侵蚀的影响^[30]等方面。总体上,前人研究主要侧重于流域植被生产力变化与气象因子的关系探究,较少关注耕地生产力的变化,缺乏人类活动影响下汉江流域耕地生产力的时空动态、稳定性及持续性方面的研究。生态退耕和城镇化主导下耕地转移如何影响了流域耕地生产力?被占用耕地的生产力与新增耕地的生产力能否达到占补平衡?各区域间有何差异?这些问题尚不明确,需要结合相关数据与方法进行定量分析与评价。

本研究基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)云平台调用 2001~2019 年间高精度时间序列土地覆被数据集和 NPP 数据集等,利用 GEE 平台在数据获取便利、运算效率高等方面的优势,分析近 20 年来汉江流域耕地 NPP 时空变化趋势、稳定性及持续性特征,评估土地利用变化尤其是退耕还林(草)、城镇用地侵占农田、林地开垦为耕地等几种最显著的变化对汉江流域耕地 NPP 的影响,明晰流域耕地生产力占补平衡状况的区域差异,揭示汉江流域退耕还林(草)政策和城镇化进程带来的土地利用变化对耕地 NPP 时空格局的影响。研究结果可为汉江流域耕地保护政策与治理措施制定、水源地社会生态可持续发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

汉江发源于陕西省境秦岭南麓,干流流经陕西、湖北两省,于汉口龙王庙处汇入长江。汉江是长江最大的支流,全长 1577km,流域面积约 $15.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,经纬度范围为 $106^\circ 15' \text{ E} \sim 114^\circ 20' \text{ E}$ 、 $30^\circ 10' \text{ N} \sim 34^\circ 20' \text{ N}$ 。地势西高东低,西部为中低山区,东部为丘陵平原。气候属亚热带季风气候,温和湿润,年均降水量 894mm,水量较丰沛,但年内分配不均,主要集中于 5~10 月^[31]。汉江流域以丹江口、钟祥碾盘山为界可分为上游、中游和下游三级流域:丹江口以上流域、唐白河流域和丹江口以下干流流域。图 1 示意汉江流域地理概况。

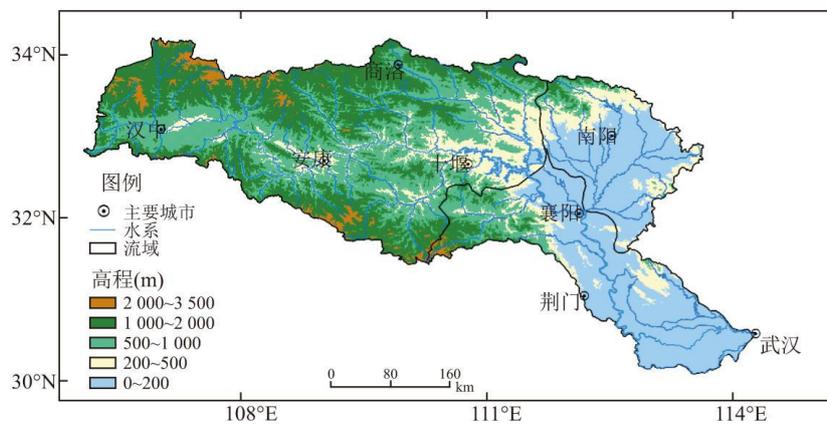


图 1 汉江流域地理概况

汉江流域耕地约占土地总面积的 30%~40%，中下游耕地资源丰富，上游以坡耕地为主^[32]。流域水田、旱地比约为 1:3，水田主要沿汉水水系两岸分布，集中于汉中盆地、汉阴—安康走廊、郧县盆地和南阳盆地西部 4 大片；旱地主要分布于河滩阶地、低山丘陵和山间盆地等区域。粮食生产以稻米、小麦为主，基本为一年稻麦两熟；经济作物主要为棉花、油料作物、麻类、烤烟和桐油等^[3, 4, 33]。

1.2 数据来源与预处理

土地利用/覆被数据采用欧洲航天局气候变化倡议 ESACCI (European Space Agency Climate Change Initiative) 土地覆被数据集 (<http://www.esa-landcover-cci.org/>)，并按联合国防治荒漠化公约 UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification) 的方案将覆盖汉江流域的 32 种土地覆被类型重分类为 6 类：林地、草地、耕地、湿地、建设用地和水体，时间序列为 2001~2019 年，空间分辨率 250m。ESACCI 土地覆被数据集基于 ENVISATMERIS 和 SPOTVGT 影像制作^[34]，常作为基础数据源跟踪土地退化零增长目标 (SDG15.3.1) 的进展，其耕地精度介于 68%~86%^[35]。

NPP 数据来自 NASA 提供的年度净初级生产力产品 MOD17A3HGFV6 数据集 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgfV006/>)，时间序列为 2001~2019 年，空间分辨率 500m，转换系数 0.0001。MOD17A3HGFV6 产品年度 NPP 由给定年份所有 8 天净光合作用 (Photosynthesis, PSN) 产品 MOD17A2H 合成，其中 PSN 是总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 和维持呼吸 (Maintenance Respiration, MR) 的差值。相较于 MOD17A3V5.5，MOD17A3HGFV6 采用了新的生物属性查找表 (BiomePropertylookup-tables, BPLUT) 和更新版本的全球模拟和同化办公室 (Global Modeling and Assimilation Office, GMAO) 逐日气象数据，NPP 估算精度得到提升^[36]。

上述数据产品的存储格式、空间分辨率、投影方式等均不一致，为了节省人力与硬件资源，本研究基于 JavaScript 编程在 GEE 云平台实现遥感数据的调用、投影转换、重采样、裁剪以及相关预处理与计算。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析

对汉江流域 2001、2019 年土地利用/覆被数据进行空间叠加分析，获取 2001~2019 年土地利用转移矩阵，并提取转出耕地、转入耕地、未变化耕地像元的空间分布。

