

第四章 三江源地区土地利用和气候变化 对 NPP 的影响

第一节 三江源地区气候变化

一、降水变化

三江源地区地处青藏高原的东北地区,地跨半干旱和半湿润地区(郑景云等,2013)。三江源地区作为我国西部的生态脆弱区,对气候变化较为敏感,诸多学者对此开展了关于三江源气候变化的研究。多数研究表明,三江源地区近50年来气候呈“暖湿化”趋势。郭佩佩等(2013)利用13个气象站点在1960—2011年间的气温和降水资料,基于Thornthwaite Memorial模型,估算了该地区的气候变生产力;研究发现,三江源地区年均及各季节气温的变化呈明显上升趋势,但年降水变化趋势并不明显;并预测未来三江源地区气候将呈“暖湿型”气候。易湘生等(2011)对近50年(1961—2010年)三江源地区的气温变化进行分析,同样认为气温呈现显著增温趋势。而对于降水而言,李林等(2006)研究认为,1962—2004年三江源地区降水呈显著增加趋势,且主要由于海洋蒸发和陆地上的蒸散发加强,从而使地气水分循环加快所导致。钱拴等(2010)基于牧业气象站点和NOAA/AVHRR植被数据,综合评估了三江源地区生长季气候变化趋势以及草地生长趋势,且认为三江源地区气候变化(“暖湿化”)正朝着有利于草地植被生长的方向发展。

近20年的降水数据显示,三江源地区多年平均降水量在144.16~728.51mm(图4-1),降水量相对较少。空间上,整体呈东南向西北递减的趋势,其中南部的久治、班玛、囊谦等县降水量较多,年平均降水量在700mm以上,而三江源北部的治多和曲麻莱县的部分地区(靠近柴达木盆地等)年均降水量则在300mm以下。

整理近20年三江源地区降水数据(逐年和逐月)可知(图4-2),三江源地区年平均降水量的变化呈波动上升的趋势,但增幅不大。分时段看,近10年年均降水量的波动幅度显著地大于2000年以前。对1990—2010年三江源各月降水数据统计可以看到,三江源地区降水量集中于6—9月,其中7月达到最大值;自11月至次年4月降水量偏少。

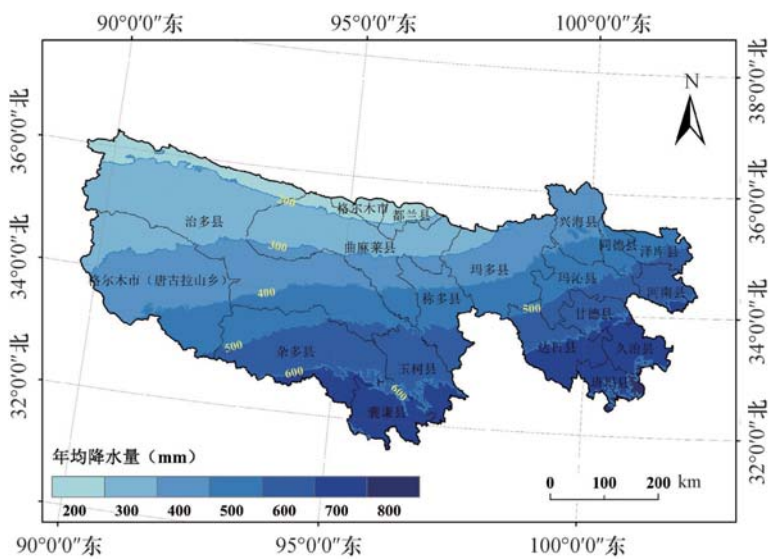


图 4-1 三江源地区年降水的空间分布

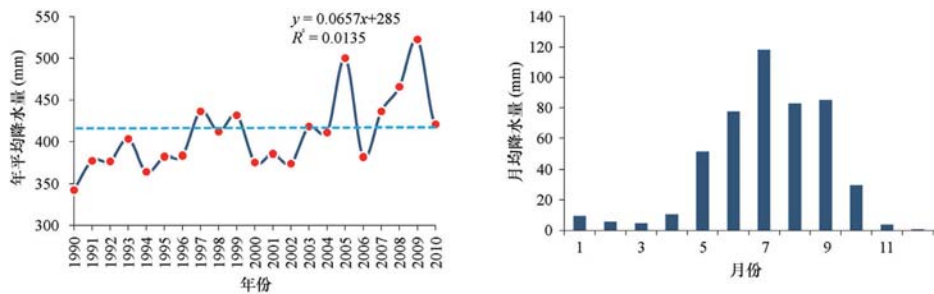


图 4-2 1990—2010 年三江源地区降水量的变化

二、日照时数

日照时数是对太阳能资源评估的重要物理量(杜军 等,2007)。由于其主要受太阳辐射、大气光学厚度和云量的影响,因此也是反映区域气候条件的重要因子。三江源地区太阳能资源较为充足,各县年平均日照时数为 2684.18h。在空间分布特征上,与海拔和纬度呈正相关;北部日照时数高于东南部,各县日照时数在 2235.11~3020.76h,其中南部的囊谦、久治、达日和甘德等县是日照时数的低值区,而治多和曲麻莱县的北部地区则为高值区。

对 1990—2010 年三江源地区日照时数统计数据分析可知,该区年日照时数在 2537~2769h 之间波动,整体呈先上升后下降的趋势。1994—2002 年间年日照时数普遍较高,此后日照时数下降趋势明显。多数研究表明(杜军 等,2007;韩国军 等,2011;华维,2009,2010),日照时数减少的可能原因是与云量(特别是低云量)的增加以及大气中气溶胶的含量关系密切。

