DOI:10.12171/j.1000−1522.20240193

黄土高原–青藏高原过渡带植被 NPP 时空变化及其驱动力——以青海省大通县为例

刘仟仟[1]　贺康宁[1]　左亚凡[2]　程　唱[1]　邹星晨[1]　刘婧雯[1]
石正阳[1]　李　睿[1]　彭小静[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，水土保持国家林业局重点实验室，北京 100083；2. 山西农业大学林学院，山西 太谷 030801）

摘要:【目的】明确黄土高原–青藏高原过渡带植被净初级生产力（NPP）的时空变化及其驱动因素，为区域生态保护和可持续发展提供数据支撑。**【方法】**以青海省大通县为研究对象，利用 MOD17A3、地形、气象和人为活动数据，通过趋势分析、偏相关分析、土地利用转移矩阵和最优地理探测器等方法，对该区域植被 NPP 进行分析。**【结果】**（1）2000—2019 年，大通县 NPP 多年平均值为 331.77 g/m^2（以 C 计，下同），并以 2.29 g/(m^2·a) 的速度上升，呈东南高、西北低的分布格局，其中，草原植被对 NPP 的贡献率最高。NPP 显著增加的区域占 70.10%，显著减少区域仅占 0.51%。（2）植被 NPP 上升受气候变化和人类活动共同驱动，且不同驱动因子对植被 NPP 的影响具有空间异质性。降水、日照时数、气温分别在大通县东南部、西北部和全部区域与植被 NPP 呈正相关关系。人口密度和 GDP 分别在高海拔草原和低海拔可造林区域对植被 NPP 有促进作用。（3）在大通县，气温、降水、高程是影响植被 NPP 空间变化的主导因子，驱动因子间的交互作用为双因子增强和非线性增强。高程、坡度、年均降水量、年均气温和人口密度分别为 2 840～3 150 m、4.18°～10.80°、441～677 mm、1.18～3.56 ℃、126～413 人/km^2 时，能有效促进植被 NPP 增长。**【结论】**大通县大部分区域植被 NPP 呈显著增加趋势，该区域的气候变化和人类活动有利于植被生长。研究结果有助于进一步了解黄土高原–青藏高原过渡带 NPP 变化的潜在驱动机制。

关键词：植被净初级生产力；黄土高原–青藏高原过渡带；时空特征；驱动因素
中图分类号：S771.8；X24；Q948　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)01−0039−12
引文格式：刘仟仟，贺康宁，左亚凡，等. 黄土高原–青藏高原过渡带植被 NPP 时空变化及其驱动力——以青海省大通县为例［J］. 北京林业大学学报，2025，47(1)：39−50. Liu Qianqian, He Kangning, Zuo Yafan, et al. Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 39−50.

Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China

Liu Qianqian[1]　He Kangning[1]　Zuo Yafan[2]　Cheng Chang[1]　Zou Xingchen[1]　Liu Jingwen[1]
Shi Zhengyang[1]　Li Rui[1]　Peng Xiaojing[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

Abstract:［**Objective**］This paper explores the spatiotemporal variation characteristics and their driving factors of net primary productivity (NPP) of vegetation in Datong County, Qinghai Province of northwestern

收稿日期: 2024−06−14　**修回日期:** 2024−08−25
基金项目: 青海省科技攻关计划（2022-SF-160）。
第一作者: 刘仟仟。主要研究方向：林业生态工程。Email：1551750511@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 贺康宁，教授。主要研究方向：林业生态工程。Email：hkn@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

China, so as to provide data support for evaluating the sustainability and productivity of regional ecosystem. [**Method**] Using MOD17A3, terrain, meteorological, and human activity data, vegetation NPP in Datong County was analyzed through methods such as trend analysis, partial correlation analysis, land use transfer matrix, and optimal geographic detector. [**Result**] (1) From 2000 to 2019, the multi-year average NPP value in Datong County was 331.77 g/m^2 (calculated by C, the same applies below), increasing at a rate of 2.29 g/(m^2·year), with a distribution pattern characterized by higher values in the southeast and lower values in the northwest. The contribution rate of grassland vegetation to NPP was the highest. Significant increases were observed in 70.10% of the area, while only 0.51% significantly decreased. (2) The increase in vegetation NPP was driven by both climate change and human activities, with spatial heterogeneity from various driving factors. Precipitation, sunshine duration and temperature showed positive correlations with vegetation NPP in the southeastern, northwestern, and entire region of Datong County, respectively. Population density and GDP respectively had a promoting effect on vegetation NPP in high-altitude grasslands and low-altitude afforestable areas. (3) Temperature, precipitation and elevation were the dominant factors affecting spatial variations of vegetation NPP, and the interaction among driving factors were dual-factor enhancement and nonlinear enhancement. When the elevation, slope, annual precipitation, annual temperature, and population density were 2 840−3 150 m, 4.18°−10.80°, 441−677 mm, 1.18−3.56 ℃, and 126−413 person/km^2, respectively, the growth of vegetation NPP can be promoted effectively. [**Conclusion**] In most areas of Datong County, vegetation NPP has shown a significant increasing trend, with both climate change and human activities contributing favorably to vegetation growth. The results are helpful to further understand the potential driving mechanism of NPP changes in the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau transition zone, which holds significant implications for regional ecological conservation and sustainable development.

Key words: net primary productivity (NPP) of vegetation; transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau; spatiotemporal characteristics; driving factors

植被是全球陆地生态系统重要组成部分，在碳循环和缓解气候变化中具有重要的作用[1]。植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）是指植物群落中单位面积和时间通过光合作用固定有机物的质量，是衡量植被生长状况和生态系统健康的重要指标[2−3]。研究表明，气候变化和人类活动是影响植被生长的主要驱动因素[4]。气温升高导致青海西部地区 NPP 下降，一些草地转化为稀疏植被[5]。而在青藏高原，温度升高延长了植被的生长期，促进了 NPP 增长[6]。黄土高原的生态系统曾因过渡放牧和土壤侵蚀受到严重破坏，在退耕还林还草工程实施以来，归一化植被指数显著增加[7]。然而，经济的快速发展和人口增长正在压缩植被的生长空间，导致城市周围植被退化[8]。因此，了解植被 NPP 时空变化特征，从人类活动和气候变化两方面探究各驱动因子对植被的影响，可为区域生态保护与修复提供科学指导。

目前，对植被 NPP 变化的研究多集中在省市[9−10]和大流域[11]尺度，但对黄土高原−青藏高原过渡带植被 NPP 时空变化特征和驱动因子的研究相对较少。黄土高原[12]和青藏高原[13]是我国重要的生态安全屏障，具有生态脆弱性高，对环境变化极为敏感等特点[14]，存在土地荒漠化、水土流失等生态环境问题[15]。黄土高原−青藏高原过渡带的植被生长受到不同气候和地理条件的共同影响，导致其植被类型和分布特征复杂多样。徐海洋等[16]研究指出，中国西北地区 NPP 主要受降水影响，青藏高原东部主要受气温影响。而对于黄土高原−青藏高原过渡带植被 NPP 的影响因素并不明确。