1.3.2 趋势分析与显著性检验

采用 Theil-Sen 趋势分析法^[37]与 Mann-Kendall 统计检验法^[38]分析汉江流域耕地 NPP 的变化趋势，并对其显著性进行检验。Theil-Sen 趋势分析法的优点是样本无需服从特定分布，且不受异常值干扰，已广泛用于时间序列数据的变化趋势分析。Mann-Kendall 检验是一种非参数检验法，适用于非正态分布数据的检验。Theil-Sen 趋势度 (ρ) 的计算公式为：

$$\rho = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中： ρ 为耕地 NPP 的变化趋势；median 为中位数函数；i、j 为时间序数； x_i 、 x_j 分别为第 i、j 年的耕地 NPP。当 $\rho > 0$ 时，表明耕地 NPP 呈增加趋势；当 $\rho < 0$ 时，表明耕地 NPP 呈减少趋势；当 $\rho = 0$ 时，表明趋势不明显。此外，根据 Mann-Kendall 检验结果将耕地 NPP 变化趋势分为 5 个等级：极显著增加 ($\rho > 0, p < 0.01$)、显著增加 ($\rho > 0, 0.01 < p < 0.05$)、无显著变化 ($p > 0.05$)、

显著减少 ($\rho < 0, 0.01 < p < 0.05$) 和极显著减少 ($\rho < 0, p < 0.01$)。

1.3.3 稳定性分析

采用变异系数 C_v 反映耕地 NPP 的相对波动程度，并以此分析汉江流域耕地 NPP 时间序列的稳定性。 C_v 的计算公式如下：

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (NPP_i - \overline{NPP})^2} / \overline{NPP} \quad (2)$$

式中： C_v 为变异系数； NPP_i 表示第 i 年耕地 NPP； \overline{NPP} 为多年 NPP 平均值。 C_v 值越大，耕地 NPP 受到干扰的强度越大，不稳定性越高； C_v 值越小，耕地 NPP 波动小，稳定性较好。

1.3.4 持续性分析

本研究采用 Hurst 指数分析汉江流域耕地 NPP 时间序列的持续性，并预测其未来变化趋势。基于重标极差 (R/S) 分析方法的 Hurst 指数是定量描述时间序列数据持续性特征的有效方法。Hurst 指数最早由英国水文学家 Hurst^[39] 提出，后经 Mandelbrot 等^[40] 进行修正和完善，目前已广泛应用于气象、水文、地质等领域，其计算过程可参考相关研究^[41, 42]，基本原理如下：

给定一时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \dots, n$, 定义均值序列：

$$\begin{aligned} \langle \xi \rangle_\tau &= \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \\ \tau &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

计算累积离差：

$$\begin{aligned} X(t, \tau) &= \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \\ 1 \leq t \leq \tau \end{aligned} \quad (4)$$

极差序列定义为：

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \\ \tau &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

标准差序列计算公式为：

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\tau = 1, 2, \dots, n$$

若存在 $R/S \propto \tau^H$, 则说明时间序列 $\{\xi(t)\}, t=1, 2, \dots, n$ 存在 Hurst 现象, H 值称为 Hurst 指数, 其值可用最小二乘法回归求出。Hurst 指数 (H) 介于 0~1, 一般存在以下 3 种情况:

- (1) 当 $H=0.5$, 表示序列是一个标准的高斯分布, 不具有持续性, 其未来变化趋势与过去无关;
- (2) 当 $0.5 < H < 1$, 表示时间序列具有持续性, 耕地 NPP 未来变化趋势与过去趋势一致。H 越接近于 1, 持续性越强;
- (3) 当 $0 < H < 0.5$, 表示时间序列具有反持续性, 耕地 NPP 未来变化趋势与过去相反。H 越接近于 0, 反持续性越强。

1.3.5 耕地生产力占补平衡分析

为评估 2001~2019 年汉江流域耕地转移导致的耕地生产力总量变化, 本研究采用占补平衡指数 (PBI) 衡量某区域新增的耕地生产力是否能够弥补被占用的耕地生产力^[43]。PBI 的计算公式如下:

$$PBI = (P_{in} - P_{out}) \times 100 / (P_{in} + P_{out}) \quad (7)$$

式中: P_{in} 为转入耕地 NPP 总量的变化, P_{out} 为转出耕地 NPP 总量的变化。PBI 指数介于 -100~100, 当 $PBI > 50$ 或 $PBI < -50$ 时, 表明耕地生产力呈较显著的占补失衡。耕地 NPP 总量变化 (ΔP) 可根据单位面积耕地 NPP 变化 (ΔNPP) 与耕地面积变化 (ΔA) 计算: $\Delta P = \Delta NPP \cdot \Delta A$ 。式中, P 是耕地 NPP 总量, NPP 表示单位面积耕地 NPP, A 为耕地面积。

2 结果与分析

2.1 2001~2019 年汉江流域耕地变化

近 20 年汉江流域土地利用类型以林地、耕地为主, 分别占流域面积的 53.63% 和 40.57% (图 2a、图 2b 和表 1)。与 2001 年相比, 2019 年耕地与草地面积占全流域的比例分别下降了 1.72% 和 1.26%; 而林地、建设用地和水体面积全流域占比分别增加了 1.90%、0.97% 和 0.09%。总体上, 2001~2019 年汉江流域土地利用变化以耕地→林地 (1441km²)、耕地→建设用地 (1402km²)、草地→林地 (1876km²) 和林地→耕地 (282km²) 为主 (表 1), 耕地变化以退耕还林、耕地城镇化为主。