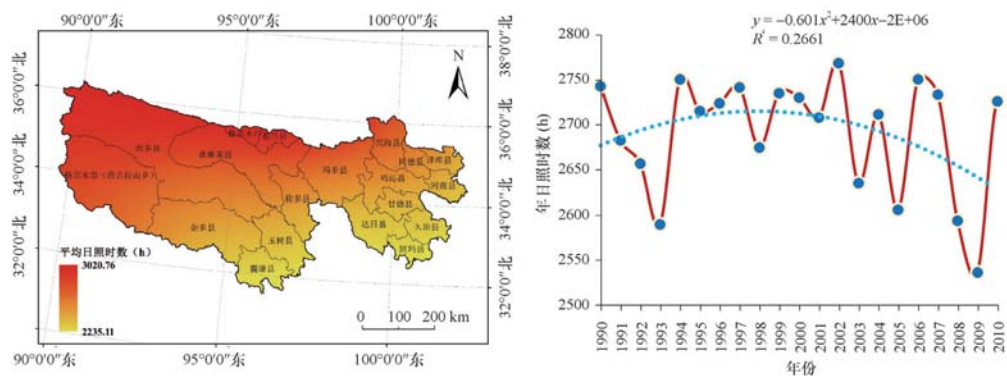


图 4-3 三江源地区年日照时数的空间分布

三、年均气温

气温是气候的基本要素,其变化决定了生态环境的变迁(易湘生 等,2011)。三江源地区地处高原亚寒带(郑景云 等,2013),年均气温为 -3.03°C ,气温波动在 $-13.34\sim 4.98^{\circ}\text{C}$ 之间。在空间分布上,东部的同德、泽库和河南等县以及东南部的囊谦、玉树等县出现相对的高温,而西部高海拔地区,包括唐古拉山乡、治多县则为气温的低值区。相对于日照时间而言,气温的高值区并非分布在长时间日照的地区,而是与地形和降水的分布相反。从 0°C 以上的积温分布情况上看,东部(如同德、兴海、泽库、河南、班玛和久治等县)和南部(如囊谦和玉树县)的积温较高,更适于作物的生长。

1990—2010 年,三江源地区年平均气温呈波动上升趋势,变化较为显著。从 1990 年的 -3.84°C 增加至 2010 年的 -2.95°C ,气温约增加 0.89°C ,增幅为 23.16%。期间 1997 年年均气温最低,而在 2009 年升至最高。从气温分月的统计数据上看,三江源地区月均气温在 7 月达到最高,而在 12 月至次年 1 月间气温达到最低值,在长达约 7 个月的时间内(10 月至次年 4 月)该区气温均保持在 0°C 以下。

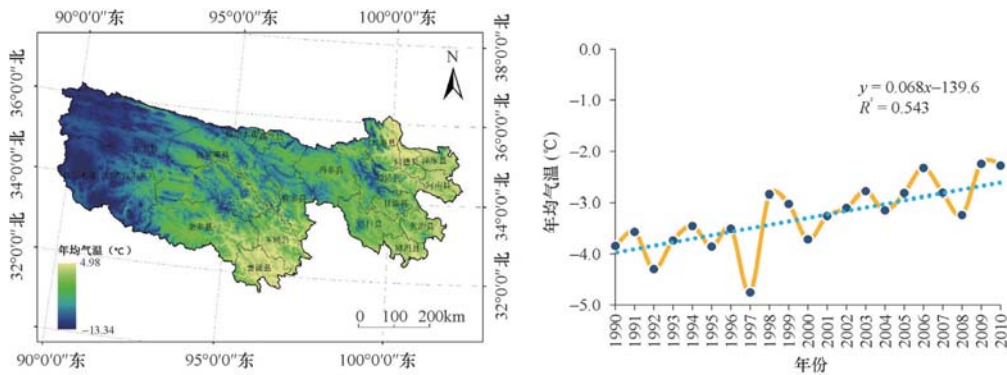


图 4-4 三江源地区年均气温和积温(0°C 以上)的空间分布

第二节 三江源地区 NPP 变化

一、NPP 变化分析方法

(一) 三江源地区净初级生产力的变化

植被通过光合作用生产的有机物质同化总量被称为初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP),而扣除自养呼吸后的剩余部分则为净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)。植被净初级生产力可作为响应气候变化的重要指标。NPP 常以单位时间和面积上生产的能被生态系统其他营养级别利用的有机物质的质量(干重, $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$)来表征。因此,区域净初级生产力的总量可表示为:

$$P = A \times NPP \quad (4-1)$$

1. NPP 的空间变化统计

利用已有 NPP 数据,在像元尺度上采用线性回归分析法分析研究期间植被 NPP 的时空变化情况。以拟合的趋势线斜率表示植被 NPP 年际变化率,计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (4-2)$$

式中, θ_{slope} 为拟合的趋势线的斜率, n 为研究时段, NPP_i 为第 i 年植被 NPP。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时,表示该像元时间序列上 NPP 存在下降趋势,反之 NPP 则表示上升。采用 F 检验趋势变化的置信程度, F 值的计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (4-3)$$