大通回族土族自治县（以下简称大通县）位于黄土高原与青藏高原的典型过渡带，随着海拔上升，植被类型从农田到草原、灌木、森林、高寒草原逐渐转变。农田承担着粮食生产功能，森林和草原对气候调节、水土保持具有重要作用[17]。然而，大通县植被曾遭到严重破坏，为维护区域生态平衡，促进可持续发展，大通县开展了大规模的植树造林、多期“三北”防护林建设工程、天然林保护工程和退耕还林还草工程。本研究基于 2000—2019 年 MOD17A3 的 NPP、地形、气象及人为活动数据等，运用趋势分析、偏相关分析、土地利用转移矩阵和最优地理探测器等方法，深入研究该区域植被 NPP 变化的驱动因素，旨在揭示大通县植被 NPP 的时空变化特征及植

被 NPP 对各驱动因子时空变化的响应，以期为黄土高原–青藏高原过渡带生态保护与可持续发展提供理论支持。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

大通县（100°51′ ~ 101°56′E，36°43′ ~ 37°23′N）位于青海省西宁市北部（图 1），总面积约 3 093 km^2，地处黄土高原–青藏高原过渡带。属高原大陆性气候，无霜期 70 ~ 120 d，日照时数 2 164 ~ 2 937 h，年均气温−8.7 ~ 7.1℃，年降水量 388 ~ 944 mm，降水由东南向西北，由平地向山地递增，雨热同季，季节分配不均。地势西北高，东南低，海拔 2 278 ~ 4 612 m，山地和丘陵占总面积的 94%。土壤类型主要有黑毡土、栗钙土、黑钙土等。区域内主要植被类型有高寒草甸、高寒草原、亚高寒草甸、森林、农田等。

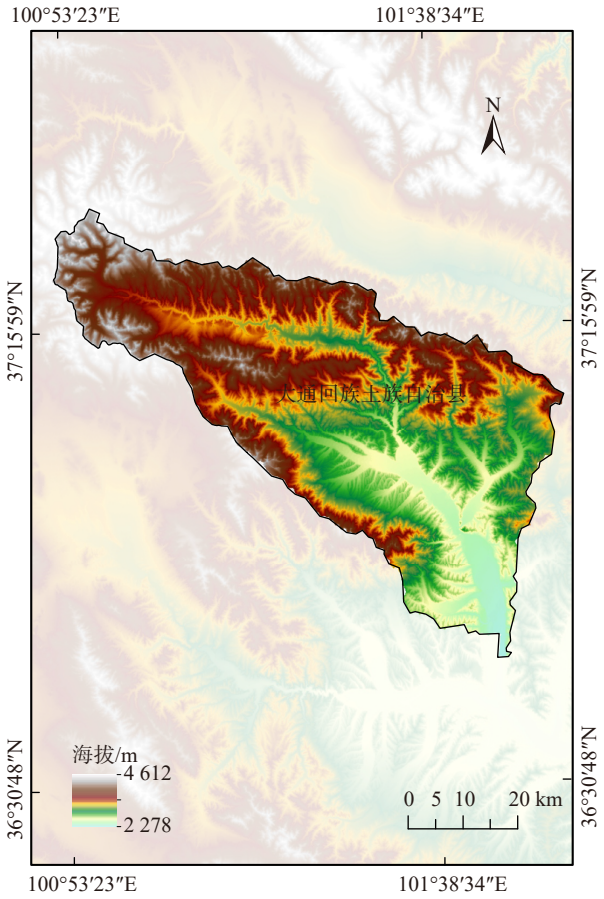


图 1　研究区地理位置示意图

Fig. 1　Geographical location diagram of research area

1.2　数据来源与处理

结合前人对黄土高原和青藏高原的研究[18−19]以及可以获取的数据，本文选取了 10 个影响植被 NPP 变化的驱动因子（图 2）。使用美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/）MOD17A3 NPP 数据产品的时间分辨率为年，空间分辨率为 500 m，时间范围为 2000—2019年。分辨率为 30 m 的数字高程模型来源于 USGS Earth Explorer（http://earthexplorer.usgs.gov/），坡度和坡向数据基于高程数据计算得到，将坡向分为阴坡（0° ~ 45°、315° ~ 360°）、半阴坡（45° ~ 135°）、阳坡（135° ~ 225°）、半阳坡（225° ~ 315°）4 类。气象站数据来自中国科学院资源环境数据中心（http://www.resdc.cn/），利用克里金（Kriging）插值法对实际气象站数据进行插值，生成研究区气象数据。社会经济数据和土壤类型来自中国科学院资源环境数据中心（http://www.resdc.cn/），人口数据和 GDP 数据时间为 2000、2005、2010、2015 和 2019 年，空间分辨率为 1 km。土地利用类型来源于中国区 1990—2020 年逐年 30 m 分辨率土地利用分类数据[20]。

所有数据通过 ArcGIS10.6 处理至相同像元大小后投影至 WGS1984/UTM 47N 坐标系。趋势分析、偏相关性分析、土地利用转移矩阵、地理探测器分别采用 ArcGIS Curve Fit 插件、RStudio、ArcGIS10.6、RStudio“GD”包进行处理，运用 ArcGIS10.6 和 Origin2021 作图。

1.3　研究方法

1.3.1　植被 NPP 数据验证

MOD17A3 NPP 数据已广泛应用于生态学、环境科学等领域的大尺度研究。对于局域尺度如大通县这样的小区域，其数据产品的可靠性尚未得到充分验证。鉴于此，本研究将 MOD17A3 的 NPP 数据与青海省及周边区域的 NPP 模拟结果以及地面实测数据进行对比，评估 MOD17A3 的 NPP 数据在小尺度地区的适用性。

1.3.2　趋势分析

采用一元线性回归趋势分析方法[7]，对大通县 NPP 变化趋势进行分析。

$$\theta_{\text{slope}}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}(iy_i)-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}y_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2}$$

式中：n 是研究时间序列的长度（2000—2019 年，n = 20），y_i 表示第 i 年 NPP 值，θ_{slope} 代表趋势线斜率。$\theta_{\text{slope}} > 0$，表示 NPP 为增加趋势；反之，NPP 为下降趋势。趋势的显著性采用置信水平 P，显著性表示变化趋势的可信程度。$P < 0.01$ 时，表示结果极显著且可信；$0.01 \leqslant P < 0.05$ 时，表示结果显著且可信；$P \geqslant 0.05$ 时，表示显著性弱。