2001~2019 年, 汉江流域转出耕地 2985km² (占 2001 年全流域耕地的 4.70%), 转入耕地 354km² (占 2001 年全流域耕地的 0.56%), 转出耕地明显多于转入耕地, 另有 60607km² 耕地的类型未发生变化 (表 2)。退耕还林、耕地城镇化面积分别为 1441 和 1402km², 分别占 2001 年全流域耕地的 2.27% 和 2.21%, 二者共占转出耕地的 95.24%。其中, 退耕还林主要分布于丹江口以上流域, 以汉江上游最为集中, 尤其是汉中以南、安康以北, 还包括十堰西部、丹江口水库周边地区; 耕地城镇化主要发生在城市周边 (图 2c)。

从三级流域来看, 丹江口以上流域、唐白河流域和丹江口以下干流流域的耕地面积分别占全流域的 32%、31% 和 37%, 三级流域耕地面积差别不大, 但三级流域内耕地比重差别较大, 丹江口以上流域、唐白河流域和丹江口以下干流流域内耕地比重分别为

22%、81%和 64%(图 2 和表 2)。丹江口以上流域退耕还林、耕地城镇化面积约为 1215 和 358km², 分别占 2001 年该区耕地面积的 6.04%和 1.78%;唐白河以上流域退耕还林、耕地城镇化面积约为 75 和 488km², 分别占 2001 年该区耕地面积的 0.38%和 2.47%;丹江口以下干河流域退耕还林、耕地城镇化面积约为 151 和 556km², 分别占 2001 年该区耕地面积的 0.64%和 2.35%(图 2 和表 2)。

2.2 耕地 NPP 年际变化特征

从空间分布上看, 汉江流域耕地 NPP 的分布具有明显的空间异质性, 大体呈西高东低的分布格局(图 3a)。耕地 NPP 大于 700gC·m⁻²·a⁻¹的区域占全流域耕地面积的 2%, 零星分布于陕西省佛坪、宁陕和镇坪, 以及湖北省竹溪和房县; 耕地 NPP 值介于 600~700gC·m⁻²·a⁻¹的区域占全流域耕地面积的 10%, 主要分布在陕西省宁强、紫阳、镇安和山阳, 以及湖北省竹山和郧西; 耕地 NPP 值介于 400~600gC·m⁻²·a⁻¹的区域集中分布于中上游河谷盆地, 所占比例较大, 达全流域耕地面积的 79%;耕地 NPP 值小于 400gC·m⁻²·a⁻¹的区域占全流域耕地面积的 9%, 主要分布于南阳盆地、中下游汉江河道附近(图 3a)。从三级流域来看, 汉江流域耕地 NPP 分布具有明显的地域分异, 丹江口以上流域耕地 NPP 平均值最高(558gC·m⁻²·a⁻¹), 丹江口以下干河流域耕地 NPP 平均值次之(453gC·m⁻²·a⁻¹), 唐白河流域耕地 NPP 平均值最低(435gC·m⁻²·a⁻¹)。

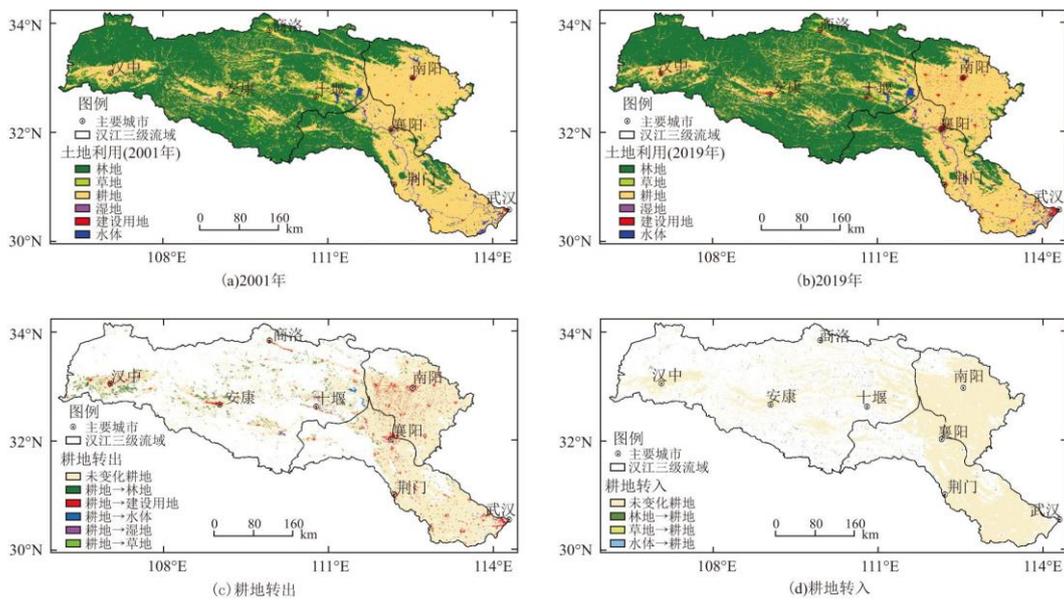


图 2 2001, 2019 年汉江流域土地利用和 2001~2019 年耕地转出、耕地转入的空间分布

表 1 2001~2019 年汉江流域土地利用转移矩阵(km²)

		2019 年						总计
		林地	草地	耕地	湿地	建设用地	水体	
2001 年	林地	80395	120	282	0	5	0	80803
	草地	1876	4226	65	24	69	36	6296
	耕地	1441	4	60558	30	1402	110	63545
	湿地	0	1	0	272	15	8	296

	建设用地	0	0	0	0	597	0	597
	水体	1	5	3	8	4	1832	1854
总计		83714	4357	60908	334	2092	1986	153391

表 2 汉江三级流域退耕还林、耕地城镇化所占面积(km²)及占该区面积比例(%)

三级流域	耕地(2001年)	退耕还林(2001~2019年)	耕地城镇化(2001~2019年)
丹江口以上流域	20129	1215(6.04%)	358(1.78%)
唐白河流域	19745	75(0.38%)	488(2.47%)
丹江口以下干流流域	23671	151(0.64%)	556(2.35%)