式中, $U = \sum_{i=1}^n (NPP_i - \bar{NPP}_i)^2$ 为误差平方和, $Q = \sum_{i=1}^n (NPP_i - \hat{NPP}_i)^2$, $\hat{NPP}_i$ 为拟合值, $\bar{NPP}_i$ 为研究期间 NPP 平均值, $n-2$ 为自由度。根据 F 值对趋势线斜率的置信程度进行检验,并划分等级:极显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0$ 且 $P < 0.01$)、显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0$ 且 $0.01 < P < 0.05$)、变化不显著 ($P > 0.05$)、显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0$ 且 $0.01 < P < 0.05$)、极显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0$ 且 $P < 0.01$)。

2. 土地利用和气候变化对净初级生产力的影响

为研究土地利用变化和气候变化对某用地类型的净初级生产力的影响,本研究参考 Hicke 等(2004)的计算方法。设 t_1 至 t_2 期间某土地利用类型和土地面积及净初级生产力分别为 A_1 、 A_2 和 NPP_1 、 NPP_2 ,则植被净初级净生产力的变化 ΔP 为:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = A_2 \times NPP_2 - A_1 \times NPP_1 \quad (4-4)$$

其中, $A_2 = A_1 + \Delta A$, $NPP_2 = NPP_1 + \Delta NPP$, 代入式(4-4)中, 则变为:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_2 - P_1 = (A_1 + \Delta A) \cdot (NPP_1 + \Delta NPP) - A_1 \cdot NPP_1 \\ &= A_1 \cdot \Delta NPP + \Delta A \cdot NPP_1 + \Delta A \cdot \Delta NPP\end{aligned}\quad (4-5)$$

其中, $A_1 \cdot \Delta NPP$ 为研究期间气候变化对某土地利用类型未转移部分 NPP 变化的影响; $\Delta A \cdot NPP_1$ 为研究期间某土地利用类型转移对该 NPP 变化的影响; $\Delta A \cdot \Delta NPP$ 为研究期间气候变化对某土地利用类型转移部分 NPP 变化的影响, 即气候变化和土地利用变化对 NPP 变化的协同影响。

分解气候变化和土地利用变化对某用地类型 NPP 变化量的贡献率, 其中气候变化对某土地利用类型 NPP 变化的贡献率为:

$$R_{\text{climate}} = \frac{|A_1 \cdot \Delta NPP|}{A_1 \cdot \Delta NPP + \Delta A \cdot NPP_1 + \Delta A \cdot \Delta NPP} \quad (4-6)$$

土地利用变化对某土地利用类型 NPP 变化的贡献率:

$$R_{\text{land}} = \frac{|\Delta A \cdot NPP_1|}{A_1 \cdot \Delta NPP + \Delta A \cdot NPP_1 + \Delta A \cdot \Delta NPP} \quad (4-7)$$

气候变化和土地利用变化共同作用对某土地利用类型 NPP 变化的贡献率:

$$R_{\text{climate_land}} = \frac{|\Delta A \cdot \Delta NPP|}{A_1 \cdot \Delta NPP + \Delta A \cdot NPP_1 + \Delta A \cdot \Delta NPP} \quad (4-8)$$

(二) 多层次线性模型

1. 模型设定

如果一个模型包含了不同层次的测量变量, 则称该模型为多层次模型, 在多层次模型中, 各脉络可估计出一条低层次的个别直线方程式。在这条回归线中, 通常各脉络都有相同的解释变量与结果, 但是有不同的回归系数, 这些个别回归方程式被一个高层次模型所联结, 在高层次模型中, 第一层的回归系数可被第二层的解释变量所解释。该模型是把每一个组分开进行估计, 将特定层次的数据用不同的模型通过统计的整合来加以分析。

本章为了研究气候变化对小流域和县域生态系统服务功能的作用机制, 采用多层次建模方法模拟气候变化对小流域和县域生态系统服务功能的作用机制, 综合考虑研究区主要表现为草地生态系统供给功能的特点和模型的需求, 模型直接运用草地的净初级生产力(NPP)来表征草地生态系统供给功能。NPP 的变化过程具有时空分异性, NPP 的变化是长期的、不确定的, 有小流域和县域两个层次。

基于 NPP 变化特性的分析, 在多层次模型中集成时间变量($Year_{ikt}$)和空间变量(X_p 、 X_q 、 Z_r 、 u_{1ik} 和 v_{0i}), 得到的回归方程如下:

$$\begin{aligned}\log(NPP)_{ikt} &= \beta_0 + \beta_1 Year_{ikt} + \beta_2 Year_{ik}^2 + \sum_{p=1}^p \alpha_p X_{pikt} + \sum_{q=1}^q \lambda_q X_{qik} + \sum_{r=1}^r \gamma_r Z_{rit} + \\ &\quad u_{0ik} + u_{1ik} Year_{ikt} + v_{0i} + \epsilon_{ik}\end{aligned}\quad (4-9)$$

其中, i 和 k 分别表示小流域和县域, t 表示时间; β_0 、 β_1 、 β_2 为回归系数, α_p 、 λ_q 、 γ_r 为变

量参数; X_p 为年均气温、降水、速效磷、钾含量等小流域水平时序变量; X_q 为高程、坡度、起伏度、10km 缓冲区内耕地、建设用地面积比例、到最近方位(铁路、公路和县驻地)距离等小流域水平时序不变量; Z_r 为人口密度、GDP、畜牧业产值、路网密度、投资、商品率、大牲畜存栏量等县域水平社会经济变量; u_{0ik} 、 u_{1ik} 和 v_{0i} 分别为小流域水平截距、斜率随机项及县域水平截距随机项; ϵ 为随机误差项。

2. 模型解析

模型中的多项式:

$$\beta_0 + \beta_1 Year_{ikt} + \beta_2 Year_{ikt}^2 + u_{0ik} + u_{1ik} Year_{ikt} + v_{0i} \quad (4-10)$$