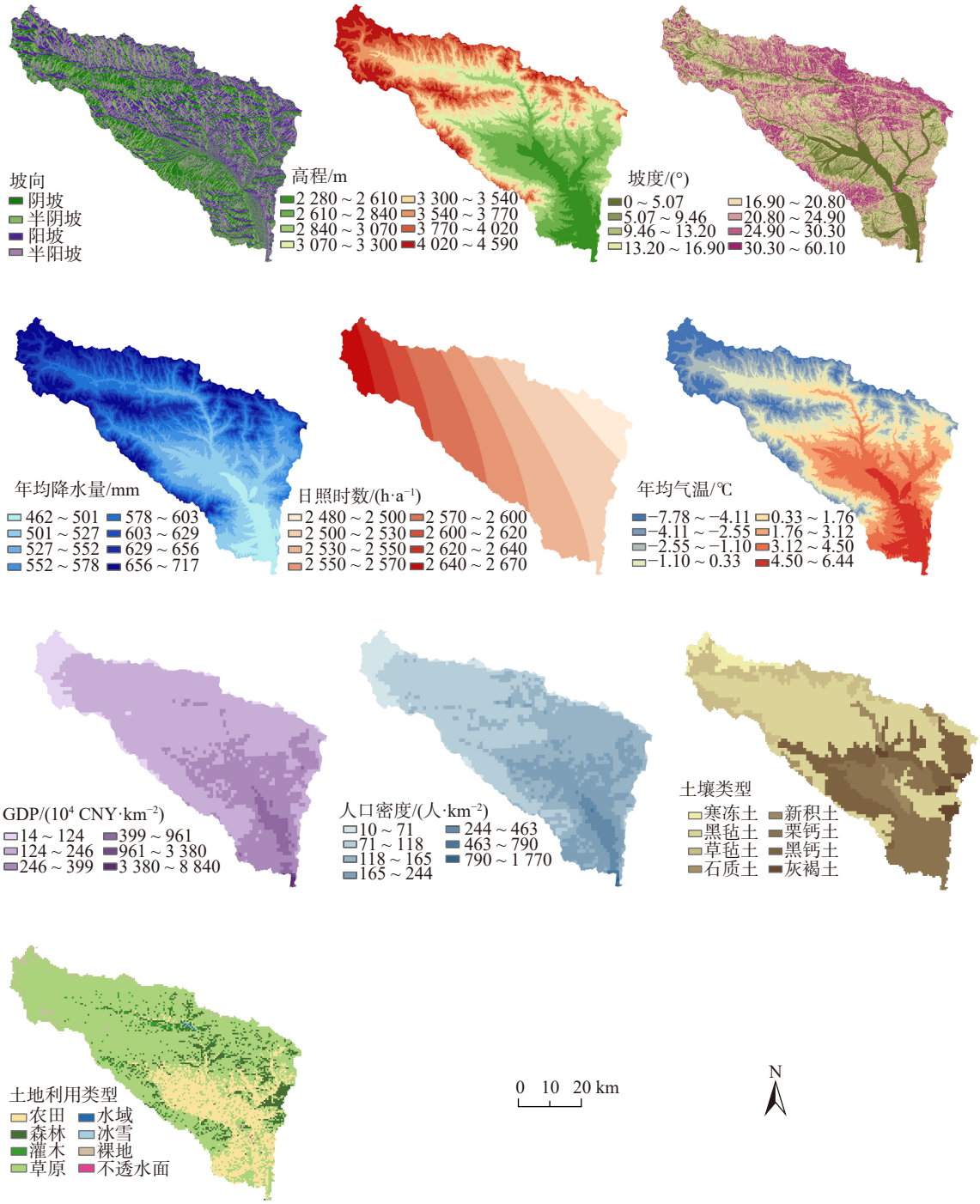


图 2 影响植被 NPP 的驱动因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of driving factors influencing vegetation NPP

1.3.3 偏相关分析

运用偏相关分析排除其他变量，探究单一气象因子或人为活动因子对植被 NPP 的影响[21]。

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{\left(1-R_{xz}^2\right)\left(1-R_{yz}^2\right)}}$$

$$R_{xy,zm}=\frac{R_{xy,z}-R_{xm,z}R_{ym,z}}{\sqrt{\left(1-R_{xm,z}{}^2\right)\left(1-R_{ym,z}{}^2\right)}}$$

式中：$R_{xy,\,z}$ 表示排除变量 z 影响的 x 和 y 之间的一阶偏相关系数；$R_{xy,\,zm}$ 表示排除变量 z、m 影响的 x 和 y 之间的二阶偏相关系数。

1.3.4 土地利用转移矩阵

运用 ArcGIS10.6 软件，基于 2000 年和 2019 年大通县的土地利用数据，构建土地利用转移矩阵[22]。将土地利用变化作为影响植被 NPP 变化的驱动因子进行分析。

1.3.5 最优地理探测器

地理探测器是一种新的探测空间异质性，以及解释其背后驱动因子的统计学方法[23]，可以通过量

化空间数据的分层异质性分析响应变量和解释变量之间的耦合关系。因此本文通过地理探测器中的“GD”包确定最优分级方法(相等间隔法、自然间断点法、分位数法、几何间隔法)与分类级别[24](表 1)。

2　结果与分析

2.1　植被 NPP 数据验证结果

MOD17A3 NPP 数据的多年平均值与前人模型模拟结果较为一致，表现为森林最大，农田其次，裸地最小，且基本在实测值范围内，说明 MOD17A3 数据运用于大通县植被 NPP 研究基本可靠(表 2)。

2.2　大通县植被 NPP 时空变化特征

大通县年均 NPP(以 C 计，下同)值介于 299.04～365.13 g/(m^2·a)，多年平均值为 331.77 g/(m^2·a)(图 3)。植被 NPP 总体以 2.29 g/(m^2·a)的速度波动上升(P < 0.01)。