从时间变化上看, 2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 年际变化总体上呈波动上升趋势, 线性增长趋势达到显著性水平 ($P < 0.01$), 平均变化率为 $4.21\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中, 2001~2010 年间增长趋势较明显 ($P < 0.01$), 平均变化率为 $10.26\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 2011~2019 年间增长趋势不显著 ($P > 0.5$), 平均变化率为 $2.73\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3b)。2001~2019 年间, 汉江流域耕地年均 NPP 介于 $381 \sim 556\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 多年平均值为 $486\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最高值出现在 2015 年, 最低值出现在 2001 年。从三级流域来看, 2001~2019 年间上游(丹江口以上流域)耕地 NPP 增长率快于全流域平均水平 ($4.21\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 中游、下游(唐白河流域、丹江口以下干流流域)慢于全流域平均水平, 其中, 上游、中游和下游流域耕地 NPP 平均增速分别为 5.79 、 4.06 和 $2.75\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3c)。

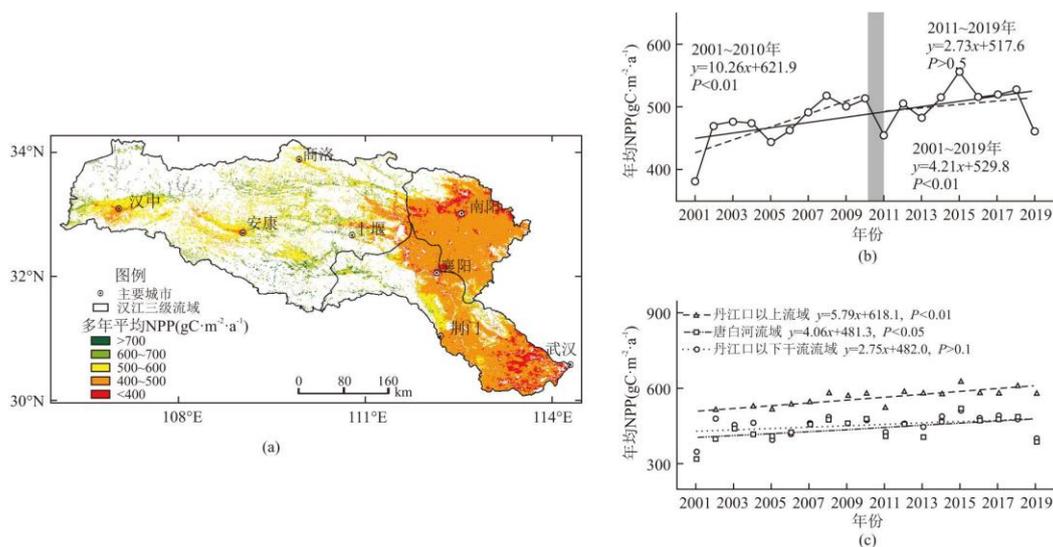


图 3 2001~2019 年间汉江流域多年平均耕地 NPP 的空间分布(a)、年际变化趋势(b)以及三级流域耕地 NPP 年际变化趋势(c)

2.3 耕地 NPP 变化趋势分析

2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 的 Theil-Sen 趋势度(ρ)介于 $1.40 \sim 7.01\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。耕地 NPP 呈增加趋势的区域

($\rho > 0$) 占全流域耕地面积的 91.05%, 呈减少趋势的区域 ($\rho < 0$) 占全流域耕地面积的 8.95%。其中, 耕地 NPP 增加较快的区域 ($\rho > 5$) 主要分布在南阳盆地, 以及汉中盆地、安康盆地等区域; 耕地 NPP 减少较快的地区 ($\rho < -5$) 占全流域耕地面积比例较小, 零星分布于襄阳、郧县、安康等地城区(图 4a)。

对耕地 NPP 的变化趋势进行 Mann-Kendall 显著性检验, 共分为 5 个显著性等级, 具体如图 4b 所示。耕地 NPP 呈极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 增加的区域分别占全流域耕地面积的 35.39% 和 17.81%, 主要分布于中上游河谷盆地和南阳盆地; 耕地 NPP 呈极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 减少的区域占全流域耕地面积比例较小 (1.06%); 大部分区域耕地 NPP 变化趋势不显著, 占全流域耕地面积的 45.73%。

2.4 耕地 NPP 稳定性分析

计算 2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 的变异系数, 根据变异值划分为 5 个波动等级: 低波动状态 ($C_v \leq 0.05$)、较低波动状态 ($0.05 < C_v \leq 0.10$)、中等波动状态 ($0.10 < C_v \leq 0.15$)、较高波动状态 ($0.15 < C_v \leq 0.20$) 和高波动状态 ($C_v > 0.20$), 并对全流域耕地 NPP 时间序列的稳定性特征进行分析。

2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 的变异系数较大, 其值介于 0.03~0.72。耕地 NPP 变化稳定的区域 ($C_v \leq 0.10$) 占全流域耕地面积的 36.52%, 不稳定区域 ($C_v > 0.10$) 占 63.48%。耕地 NPP 变化呈低波动及较低波动状态的区域分别占全流域耕地面积的 0.99% 和 35.53%, 主要位于上游河谷盆地, 以及下游荆门、应城等地, 表明该部分区域耕地 NPP 较稳定; 耕地 NPP 变化呈中等波动状态的区域面积较大, 占全流域耕地面积的 57.95%, 集中分布于唐白河流域以及下游部分区域; 耕地 NPP 变化呈较高波动状态及高波动状态的区域分别占全流域耕地面积的 4.66% 和 0.87%, 主要分布在十堰郧阳区、襄阳, 以及下游汉川、天门、武汉等地建设用地区域(图 5)。