能在时间尺度上刻画 NPP 受气候影响变化的机制,在模型回归过程中根据统计调查数据准确地确定回归系数、水平截距随机项和斜率随机项。

模型中的多项式:

$$\sum_{p=1}^p \alpha_p X_{pikt} + \sum_{q=1}^q \lambda_q X_{qik} + \sum_{r=1}^r \gamma_r Z_{rit} \quad (4-11)$$

在空间尺度上定量解析了气候变化区域性差异对 NPP 的作用机理。模型不仅能在县域和小流域两个层次上模拟出 NPP 的变化过程,而且将影响中的诸多不确定性的影响作为隐形变量(u_{0ik} 、 u_{1ik} 和 v_{0i})集成在模型中,故模型具有较好的健壮性和适用性。

(三)联立方程组

在一个受外部作用的系统中,人们关心各系统内部变量间的相互关系,以及这种关系如何受系统外部变量的影响。联立方程组模型就是用来描述这种系统内部变量和外部变量之间相互作用关系的一种模型。

为了全面把握气候变化作用机制,将多层次线性模型(multilevel linear model, MLM)方法的输出结果输入联立方程模型中,在参数链接过程中建立气候变化影响及适应机理的概念模型——多层次影响联立方程组模型,具体表达形式如下:

$$ES_{it} = a + bES_{it-1} + cT_{it} + dR_{it} + eZ + \epsilon \quad (4-12)$$

$$LP_i = a + bES_i + cZ_i + dX_i + \epsilon \quad (4-13)$$

$$Y_j = a + bES_k + cZ_j + dX_j + \epsilon \quad (4-14)$$

式中, ES_{it} 表示 t 时刻小流域 i 的生态系统服务功能, T_{it} 、 R_{it} 分别表示过去 50 年小流域 i 年均气温、降水, Z 为其他自然因素与社会经济因素的参数变量; LP_i 表示县域 i 食草畜出栏量; Y_j 表示农户 j 的食草畜牧业收入; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为方程的回归系数; ϵ 表示随机误差项。

在多层次影响联立方程组模型估计过程中,通过上述公式进行参数链接,从而计算出县域水平上的食草畜出栏量和农户的食草畜牧业收入。模型计算过程在宏观和微观两个尺度上解析生态系统服务功能受气候变化影响的机制,进而厘定生态系统服务功能影响畜牧业生产(宏观)和农户食草畜收入(微观)的机理。

二、NPP 变化情况

三江源地区净初级生产力的空间分布整体呈现由东向西递减的趋势(图 4-5a),该分布特点与水热分布相一致。三江源地区年均植被 NPP 为 $202.02\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,草地 NPP 为 $218.55\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。三江源地区草地 NPP 为 $102.69 \sim 1086.87\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

从变化趋势、幅度和时空特征看,1988—2012 年三江源地区植被年均 NPP 呈波动上升趋势(图 4-5b)。从 1988 年的 $178.52\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 左右上升至 $266.48\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,增幅达 49.26%,年均增长率 1.97%。近 20 年来,三江源地区植被 NPP 在 1989 年、1995 年、2005 年和 2008 年间出现 4 次较大波动,NPP 增至波峰。最低值为 $153.35\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最高值为 $266.48\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

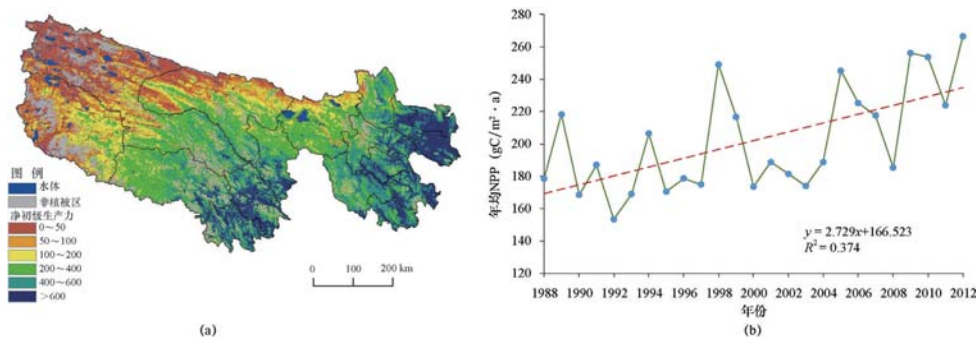


图 4-5 2012 年三江源地区净初级生产力的空间分布(a)及年均 NPP 的变化趋势(b)

利用已有 NPP 数据,在像元尺度上进行 NPP 的空间变化统计。从 NPP 变化的空间格局上看,1988—2012 年三江源地区 NPP 变化以增加为主,年际变化率的负值区镶嵌分布于其中(图 4-6a)。NPP 增幅较大区域主要分布在东部地区(如兴海、同德、泽库、玛沁、甘德、久治和班玛等县)以及中部的局部地区(如称多、玉树以及治多县的东南部);下降幅度较大区域则零星分布于其中;相对而言,广阔的中、高海拔地区变化幅度相对较小。该分布特征与植被类型及 NPP 有关,三江源地区的东部地区以林地、中-高覆盖度草地和耕地为主,植被 NPP 相对较高,变化幅度相对较大;而中、西部高海拔地区则以中、低覆盖度草地及未利用土地为主,植被 NPP 相对较低,变化幅度相对较小。