植被 NPP 较大值集中分布于研究区东南部，海拔基本在 3 300 m 以下，土地利用类型为农田及其周边的森林；较小值分布于西北部，以草原为主

表 1　驱动因子分类方法及类别

Tab. 1　Classification methods and categories of driving factors

驱动因子	年份	分类方法	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
坡向	2000—2019		阴坡	半阴坡	阳坡	半阳坡				
高程/m	2000—2015	自然间断点法	2 280～2 610	2 610～2 840	2 840～3 070	3 070～3 300	3 300～3 540	3 540～3 770	3 770～4 020	4 020～4 590
	2019	分位数法	2 280～2 570	2 570～2 860	2 860～3 150	3 150～3 440	3 440～3 720	3 720～4 010	4 010～4 300	4 300～4 590
坡度/(°)	2000—2005 2015—2019	分位数法	0～5.07	5.07～9.46	9.46～13.20	13.20～16.90	16.90～20.80	20.80～24.90	24.90～30.30	30.30～60.10
	2010	几何间隔法	0～1.28	1.28～4.18	4.18～10.80	10.80～25.80	25.80～60.10			
年均降水量/mm	2000	自然间断点法	389～427	427～449	449～469	469～489	489～508	508～527	527～547	547～593
	2005	相等间隔法	464～498	498～533	533～568	568～603	603～637	637～672	672～707	707～741
	2010		419～453	453～487	487～521	521～555	555～589	589～623	623～657	657～601
	2015	自然间断点法	371～414	414～441	441～466	466～493	493～519	519～545	545～574	574～639
	2019		519～589	589～634	634～677	677～719	719～760	760～801	801～845	845～935
日照时长/($h·a^{-1}$)	2000	几何间隔法	2 490～2 510	2 510～2 540	2 540～2 570	2 570～2 600	2 600～2 630	2 630～2 660		
	2005	相等间隔法	2 460～2 490	2 490～2 510	2 510～2 530	2 530～2 550	2 550～2 570	2 570～2 600	2 600～2 620	2 620～2 640
	2010		2 570～2 590	2 590～2 600	2 600～2 620	2 620～2 640	2 640～2 650	2 650～2 670	2 670～2 690	2 690～2 700
	2015	自然间断点法	2 490～2 560	2 560～2 600	2 600～2 650	2 650～2 690	2 690～2 740	2 740～2 800		
	2019		2 170～2 290	2 290～2 370	2 370～2 440	2 440～2 510	2 510～2 580	2 580～2 650	2 650～2 730	2 730～2 810
年均气温/℃	2000	自然间断点法	−8.33～−4.70	−4.70～−3.13	−3.13～−1.68	−1.68～−0.24	−0.24～1.18	1.18～2.55	2.55～3.93	3.93～5.89
	2005		−7.58～−4.07	−4.07～−2.57	−2.57～−1.17	−1.17～0.23	0.23～1.62	1.62～2.94	2.94～4.27	4.27～6.17
	2010		−7.41～−3.71	−3.71～−2.14	−2.14～−0.69	−0.69～0.74	0.74～2.17	2.17～3.53	3.53～4.91	4.91～6.90
	2015		−7.65～−3.88	−3.88～−2.26	−2.26～−0.77	−0.77～0.70	0.70～2.16	2.16～3.56	3.56～4.98	4.98～6.98
	2019	分位数法	−7.25～−5.52	−5.52～−3.79	−3.79～−2.06	−2.06～−0.33	−0.33～1.40	1.40～3.13	3.13～4.86	4.86～6.59
GDP/(10^4 CNY·km^{-2})	2000	自然间断点法	2.94～7.53	7.53～50.10	50.10～74.30	74.30～104	104～157	157～262	262～1 250	1 250～1 630
	2005	几何间隔法	6.22～24.70	24.7～90.60	90.60～325	325～1 160	1 160～4 140			
	2010	自然间断点法	13.30～66.70	66.70～208	208～316	316～487	487～740	740～1 350	1 350～7 220	
	2015	分位数法	9～211	211～236	236～262	262～288	288～308	308～346	346～485	485～18 600
	2019	自然间断点法	13～194	194～430	430～899	899～1 580	1 580～15 400	15 400～17 800		
人口密度/(人·km^{-2})	2000	几何间隔法	5.11～13.20	13.20～32	32～75.70	75.70～177	177～413	413～962	962～2 240	
	2005		12.70～68.50	68.50～120	120～183	183～305	305～650	650～1 770		
	2010	自然间断点法	5.72～73.60	73.60～129	129～189	189～271	271～397	397～729		
	2015		6.03～27.90	27.90～93	93～123	123～152	152～200	200～275	275～446	446～720
	2019		3～22	22～99	99～126	126～169	169～319	319～549	549～2 640	2 640～5 000
土壤类型	2000—2019		灰褐土	黑钙土	栗钙土	新积土	石质土	草毡土	黑毡土	寒冻土
土地利用类型	2000—2019		农田	森林	灌木	草原	水域	冰雪	裸地	不透水面

表 2 主要植被类型 NPP 的 MOD17A3 预测结果与其他模型及实测值的比较

Tab. 2 Comparison of MOD17A3 prediction results of main vegetation type NPP with other models and measured values

g/(m²·a)

方法	时期	主要植被类型的NPP(以C计)					
		森林		灌木	草原	裸地	农田
		落叶阔叶林	常绿针叶林				
MOD17A3	2000—2019	394.66		345.08	313.02	107.18	369.89
GLOPEM-CEVSA[25]	1988—2004	267.90			160.90	36.13	222.94
GLOPEM[26]	1988—2004	405.2		156.04	218.74	21.48	289.22
CASA[27]	2010	279.81			162.87	62.81	256.28
AVIM2[28]	2015—2055	660 ~ 730		180 ~ 250	240 ~ 310		580 ~ 710
IBIS[29]	1961—2005	678.7	359.9	144.7	203.6	9.8	
NPP-EMSC[30]	2009	305	292	86	102	1	276
实测值	1989—1993, 1996, 2011	179 ~ 806[31] 111 ~ 631[32]	114 ~ 1 669[31] 164 ~ 798[32]	364[31]	326 ~ 772[33]	29.5 ~ 375[33]	239 ~ 760[31]

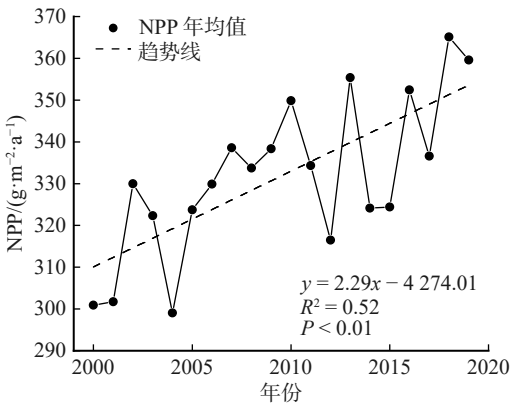


图 3 2000—2019 年大通县植被 NPP 年际变化

Fig. 3 Interannual variations of vegetation NPP in Datong County from 2000 to 2019

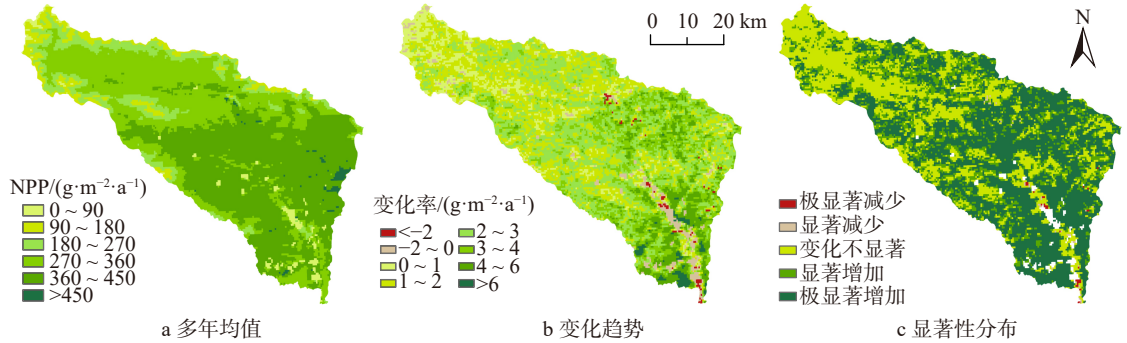
(图 4a)。2000—2019 年大通县植被 NPP 有 96.07% 的区域为增加趋势，NPP 增加趋势大于 4 g/(m²·a)的区域主要在东南部，区域内森林面积显著增加；NPP 降低的区域仅占 3.93%，主要在城镇等建设用地周边(图 4b)。其中，大通县 70.10% 区域的 NPP 呈显著和极显著增加趋势，分布区域较广，主要为农田、森林和灌木。变化不显著的区域占 29.39%，主要分布在西北部的草原和东南部的部分农田。显著和极显著减少的像元占比较少，仅为 0.51%，主要分布在城镇周边(图 4c)。

2.3 气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响

2.3.1 气候变化与植被 NPP 的偏相关分析

植被 NPP 与降水量的偏相关系数为−0.62 ~ 0.76，平均相关系数为 0.18，77.26% 的区域与降水量呈正相关关系，显著正相关的区域占总面积的 11.72%，主要分布在海拔较低，降水量较少的区域(图 5a)。NPP 与日照时长的平均相关系数为 0.03，55.63% 的区域呈正相关关系，主要分布在研究区西北部，而 NPP 较高的东南部日照时数与 NPP 呈负相关关系(图 5b)。植被 NPP 与气温的偏相关系数为−0.54 ~ 0.89，平均相关系数为 0.55，大部分区域与气温呈正相关关系，仅 1.39% 的区域呈负相关(图 5c)。植被 NPP 与气温、日照时长显著正相关的区域都分布在 NPP 较低处，该区域气温和日照时长是影响植被生长的主要因素。