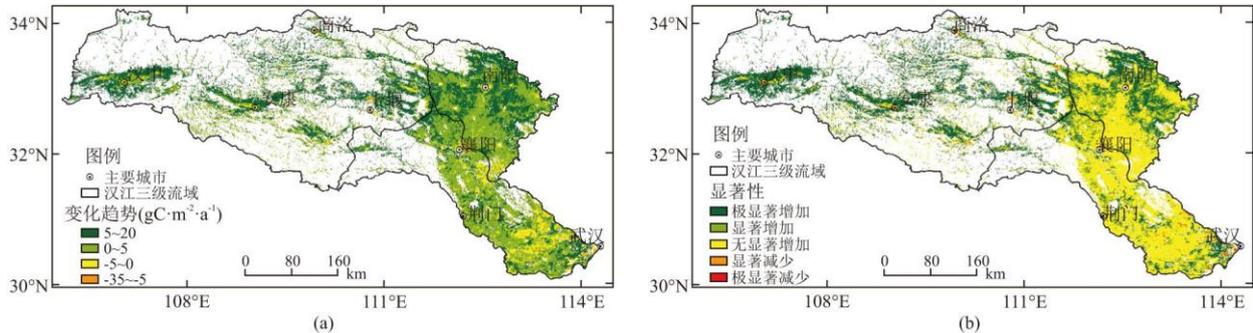


图 4 2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 变化趋势及显著性水平

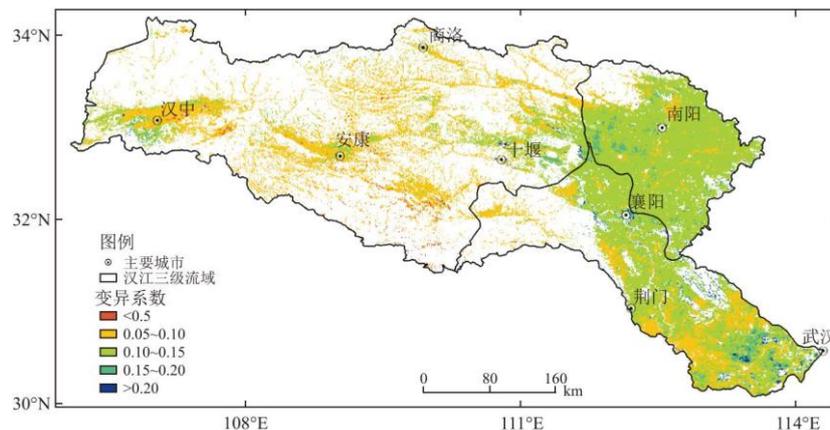


图 5 2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 的变异程度

2.5 耕地 NPP 持续性分析

汉江流域耕地 NPP 的 Hurst 指数范围介于 0.29~0.74 之间, 平均值为 0.59。耕地 NPP 持续性序列($0.5 < H < 1$) 占全流域耕地面积的 90.75%, 表明汉江流域大部分地区耕地 NPP 未来变化趋势与过去一致; 耕地 NPP 反持续性序列($0 < H < 0.5$) 仅占全流域耕地面积的 9.25%, 主要集中于丹江口以下干流流域部分地区(图 6)。

将 2001~2019 年间 NPP 变化趋势图与 Hurst 指数分布图进行空间叠加分析, 获得汉江流域耕地 NPP 变化趋势与持续模式的耦合图(图 7)。耕地 NPP 持续性序列中, 呈显著增加和极显著增加的地区占全流域耕地面积的 53.27%, 集中分布在上游河谷盆地, 以及南阳盆地、下游部分区域; 呈显著减少和极显著减少的地区占全流域耕地面积的 1.07%, 零星分布于十堰郧阳区、襄阳, 以及下游的应城、天门等地。耕地 NPP 反持续性序列中, 呈显著减少和极显著减少的区域占全流域耕地面积比例极小(小于 0.01%); 呈显著增加和极显著增加的区域占全流域耕地面积的 0.19%, 主要分布于老河口、邓州和郧西等地。

总体上, 汉江流域耕地 NPP 未来持续呈显著增加的序列明显多于持续呈显著减少(或反持续呈显著增加)的序列, 预示汉江流域耕地 NPP 未来将处于持续增加的趋势。