从 NPP 变化显著性检验上看,东部和西部高海拔地区 NPP 变化显著性较高,而中部地区 NPP 变化置信度水平较低。从统计结果上看,植被 NPP 极显著减少面积 3.64万 km^2 ,占总面积的 10.38%。NPP 显著减少面积 0.43万 km^2 ,占总面积的 1.22%;植被 NPP 极显著增加的面积达 20.21万 km^2 ,占总面积的 57.71%,显著增加面积达 1.29万 km^2 ,占总面积的 3.69%;植被 NPP 无明显变化约占 27%。

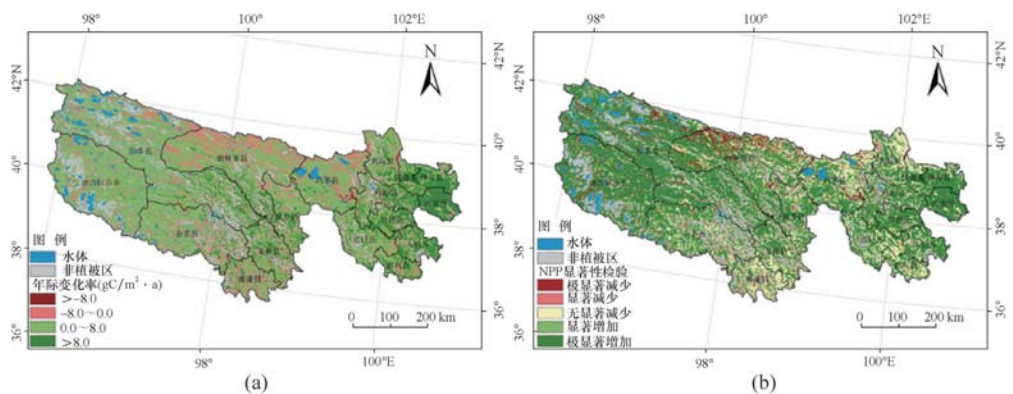


图 4-6 1988—2012 年三江源地区 NPP 年际变化率(a)及显著性检验(b)

就三江源地区植被 NPP 的时空变化特点来说,1988—2012 年,植被总体呈现良好态势,且年际变化率上呈明显的空间分异,局部地区植被 NPP 有持续退化的趋势。

第三节 气候变化和土地利用变化对耕地 NPP 的影响

一、土地转移对耕地 NPP 的影响

1988—2012 年,三江源地区土地转移对耕地 NPP 的影响较小(图 4-7),但总体上,土地转移对耕地 NPP 的增加起到积极作用。在空间分布上,兴海县、同德县和泽库县的耕地 NPP 在上升,而位于囊谦县和玉树县等东部地区少量 NPP 在下降,其他地区耕地 NPP 变化较微小。

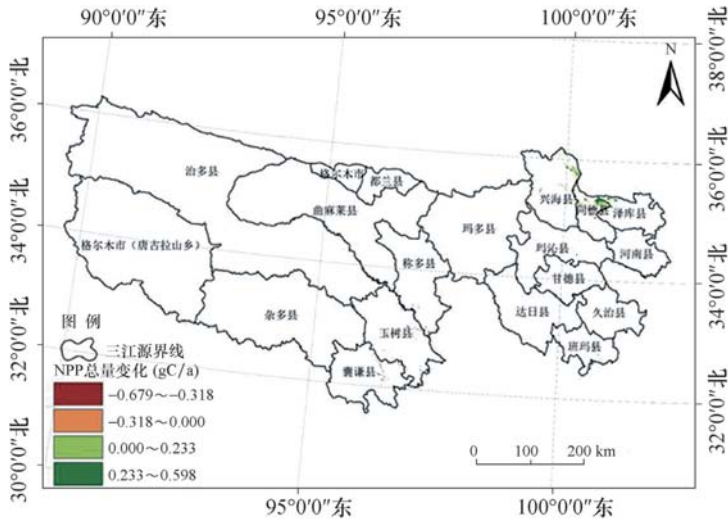


图 4-7 1988—2012 年三江源地区土地转移对耕地 NPP 影响的空间分布

不同用地转移对 NPP 变化的影响不同(表 4-1)。1988—2012 年,三江源地区耕地的转移主要在耕地和草地之间。其中,草地开垦为耕地最多,达 0.057Mhm²,占 1988 年耕地总面积的 74.28%,使耕地 NPP 增加 0.128TgC,占耕地 NPP 增加总量的 53.76%,扣除耕地向草地转移的面积及导致的耕地 NPP 的减少量,草地是耕地 NPP 增加的主要来源;其次是未利用土地,转为耕地的面积为 0.002Mhm²,占 1988 年耕地总面积的 2.10%,耕地 NPP 因此增加 0.004TgC,占 1988 年耕地 NPP 变化总量的 1.61%,扣除耕地向未利用土地的转移,未利用土地是耕地 NPP 增加的第二来源;三江源地区林地、水域和建设用地与耕地之间的转移对耕地 NPP 的增加起到负面作用。

表 4-1 1988—2012 年三江源地区土地利用变化对耕地 NPP 变化总量的影响

土地转移类型	转移面积 (Mhm ²)	转移比例 (%)	耕地 NPP 变化 (TgC)	耕地 NPP 变化率 (%)
耕地转出(小计)	-0.005	-7.09	-0.01	-4.33
耕地→草地	-0.033	-43.31	-0.117	-48.96
草地→耕地	0.057	74.28	0.128	53.76
草地转入(小计)	0.024	30.97	0.011	4.79
耕地→水域	-0.002	-2.23	-0.007	-2.85
水域→耕地	0.001	0.79	0.001	0.59
水域转入(小计)	-0.001	-1.44	-0.005	-2.27
耕地→建设用地	-0.001	-0.79	0	-0.18
建设用地→耕地	0	0.26	0	0.18
建设用地转入(小计)	0	-0.52	0	0
耕地→未利用土地	-0.001	-0.92	-0.002	-0.96
未利用土地→耕地	0.002	2.1	0.004	1.61
未利用土地转入(小计)	0.001	1.18	0.002	0.66
合计	0.018	23.1	-0.003	-1.15