总体而言，大通县年均气温对植被 NPP 的影响大于年均降水量和日照时长，降水量和日照时长对植被 NPP 既有正向也有负向影响。植被 NPP 对各气候因子的响应具有明显的空间异质性，西北部主要受



a 多年均值 b 变化趋势 c 显著性分布

c 图中白色部分为不透水面，无 NPP。

图 4 2000—2019 年大通县植被 NPP 多年均值、变化趋势及显著性分布

Fig. 4 Multi-year average, changing trend and significance distribution of vegetation NPP in Datong County from 2000 to 2019

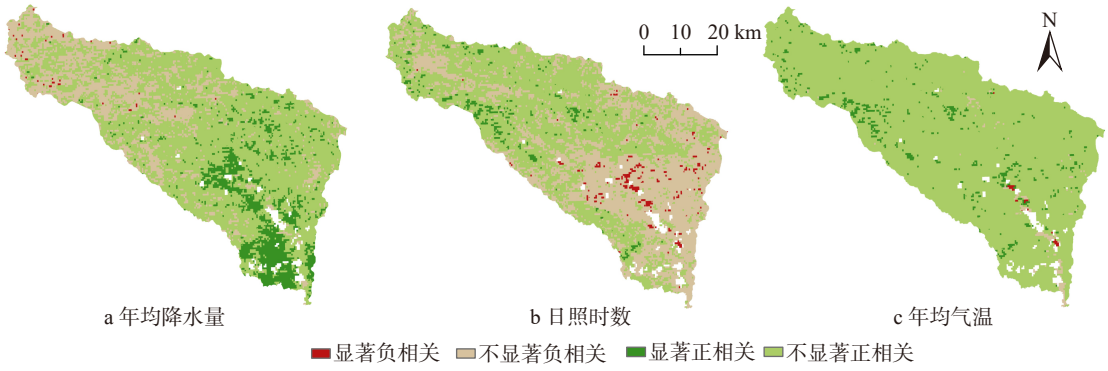


图 5　植被 NPP 与气象因子的偏相关分析

Fig. 5　Partial correlation analysis between vegetation NPP and meteorological factors

温度和日照时长影响，东南部受降水量影响较大。

2.3.2　人类活动与植被 NPP 的偏相关分析

对植被 NPP 与 GDP 进行偏相关分析，平均相关系数为 0.58，呈正相关关系的区域占总面积的 88.50%，13.18% 的区域呈显著正相关(图 6a)。与 GDP 相反，植被 NPP 和人口密度在 74.19% 的区域呈负相关关系，5.73% 的区域呈显著负相关，平均相关系数为负 0.32(图 6b)。

2.4　不同土地利用类型对植被 NPP 的影响

对各土地利用类型年均 NPP 进行分析，发现森林 NPP 值最大，为 394.66 g/m^2，后面依次为农田(369.89 g/m^2)、土地利用变化区域(353.60 g/m^2)、灌木(345.00 g/m^2)、草原(313.02 g/m^2)。年际变化分析可得，各土地利用类型以超过 2 g/(m^2·a)的速度波动上升($P < 0.01$)，其中森林 NPP 上升速度最快，为 2.62 g/(m^2·a)。大通县不同土地利用类型植被 NPP 贡献率中，草原贡献率最高，为 59.11%，其次为农田(17.40%)、土地利用变化区域(13.54%)和森林(8.22%)，灌木、水域、裸地、不透水面的贡献率最小(图 7)。

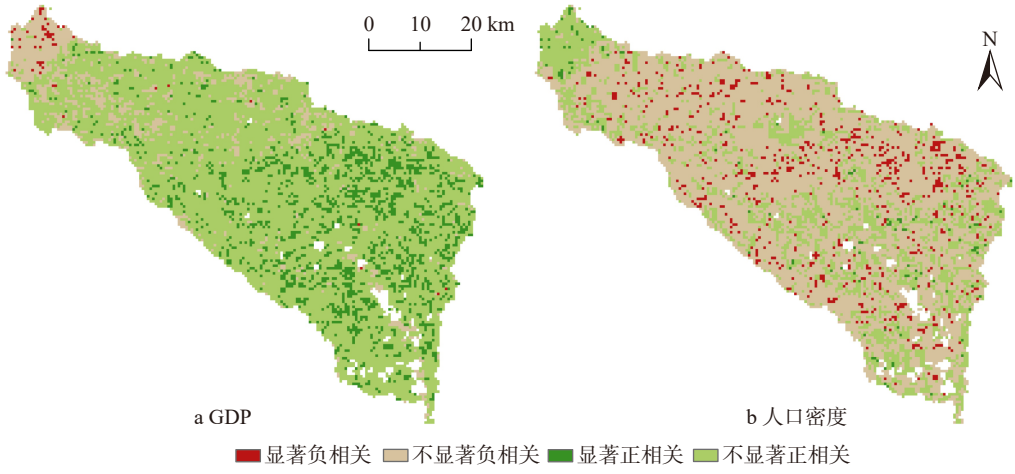


图 6　植被 NPP 与人类活动因子的偏相关分析

Fig. 6　Partial correlation analysis between vegetation NPP and human activity factors

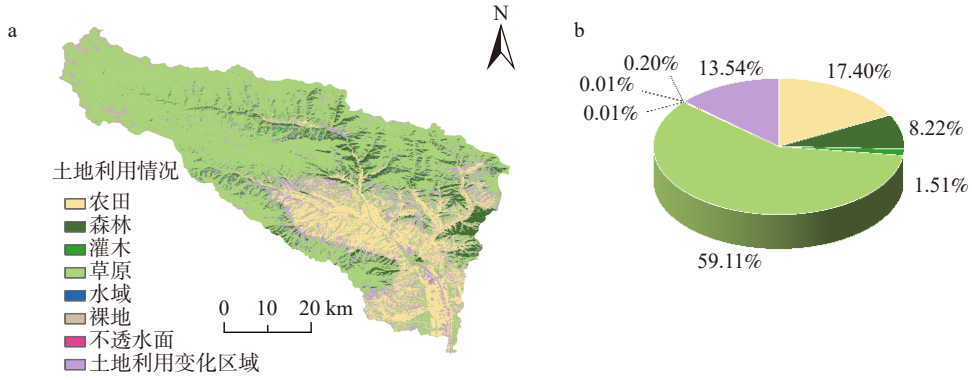


图 7　2000—2019 年大通县土地利用情况(a)及不同植被 NPP 贡献率(b)

Fig. 7　Land use situation (a) and contribution rates (b) of different vegetation NPP in Datong County from 2000 to 2019

2.5 植被 NPP 空间驱动力分析

2.5.1 驱动因子对植被 NPP 解释力分析

运用最优地理探测器探究驱动因子对植被 NPP 的影响。2000—2019 年，不同驱动因子对大通县植被 NPP 时空异质性解释力不同(表 3)。年均气温、年均降水量、高程对 NPP 时空异质性的综合解释力最大(> 0.45)，年均降水量解释力呈逐年下降趋势；土壤类型、日照时长、人口密度、GDP、土地利用类型的综合解释力中等，在 0.10 ~ 0.45；坡度和坡向的综合解释力最小(< 0.05)。