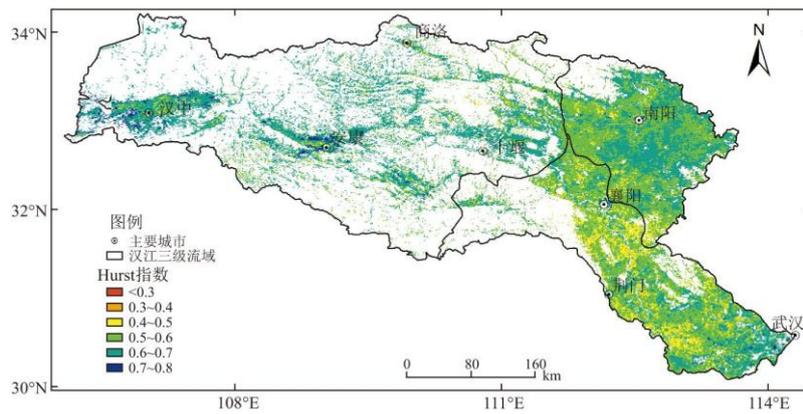


图 6 2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 的 Hurst 指数分布

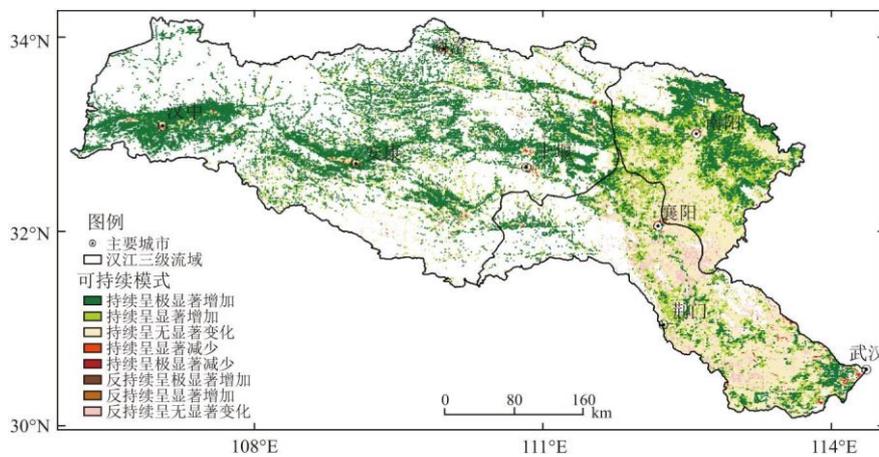


图 7 2001~2019 年间汉江流域耕地 NPP 持续模式的空间分布

2.6 耕地生产力占补平衡分析

利用 GIS 空间分析方法对不同耕地变化类型的 NPP 值进行分区统计, 得到 2001~2019 年汉江流域转出耕地、转入耕地、未变化耕地以及全流域耕地像元的平均 NPP, 并探讨退耕还林(草)工程与城镇化对汉江流域耕地 NPP 变化的影响。结果显示, 2001~2019 年, 转入耕地像元的平均 NPP 最高(中值 $577\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 转出耕地像元的平均 NPP(中值 $490\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)略低于未变化耕地像元(中值 $491\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和全流域耕地像元(中值 $492\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) (图 8)。转入耕地像元主要来源于林地, 生产力水平较高; 转出耕地像元多由新增林草地构成, 年龄较小, 生产力水平较低。

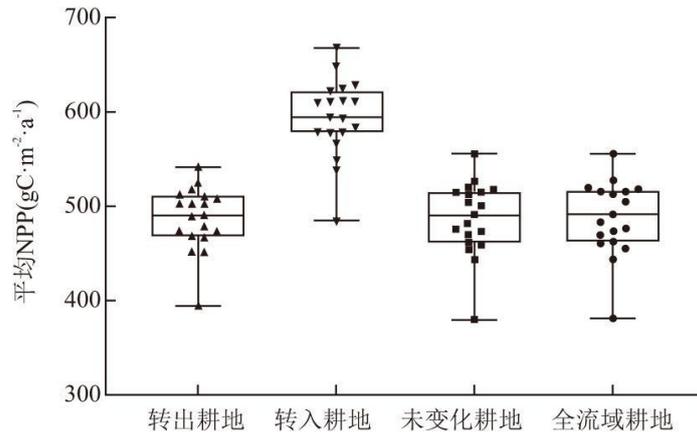


图 8 2001~2019 年汉江流域平均 NPP 在转出耕地区、转入耕地区、未变化耕地区和全流域耕地区的差异

从耕地生产力占补平衡状况上看, 汉江流域耕地转为其他用地损失的生产力近 70%发生在汉中、安康、勉县和十堰郧阳区等地的城镇扩张区, 以及南阳、十堰、襄阳和武汉等地的市辖区; 由于新增耕地提高的生产力 60%以上源于南漳、竹溪、平利、留坝、商南、西峡、镇安、山阳等地的林地。计算结果显示, 汉江全流域耕地生产力占补平衡指数为-67.0, 丹江口以上流域、唐白河流域、丹江口以下干流域占补平衡指数分别为-64.2、-87.5和-65.9, 表明唐白河流域耕地占补失衡最突出(图 9)。尽管转入耕地像元的平均 NPP 值高于转出耕地像元, 但由于耕地 NPP 总量变化与耕地 NPP 变化及其面积变化相关, 且转入耕地明显少于转出耕地, 汉江流域及其三级流域耕地生产力均呈较显著的占补负平衡, 且以唐白河流域最为突出。

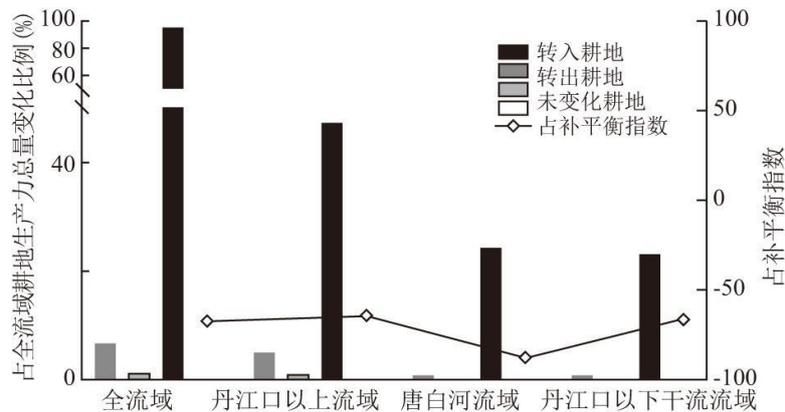


图 9 2001~2019 年汉江流域及其三级流域不同耕地变化类型生产力总量变化占全流域耕地生产力总量变化比例和占补平衡指数的差异

将耕地变化类型图与持续模式图进行叠加分析,统计不同耕地变化类型的持续性特征。结果发现,转出耕地中,1514.75km²的区域NPP未来将持续呈显著增加态势,占全流域耕地的2.39%,另有203.10km²的区域NPP未来将持续呈显著减少态势,占全流域耕地的0.32%;转入耕地中,221.95km²的耕地NPP未来将持续呈显著增加态势,占全流域耕地的0.35%,3.23km²的耕地NPP未来将持续呈显著减少态势,占流域耕地比例不足0.01%;未变化耕地中,30988.13km²的耕地NPP未来将持续呈显著增加态势,占全流域耕地的48.94%,另有566.73km²的耕地NPP未来将持续呈显著减少态势,占全流域耕地的0.89%(表3)。总体上,三类耕地变化类型区域,未来均以持续呈显著增加的特征为主,转入耕地NPP呈持续性的比例少于转出耕地,但由于未变化耕地比例最高,且大部分未变化耕地NPP将持续呈显著增加态势,汉江流域耕地NPP未来仍处于持续增加的趋势。