二、气候变化对耕地 NPP 变化的影响

从 1988—2012 年气候变化对耕地 NPP 变化影响的空间分布上看,气候变化对耕地 NPP 的影响范围较小,且分布在东部兴海、同德两县。从影响总量上看,其变化有利于耕地 NPP 的生产。

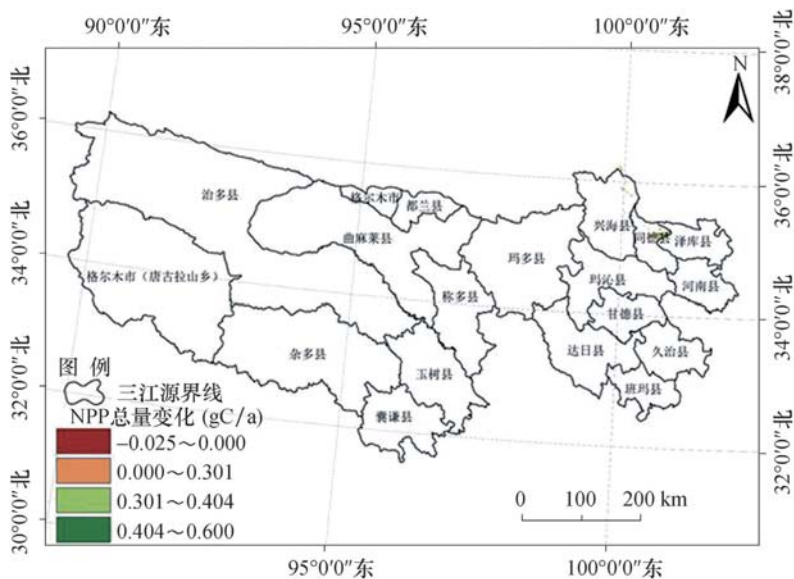


图 4-8 1988—2012 年三江源地区气候变化对耕地 NPP 影响的空间分布

三、气候和土地利用变化对耕地 NPP 变化的相对贡献

对耕地 NPP 变化因素分解可知(表 4-2),气候变化对三江源地区耕地 NPP 的增加产生积极作用,使得耕地 NPP 增加 0.11TgC;而在土地转移过程中,耕地 NPP 总量减少 0.003TgC;而在气候变化和土地转移的协同影响下,耕地 NPP 增加了 0.144TgC。相较之下,气候变化和土地转移的共同作用下耕地 NPP 的影响较大,贡献率达到 58.29%,影响量占 1988 年耕地 NPP 总量的 60.32%;其次是气候变化的影响,贡献率达 40.60%;而土地转移对耕地 NPP 的影响并不显著。

表 4-2 耕地 NPP 变化因素分解

因素类型	NPP 变化(TgC)	贡献率(%)	变化量的比例(%)
气候变化	0.100	40.60	42.01
土地利用变化	-0.003	1.11	1.15
气候变化和土地利用变化	0.144	58.29	60.32

第四节 气候变化和土地利用变化对林地 NPP 的影响

一、土地利用变化对林地 NPP 的影响

林地三江源地区土地总面积中仅次于草地。1988—2012 年土地转移对三江源

地区林地 NPP 的影响镶嵌分布在东部和南部的各县(图 4-9),而中西部较少。其中南部的囊谦和班玛县以及东部渭南、玛沁和同德多县的交界部分是林地 NPP 减少的主要区域;而林地 NPP 增加的区域镶嵌分布于东部各县。