与单个驱动因子相比，驱动因子交互作用的解释力显著增强，以双因子增强为主，坡向、坡度与其他驱动因子的交互作用为非线性增强(图 8)。高程、年均降水量、年均气温与其他驱动因子的交互作用最明显(> 0.50)，是影响大通县植被 NPP 时空异质性的关键。通过生态探测发现，高程与年均气温交互、年均气温与年均降水量交互对 NPP 空间异质性的影响趋于一致(图 8)。

2.5.2 植被 NPP 对各驱动因子的响应

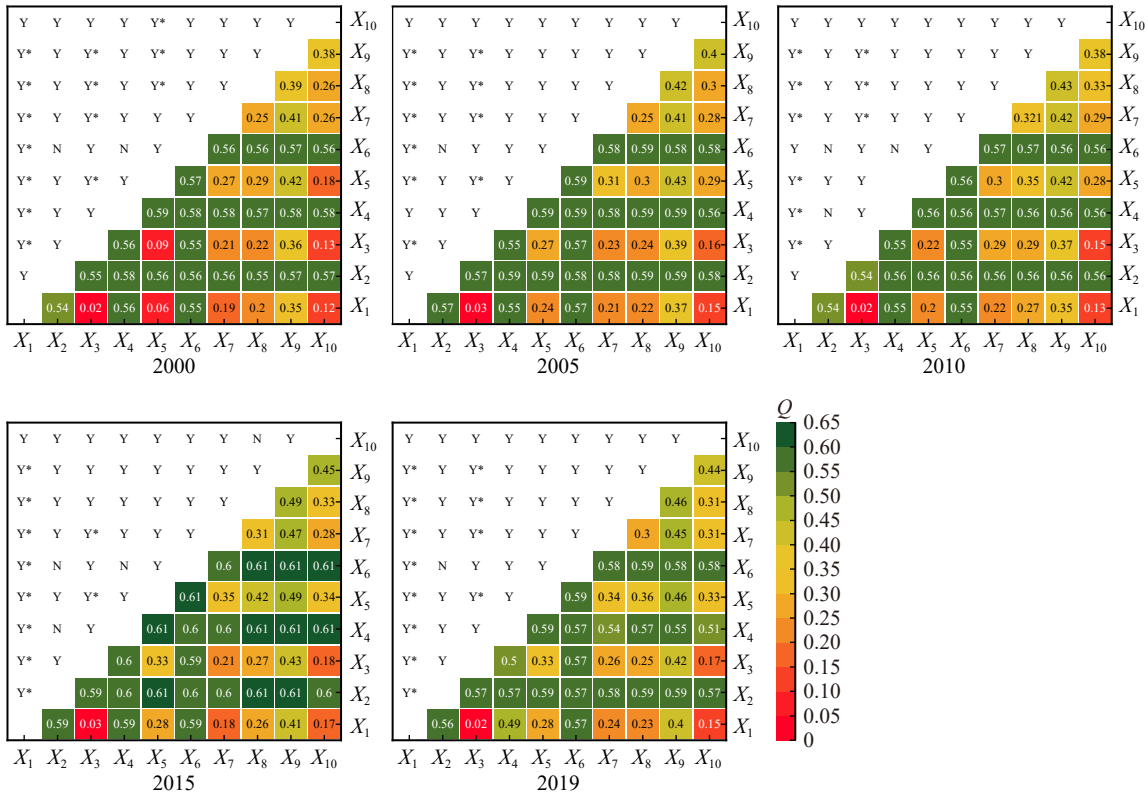
风险探测揭示了植被 NPP 与不同驱动因子之间的响应关系。NPP 均值随着高程、坡度、年均降水量、年均气温、人口密度的增加呈先逐渐增高，后逐渐减少的趋势，分别在 2 840 ~ 3 150 m、4.18° ~ 10.80°、441 ~ 677 mm、1.18 ~ 3.56 ℃、126 ~ 413 人/km^2 时达到最大值。不同坡向对植被 NPP 影响不大，土壤类型中灰褐土、黑钙土、新积土、栗钙土的植被

表 3 驱动因子对大通县植被 NPP 的解释程度

Tab. 3 Explanatory power of driving factors on vegetation NPP in Datong County

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
2000	0.003 6	0.537 8	0.015 9	0.554 7	0.049 9	0.546 9	0.182 9	0.195 9	0.345 4	0.114 7
2005	0.003 4	0.564 9	0.021 0	0.543 1	0.226 6	0.566 6	0.205 3	0.214 6	0.363 2	0.145 5
2010	0.004 4	0.536 4	0.015 1	0.541 3	0.196 4	0.542 7	0.216 3	0.267 7	0.341 1	0.129 7
2015	0.003 2	0.581 8	0.018 4	0.586 3	0.275 0	0.588 0	0.169 4	0.252 7	0.403 6	0.168 2
2019	0.003 3	0.558 4	0.015 7	0.483 5	0.267 7	0.562 3	0.231 2	0.219 1	0.389 7	0.151 8

注：X_1. 坡向；X_2. 高程；X_3. 坡度；X_4. 年均降水量；X_5. 日照时长；X_6. 年均气温；X_7. GDP；X_8. 人口密度；X_9. 土壤类型；X_{10}. 土地利用类型。X_1、X_9、X_{10}为离散变量，其他为连续变量。下同。



Q 表示交互作用值；*表示双因子对 NPP 的交互作用为非线性增强，其余为双因子增强；N 表示双因子对 NPP 空间异质的影响不显著，Y 表示影响差异显著。

图 8 2000—2019 年大通县的交互作用探测与生态探测结果

Fig. 8 Interaction detection and ecological detection results in Datong County from 2000 to 2019