3 结论与讨论

本文基于GEE云平台利用时间序列土地覆被数据与MOD17A3NPP数据,采用Theil-Sen趋势分析、Mann-Kendall统计检验、变异系数、Hurst指数和占补平衡分析等方法,对2001~2019年间汉江流域耕地净初级生产力的时空变化趋势、稳定性及持续性特征进行了量化分析,并对流域耕地生产力占补平衡状况进行了评价。研究结果表明:

(1)时间尺度上,2001~2019年间,汉江流域耕地NPP总体上呈波动上升趋势,多年平均值为486gC·m⁻²·a⁻¹,最高值出现在2015年,最低值出现在2001年,且2001~2010年间耕地NPP增长态势明显快于2011~2019年间;丹江口以上流域耕地NPP增长率快于全流域平均水平,唐白河流域和丹江口以下干流域耕地NPP增长率慢于全流域平均水平。

(2)空间尺度上,汉江流域耕地NPP呈西高东低的分布格局,其中79%的耕地NPP值介于400~600gC·m⁻²·a⁻¹,集中分布于中上游河谷盆地;丹江口以上流域耕地NPP均值最高,丹江口以下干流域次之,唐白河流域最低;汉江流域耕地NPP呈显著增加的区域占全流域耕地面积的53.20%,呈显著减少的区域占1.06%,45.73%的区域耕地NPP变化趋势不显著;从空间波动性上看,汉江流域耕地NPP变化稳定的区域占全流域耕地面积的36.52%,不稳定区域占63.48%;从持续性上看,汉江流域耕地NPP未来将处于持续增加的趋势。

(3)2001~2019年,汉江流域耕地变化以退耕还林和城镇化为主要,转出耕地占全流域耕地的4.70%,转入耕地占0.56%。丹江口以上流域退耕还林比例较高,占该区耕地的6.04%;唐白河流域、丹江口以下干流域耕地城镇化比例较高,分别占区域耕地的2.47%和2.35%。从占补平衡状况上看,汉江流域及其三级流域耕地生产力均呈较显著的占补平衡,且以唐白河流域最为突出。

表3 汉江流域不同耕地变化类型NPP持续性特征统计

变化类型	Hurst 指数	趋势及显著性	持续性类型	面积 (km ²)	比例 (%)
转出耕地	0.5<H<1	$\rho > 0; P < 0.01$	持续呈极显著增加	1199.79	1.89
	0.5<H<1	$\rho > 0; 0.01 < P < 0.05$	持续呈显著增加	314.96	0.50
	0.5<H<1	$P > 0.05$	持续呈无显著变化	870.09	1.37
	0.5<H<1	$\rho < 0; 0.01 < P < 0.05$	持续呈显著减少	78.86	0.12
	0.5<H<1	$\rho < 0; P < 0.01$	持续呈极显著减少	119.09	0.19
	0<H<0.5	$\rho > 0; 0.01 < P < 0.05$	反持续呈显著增加	5.15	0.01
	0<H<0.5	$P > 0.05$	反持续呈无显著变化	244.31	0.39

转入耕地	0.5<H<1	$\rho > 0; P < 0.01$	持续呈极显著增加	149.30	0.24
	0.5<H<1	$\rho > 0; 0.01 < P < 0.05$	持续呈显著增加	72.65	0.11
	0.5<H<1	$P > 0.05$	持续呈无显著变化	89.80	0.14
	0.5<H<1	$\rho < 0; 0.01 < P < 0.05$	持续呈显著减少	1.39	0.00
	0.5<H<1	$\rho < 0; P < 0.01$	持续呈极显著减少	0.52	0.00
	0<H<0.5	$\rho > 0; 0.01 < P < 0.05$	反持续呈显著增加	1.32	0.00
	0<H<0.5	$P > 0.05$	反持续呈无显著变化	52.27	0.08
未变化耕地	0.5<H<1	$\rho > 0; P < 0.01$	持续呈极显著增加	20150.20	31.82
	0.5<H<1	$\rho > 0; 0.01 < P < 0.05$	持续呈显著增加	10837.80	17.12
	0.5<H<1	$P > 0.05$	持续呈无显著变化	22981.40	36.29
	0.5<H<1	$\rho < 0; 0.01 < P < 0.05$	持续呈显著减少	272.23	0.43
	0.5<H<1	$\rho < 0; P < 0.01$	持续呈极显著减少	180.13	0.28
	0<H<0.5	$\rho > 0; P < 0.01$	反持续呈极显著增加	1.52	0.00
	0<H<0.5	$\rho > 0; 0.01 < P < 0.05$	反持续呈显著增加	112.85	0.18
	0<H<0.5	$P > 0.05$	反持续呈无显著变化	5587.46	8.82
	0<H<0.5	$\rho < 0; 0.01 < P < 0.05$	反持续呈显著减少	0.13	0.00

耕地生产力占补平衡实质上是异地占补平衡，耕地开垦虽然在一定程度上弥补了耕地面积与生产力的损失，但汉江流域新增耕地(转入耕地)比重较少，耕地生产力呈占补失衡状态。近20年来，随着流域经济快速发展、人口增加和城镇化等因素导致的建设用地需求增加，以及生态建设工程的实施，流域耕地生产力占补平衡难以达成。尽管2001~2019年汉江流域未变化耕地NPP呈增加的趋势，且其中约49%未来将持续呈显著增加态势，很大程度上抵消了变化耕地生产力占补负平衡状态，但仍存在一定的生态风险，应进一步开展转出耕地、转入耕地的质量变化监测与分析，加强对现有耕地的保护，严守耕地红线，建设高产农田，并密切关注耕地生产力变化对流域粮食安全及耕地可持续利用的影响。

参考文献:

- [1]王梦婧, 吕悦风, 吴次芳. 土地退化中性研究的国际进展及其中国路径[J]. 中国土地科学, 2020, 34(2):64-74.
- [2]尤南山, 董金玮, 肖桐, 等. 退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J]. 地理科学, 2020, 40(2):315-323.
- [3]沈泽昊, 张全发, 岳超, 等. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆被的空间格局[J]. 地理学报, 2006, 61(6):633-644.
- [4]蔡述明, 陈国阶, 杜耘, 等. 汉江流域可持续发展的思考[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4):411-418.