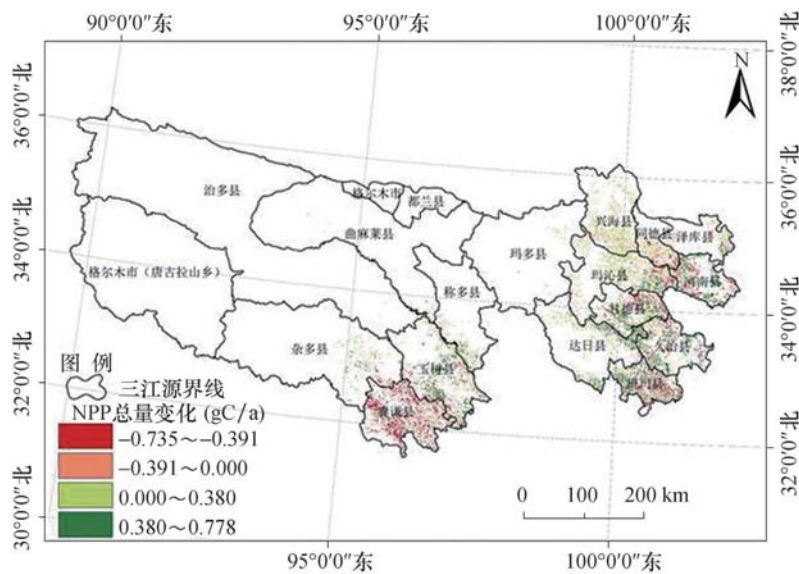


图 4-9 1988—2012 年三江源地区土地转移对林地 NPP 影响的空间分布

1988—2012 年林地与草地之间的转移较为显著(表 4-3),期间三江源地区毁林开荒使得林地面积减少 0.725Mhm²,占 1988 年林地总面积的 52.07%,林地 NPP 总量因此减少了 2.937TgC,占 1988 年林地 NPP 总量的比重达 53.59%,同时草地向林地的转移使得林地 NPP 增加了 0.958TgC,因此整体而言,毁林开荒并未导致林地 NPP 总量的减少;其次是未利用土地和林地之间的转移,约 0.025Mhm² 的林地转为未利用地,占 1988 年林地总面积的 1.77%,导致林地 NPP 减少 0.087TgC,占 1988 年林地 NPP 总量的 1.58%,同时,未利用土地向林地转移 0.056Mhm²,占林地总面积的 4.01%,为林地 NPP 总量增加了 0.169TgC,占 1988 年林地 NPP 总量的 3.08%;林地与建设用地的转移对林地 NPP 变化并不显著,而林地与耕地、水域之间的转移均对林地 NPP 产生了消极影响。

表 4-3 1988—2012 年三江源地区土地利用变化对林地 NPP 变化总量的影响

土地转移类型	转移面积 (Mhm ²)	转移比例 (%)	林地 NPP 变化 (TgC)	林地 NPP 变化率 (%)
耕地→林地	0.005	0.39	0.010	0.19
耕地→林地	-0.005	-0.39	-0.010	-0.19
林地→草地	0.725	52.07	2.937	53.59

续表

土地转移类型	转移面积 (Mhm ²)	转移比例 (%)	林地 NPP 变化 (TgC)	林地 NPP 变化率 (%)
草地→林地	0.958	68.83	3.641	66.43
草地→林地	0.233	16.76	0.704	12.84
林地→水域	0.023	1.62	0.080	1.46
水域→林地	0.006	0.42	0.019	0.35
水域→林地	-0.017	-1.21	-0.061	-1.11
林地→建设用地	0.000	0.01	0.000	0.01
建设用地→林地	0.000	0.03	0.001	0.02
建设用地→林地	0.000	0.02	0.001	0.01
林地→未利用土地	0.025	1.77	0.087	1.58
未利用土地→林地	0.056	4.01	0.169	3.08
未利用土地→林地	0.031	2.24	0.082	1.50
合计	0.243	17.42	0.716	13.05

二、气候变化对林地 NPP 的影响

气候变化对三江源地区林地 NPP 的影响整体呈现正向作用(图 4-10)。在空间分布上,以东部的兴海、同德、玛沁、甘德等县为林地 NPP 增长区域;而小块的负值区则镶嵌分布于其中,分布格局较为零散,且影响并不显著。

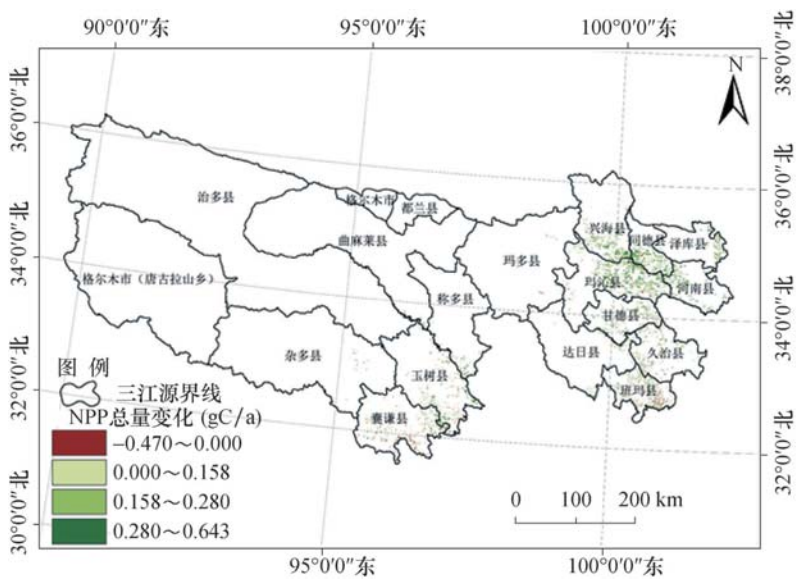


图 4-10 1988—2012 年三江源地区气候变化对林地 NPP 影响的空间分布

三、气候和土地利用变化对林地 NPP 变化的相对贡献

与耕地相似,1988—2012 年三江源地区林地 NPP 变化的影响因素仍以气候和土地利用变化共同作用为主(表 4-4),贡献率达 47.99%,使得林地 NPP 增加 1.738TgC,占 1988 年林地 NPP 的 31.70%;其次是气候变化的影响,贡献率 32.25%,气候变化导致林地 NPP 增加了 1.168TgC,占 1988 年林地总量的 21.30%;比较之下,土地利用变化对林地 NPP 的影响较小,贡献率为 19.76%,仅在土地转移的影响下,林地 NPP 增加了 0.716TgC,影响量仅占 1988 年林地 NPP 总量的 13.05%。

表 4-4 林地 NPP 变化因素分解

因素类型	NPP 变化(TgC)	贡献率(%)	变化量的比例(%)
气候变化	1.168	32.25	21.30
土地利用变化	0.716	19.76	13.05
气候变化和土地利用变化	1.738	47.99	31.70