NPP 较高，寒冻土上植被 NPP 较低(图 9)。

3 讨　论

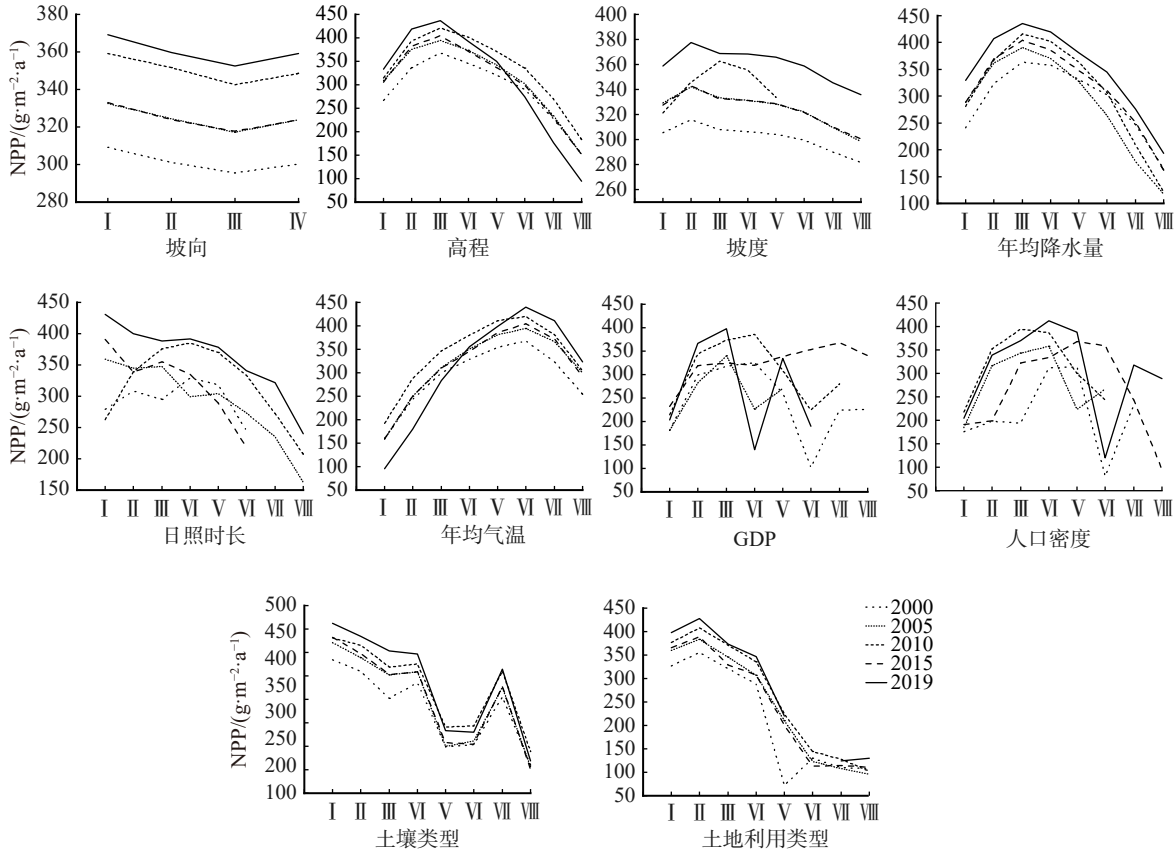
3.1 大通县植被 NPP 的对比分析

2000—2019 年，大通县植被 NPP 持续上升。王川等[34]发现祁连山地区近 20 年 NPP 整体以 2.38 g/(m^2·a)的速度呈上升趋势，与本研究结果一致。大通县植被 NPP 的提升一定程度上受益于植树造林、退耕还林还草等一系列生态环境保护和综合治理工程[35]。大通县植被 NPP 具有明显的空间异质性，由东南向西北递减。东南部存在大量农田，整体土壤肥力、水热条件和植被管理较好，植被 NPP 较高；西北部海拔较高，平均气温在 0 ℃ 以下，存在多年冻土，环境较为恶劣，NPP 整体较低。

3.2 各驱动因子对植被 NPP 影响

本研究揭示了大通县植被净初级生产力变化的主要驱动因子，其中年均气温、年均降水量和高程是关键因素。这些因素对植被 NPP 的空间异质性影响表现出一致性，可能原因是该区域降水量随海拔升高而增加，同时海拔的高低导致气温和土壤的差异，间接影响植被 NPP[36]。李文斌等[37]对青海湖流域植被 NPP 驱动分析中指出，海拔的解释力仅次于气温。杨安乐等[38]认为祁连山区域年均降水量对 NPP 起主导作用。在大通县高海拔区域，年均降水量与植被 NPP 存在负相关关系，因为降水量较高抑制了草地的光合作用，冲刷地表带走营养物质并形成地表径流[39]。过多的降水导致土壤水分过度饱和，抑制对植物根系的供氧，最终影响植被生长[40]。因此，应注重大通县耐低温耐涝草原植被的培育与保护。西北部虽然日照时数长但温度低，且为自然生长的草原，导致植被 NPP 较低，东南部由于较高的气温和适宜的降水量，使该区域农田和森林的 NPP 较高。

人类活动相关的驱动因子中，人口密度对 NPP 的影响最显著，土地利用类型的解释力最小。在山地和丘陵地区，人口密度的减少对植被 NPP 增加具有显著的促进作用。GDP 对 NPP 的显著促进作用主要体现在研究区南部，这与该地区植树造林等生态工程的集中实施有关，这些工程多选择在海拔较低、坡度平缓的南部地区进行。土壤类型对 NPP 空间异质性具有较高的解释力，不同土壤类型之间的植被 NPP 差异显著。这可能与西北地区土壤类型对



各图横坐标对应的范围参考表 1。

图 9　植被 NPP 随各驱动因子的变化趋势

Fig. 9　Variation trend of vegetation NPP with various driving factors

植被生长和雨水再利用效率的显著影响有关[41]。在西北部，贫瘠的高山土占研究区的 58.76%，这些区域多为草地，适合发展畜牧业，但要注意过度放牧导致的草地退化问题。而东南部则有 36.13% 的钙层土，这类土壤结构较好，养分含量较高，多用作耕地。

3.3 不足与展望

由于部分遥感数据空间分辨率较低，存在无法准确分辨面积过小区域和混合像元的情况。因此，未来要结合实际调查数据进行修正，从而使 NPP 与驱动因子间的耦合关系更加科学准确。在对气象因子这一动态数据的研究中发现，在不同年份下，最适宜植被 NPP 的气象条件每年都不同。例如，2000 年降水量为 449～469 mm 时，植被 NPP 最大（363.73 g/m^2），2005 年降水量 533 ～ 568 mm 时，植被 NPP 最大（391.10 g/m^2）。为进一步探究大通县 NPP 与气候变化的响应关系，接下来应从季节、月份等不同时间尺度探究气象因子对植被 NPP 的影响，同时考虑植被对水分利用、气候变化响应的滞后性等情况。

4 结　　论

（1）大通县 2000—2019 年 NPP 均值为 331.77 g/m^2，上升趋势为 2.29 g/（m^2·a），草原对植被 NPP 的贡献率最大。大部分区域植被 NPP 呈显著增加趋势，空间上由东南向西北逐渐减少。

（2）大通县 NPP 上升受气候变化和人类活动共同驱动，存在明显的空间异质性。东南部植被 NPP 与年均降水量呈显著正相关，与日照时长为负相关；植被 NPP 与年均气温呈正相关，在植被 NPP 较低区域植被生长对日照时长和年均气温有较强响应。人口密度对高海拔草原植被 NPP 具有促进作用，GDP 的正向作用在低海拔可造林区域。

（3）年均气温、年均降水量、高程是影响植被 NPP 的主要驱动因子，对空间异质性的影响趋于一致。驱动因子间对 NPP 的交互作用呈双因子增强或非线性增强，这两种交互作用的影响力度远超过单个驱动因子对植被 NPP 的解释力。研究揭示了驱动因子对植被 NPP 的影响，为黄土高原青藏高原交汇带植被 NPP 变化的驱动机制提供参考。

参 考 文 献

［1］ 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2001, 37(4): 563−569.
Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in China during 1982–1999[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(4): 563−569.

［2］ Cuo L, Zhang Y, Xu R, et al. Decadal change and inter-annual variability of net primary productivity on the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 2021, 56: 1837−1857.

［3］ Liu Y Y, Yang Y, Wang Q, et al. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient[J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 671−682.

［4］ Ge W Y, Deng L Q, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J/OL]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145648[2024−02−19]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145648.

［5］ 杨楠, 王凌雨, 朱琳, 等. 黄河流域近十年 NPP 变化特征及驱动因子分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 280−295.
Yang N, Wang L Y, Zhu L, et al. NPP variation characteristics and driving factors of the Yellow River Valley in the last decade[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 280−295.

［6］ Wang S Y, Zhang B, Yang Q C, et al. Responses of net primary productivity to phenological dynamics in the Tibetan Plateau, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 235−246.