-
- [5]李仁东,李劲峰,黄进良,等.南水北调对湖北丹江口水库区土地资源的影响[J].长江流域资源与环境,1998,7(2):14-19.
- [6]潘佩佩,杨桂山,苏伟忠.土地利用变化对土地生产力的影响研究进展[J].地理科学进展,2012,31(5):539-550.
- [7]唐健,陈志刚,赵小风,等.论中国的耕地保护与粮食安全——与茅于軾先生商榷[J].中国土地科学,2009,23(3):4-10.
- [8]马永欢,牛文元.基于粮食安全的中国粮食需求预测与耕地资源配置研究[J].中国软科学,2009(3):11-16.
- [9]刘彦随,乔陆印.中国新型城镇化背景下耕地保护制度与政策创新[J].经济地理,2014,34(4):1-6.
- [10]陈昌玲,张全景,吕晓,等.江苏省耕地占补过程的时空特征及驱动机理[J].经济地理,2016,36(4):155-163.
- [11]郑亚楠,张凤荣,谢臻,等.中国粮食生产时空演变规律与耕地可持续利用研究[J].世界地理研究,2019,28(6):120-131.
- [12]梁流涛,唐林昊,李士超,等.基于生态网络架构的虚拟耕地流动格局及其稳定性评价[J].经济地理,2020,40(1):140-149.
- [13]张颖,章超斌,王钊齐,等.气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究[J].草业学报,2017,26(5):1-14.
- [14]STEFFEN W, NOBLE I, CANADELL J, et al. The Terrestrial Carbon Cycle: Implications for the Kyoto Protocol[J]. Science, 1998, 280:1393-1394.
- [15]TURNER D P, RITTS W D, COHEN W B, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3-4):282-292.
- [16]国志兴,王宗明,刘殿伟,等.基于MOD17A3数据集的三江平原低产农田影响因素分析[J].农业工程学报,2009,25(2):152-155.
- [17]乔旭宁,王林峰,牛海鹏,等.基于NPP数据的河南省淮河流域生态经济协调性分析[J].经济地理,2016,36(7):173-181.
- [18]王轶虹,史学正,王美艳,等.2001-2010年中国农田生态系统NPP的时空演变特征[J].土壤学报,2017,54(2):319-330.
- [19]王钊,李登科.2000-2015年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].应用生态学报,2018,29(6):1876-1884.
- [20]刘世梁,孙永秀,赵海迪,等.基于多源数据的三江源区生态工程建设前后草地动态变化及驱动因素研究[J].生态学报,2021,41(10):3865-3877.
- [21]李登科,王钊.基于MOD17A3的中国陆地植被NPP变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.
- [22]刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):

5306-5317.

- [23] 卜红梅, 党海山, 张全发. 汉江上游金水河流域森林植被对水环境的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1341-1348.
- [24] 王星, 李占斌, 李鹏. 陕西省丹江流域退耕地恢复过程中的植被演替[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2):347-356.
- [25] 李小燕. 汉江流域植被覆盖对气温和降水的时滞相关分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4):268-270.
- [26] 张静, 任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因[J]. 生态学报, 2016, 36(23):7667-7677.
- [27] 张静, 付恒阳, 秦公伟. 汉江流域农田生产力的时空变化及成因分析[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(5):128-134.
- [28] 贾小凤, 朱红春, 凌峰, 等. 基于 Landsat 多光谱与 PALSAR/PALSAR-2 数据的汉江流域森林覆盖变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2):321-329.
- [29] 张翔, 邓志民, 李丹, 等. 汉江流域土地利用/覆被变化的水文效应模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(10):1449-1455.
- [30] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(6):2248-2260.
- [31] 王栋, 吴栋栋, 解效白, 等. 汉江流域汛期径流时空变化特征研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(4):30-39.
- [32] 贺素娣, 郑远昌. 试论汉江流域农业生态环境问题及对策[J]. 山地研究, 1997, 15(2):81-85.
- [33] 李思悦, 刘文治, 顾胜, 等. 南水北调中线水源地汉江上游流域主要生态环境问题及对策[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(3):275-280.
- [34] LI W, CIAIS P, MACBEAN N, et al. Major forest changes and land cover transitions based on plant functional types derived from the ESA CCI Land Cover product [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 47:30-39.
- [35] 侯婉, 侯西勇. 全球海岸带多源土地利用/覆盖遥感产品分类一致性分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7):1061-1073.
- [36] 赵唯茜, 杜华明, 董廷旭, 等. 2005-2014 年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6):236-241.
- [37] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324):1379-1389.
- [38] KENDALL M G. Rank correlation methods [M]. London: Charles Griffin, 1962.
- [39] HURST H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil

Engineers, 1951, 116(1):770-799.

[40]MANDELBROT B B,WALLIS J R.Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J].Water Resources Research,1969,5(5):967-988.

[41]刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000-2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.

[42]刘洋洋,章钊颖,同琳静,等.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(2):349-363.

[43]闫慧敏,刘纪远,黄河清,等.城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响[J].地理学报,2012,67(5):579-588.