［7］ 杨灿, 魏天兴, 李亦然, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区退耕还林工程前后 NDVI 时空变化特征 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 83−91.
Yang C, Wei T X, Li Y R, et al. Spatiotemporal variations of NDVI before and after implementation of Grain for Green Project in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 83−91.

［8］ 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 等. 西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析 [J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2704−2714.
Xu Y, Huang H Y, Dai Q Y, et al. Spatial-temporal variation in net primary productivity in terrestrial vegetation ecosystems and its driving forces in Southwest China[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2704−2714.

［9］ 谢慧君, 谢亚巍, 曹聪, 等. 重庆市植被净初级生产力时空变化特征及驱动力分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(12): 2581−2597.
Xie H J, Xie Y W, Cao C, et al. Spatial-temporal variation characteristics and driving forces of vegetation net primary productivity in Chongqing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(12): 2581−2597.

［10］ 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 等. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5220−5228.
Li Y L, Pan X Z, Wang C K, et al. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2011 in Guangxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5220−5228.

［11］ 闫丰, 李晨阳, 王靖, 等. 京津冀生态屏障区植被 NPP 时空演变驱动力定量解析 [J/OL]. 环境科学: 1–27[2024−06−04]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202402008.
Yan F, Li C Y, Wang J, et al. Quantitative analysis of the drivers

of the spatio-temporal evolution of vegetation NPP in the Beijing-Tianjin-Hebei Ecological Barrier Area[J/OL]. Environmental Science: 1–27[2024−06−04]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202402008.

[12] 王诗绮, 刘焱序, 李琰, 等. 近 20 年黄土高原生态系统服务研究进展 [J]. 生态学报, 2023, 43(1): 26−37.
Wang S Q, Liu Y X, Li Y, et al. Research progress on the ecosystem services on the Loess Plateau during the recent 20 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 26−37.

[13] 岳笑, 张良侠, 周德成, 等. 基于植被净初级生产力的青藏高原地区生态脆弱性及其控制因子分析 [J]. 地理科学, 2024, 44(1): 140−148.
Yue X, Zhang L X, Zhou D C, et al. Ecological vulnerability and its driving forces of the Qinghai-Xizang Plateau based on the net primary productivity of vegetation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(1): 140−148.

[14] 杨艳, 周德成, 宫兆宁, 等. 基于植被生产力的黄土高原地区生态脆弱性及其控制因子分析 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(10): 1951−1958.
Yang Y, Zhou D C, Gong Z N, et al. Ecological vulnerability and its drivers of the Loess Plateau based on vegetation productivity[J]. Ecology and Environment, 2022, 31(10): 1951−1958.

[15] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设 [J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3−12.
Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3−12.

[16] 涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 等. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素 [J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1219−1233.
Tu H Y, Jiapaer G L, Yu T, et al. Analysis of spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of net primary productivity in terrestrial ecosystems of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1219−1233.

[17] Zuo Y F, Gao J W, He K N. Interactions among ecosystem service key factors in vulnerable areas and their response to landscape patterns under the National Grain to Green Program[J]. Land Degradation & Development, 2023, 35(2): 898−915.

[18] 左婵, 王军邦, 张秀娟, 等. 三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5559−5573.
Zuo C, Wang J B, Zhang X J, et al. Changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in the Sanjiangyuan National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5559−5573.

[19] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818−828.
Ren L W, Wang X T, Liu M C, et al. Temporal and spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818−828.

[20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907−3925.

[21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
Xu J H. Mathematical methods in contemporary geography[M]. 3rd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.

[22] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨 [J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 83–89.
Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography 1999, 18(1): 83–89.

[23] 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.

[24] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5): 593−610.

[25] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感–过程耦合模型的 1988～2004 年青海三江源区净初级生产力模拟 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254–269.
Wang J B, Liu J Y, Shao Q Q, et al. Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988–2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the “Three-River Headwaters” region of Qinghai Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2): 254–269.

[26] 邵全琴, 樊江. 三江源区生态系统综合监测与评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Shao Q Q, Fan J. Integrated monitoring and evaluation of ecosystems in the Three-River Headwater Region[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[27] 沃笑, 吴良才, 张继平, 等. 基于 CASA 模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 45−50.
Wo X, Wu L C, Zhang J P, et al. Estimation of net primary production in the Three-River Headwater Region using CASA model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(9): 45−50.

[28] 刘亚荣. 基于 AVIM2 模型的祁连山植被净初级生产力的时空变化特征及未来变化趋势预测 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
Liu Y R. The spatiotemporal variation characteristics of primary net productivity of Qilian Mountain vegetation based on the AVIM2 model and prediction of future changing trends[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015.

[29] Yuan Q Z, Wu S H, Zhao D S, et al. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(1): 3−17.

[30] 赵国帅. 基于光能利用率模型的青海植被净初级生产力模拟研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
Zhao G S. The simulation study of net primary productivity of Qinghai vegetation based on the light use efficiency model[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.

［31］朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413−424.
Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413−424.

［32］罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型 [D]. 北京: 中国科学院, 1996.
Luo T X. Patterns of net primary productivity for Chinese major forest types and their mathematical models[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1996.

［33］程杰. 黄土高原草地植被分布与气候响应特征 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Cheng J. Response of grassland vegetations distribution to climate change in Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.

［34］王川, 王丽莎, 张勇勇, 等. 2000—2020 年祁连山植被净初级生产力时空变化及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9710−9720.
Wang C, Wang L S, Zhang Y Y, et al. Spatiotemporal change and driving factors of net primary productivity in Qilian Mountains from 2000 to 2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9710−9720.

［35］宋昌素, 肖燚, 博文静, 等. 生态资产评价方法研究: 以青海省为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(1): 9−23.
Song C S, Xiao Y, Bo W J, et al. The ecological asset accounting method study: a case study of Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 9−23.

［36］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.
Liu M X, Jiao J, Pan J H, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5306−5317.

［37］李文斌, 曹生奎, 曹广超, 等. 2000—2020 年青海湖流域植被净初级生产力时空格局及驱动分析 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 327−336, 343.
Li W B, Cao S K, Cao G C, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation net primary productivity and their drivers in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 327−336, 343.

［38］杨安乐, 张小平, 李宗省, 等. 气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被净初级生产力的定量影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1784−1792.
Yang A L, Zhang X P, Li Z X, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on vegetation NPP in the Qilian Mountain National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1784−1792.

［39］同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 青藏高原草地降水利用效率时空动态及对气候变化的响应 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 226−234.
Tong L J, Liu Y Y, Wang Q, et al. Spatial-temporal dynamics of precipitation use efficiency in grassland and its relationship with climate changes on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 226−234.

［40］周益, 陈德超, 张委伟, 等. 太湖流域植被 NPP 时空特征及其驱动因素研究 [J]. 遥感信息, 2022, 37(6): 94−100.
Zhou Y, Chen D C, Zang W W, et al. Study on spatiotemporal characteristics and driving factors of vegetation NPP in Taihu Lake Basin[J]. Remote Sensing Information, 2022, 37(6): 94−100.

［41］陈欢, 任志远. 中国大陆植被覆盖对降水与温度变化的响应 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 78−82, 4.
Chen H, Ren Z Y. Response of vegetation coverage to changes of precipitation and temperature in Chinese mainland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2): 78−82, 4.

（责任编辑 孟 瑶 李 契
责任编委 孟 平）