第五节 气候变化和土地利用变化对草地 NPP 的影响

一、土地利用变化对草地 NPP 的影响

草地是三江源地区分布最广的土地利用类型。在空间分布上,土地利用转移对东部、南部和西部高海拔地区草地 NPP 产生负影响(图 4-11),其中南部的杂多、玉树、称多等县以及东部各县的草地 NPP 相较于西部高海拔地区的下降幅度更大;对于三江源中部和北部等县(如曲麻莱县、玛多县和唐古拉山乡的东部)草地 NPP 则为积极作用。

1988—2012 年草地和未利用地之间的转移较为显著(表 4-5),期间三江源地区草地面积向未利用地面积转移了 4.423Mhm²,占 1988 年草地总面积的 18.43%,草地 NPP 总量因此减少了 5.439TgC,占 1988 年草地 NPP 总量的比重达 11.15%,同时未利用地向草地的转移使得林地 NPP 增加了 4.348TgC,因此整体而言,草地和未利用地之间的相互转移使得草地的 NPP 总量减少;其次是草地和林地之间的转移,约 0.958Mhm² 的草地转为了林地,占 1988 年草地总面积的 3.99%,导致草地 NPP 减少 3.641TgC,占 1988 年草地 NPP 总量的 7.39%,同时,林地向草地转移了 0.725Mhm²,占草地总面积的 3.02%,为草地 NPP 总量增加了 2.937TgC,占 1988 年林地 NPP 总量的 5.96%,草地和林地之间的相互转移对草地的 NPP 有消极的影响;此外,草地和水域之间的相互转移对草地 NPP 也有一定的影响,草地向水域转移了 0.605Mhm²,占 1988 年草地总面积的 2.52%,导致草地 NPP 减少 0.935TgC,占

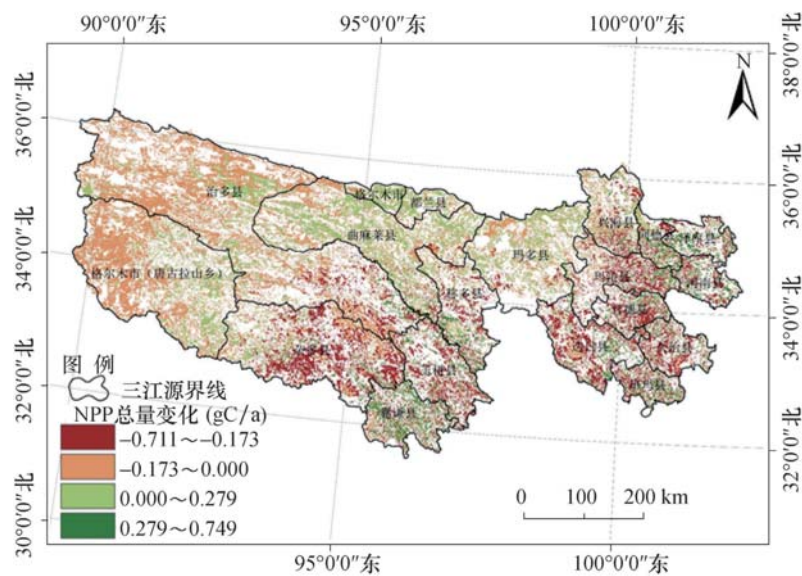


图 4-11 1988—2012 年三江源地区土地转移对草地 NPP 影响的空间分布

1988 年草地 NPP 总量的 1.90%，而水域向草地转移的面积为 0.387Mhm²，使得草地的 NPP 增加了 0.312TgC，因此草地与水域之间的转移不利 NPP 的增长；草地与耕地之间的转移也对草地 NPP 产生了消极影响；而草地与建设用地之间的转移对草地 NPP 的影响并不显著。总体来说，土地利用变化不利于草地 NPP 的增长。

表 4-5 1988—2012 年三江源地区土地利用变化对草地 NPP 变化总量的影响

土地转移类型	转移面积 (Mhm ²)	转移比例 (%)	草地 NPP 变化 (TgC)	草地 NPP 变化率 (%)
草地→耕地	0.057	0.24	0.128	0.26
耕地→草地	0.033	0.14	0.117	0.24
耕地转入(小计)	-0.024	-0.10	-0.011	-0.02
草地→林地	0.958	3.99	3.641	7.39
林地→草地	0.725	3.02	2.937	5.96
林地转入(小计)	-0.233	-0.97	-0.704	-1.43
草地→水域	0.605	2.52	0.935	1.90
水域→草地	0.387	1.61	0.312	0.63
水域转入(小计)	-0.218	-0.91	-0.623	-1.26
草地→建设用地	0.005	0.02	0.017	0.03
建设用地→草地	0.005	0.02	0.017	0.04
建设用地转入(小计)	0.000	0.00	0.001	0.00

续表

土地转移类型	转移面积 (Mhm ²)	转移比例 (%)	草地 NPP 变化 (TgC)	草地 NPP 变化率 (%)
草地→未利用土地	4.423	18.43	5.493	11.15
未利用土地→草地	4.169	17.38	4.348	8.82
未利用土地转入(小计)	-0.254	-1.06	-1.146	-2.33
合计	-0.729	-3.04	-2.483	-5.04

二、气候变化对草地 NPP 的影响

气候变化对三江源地区草地 NPP 的影响整体呈现正向作用(图 4-12)。草地 NPP 的影响量在空间分布趋势上呈由东向西递减的趋势,如泽库、同德和河南等县草地 NPP 的增加量远高于其他各县;而对于小块的负值区则镶嵌分布于其中,分布格局较为零散,其中班玛、久治和杂多等县分布较多。

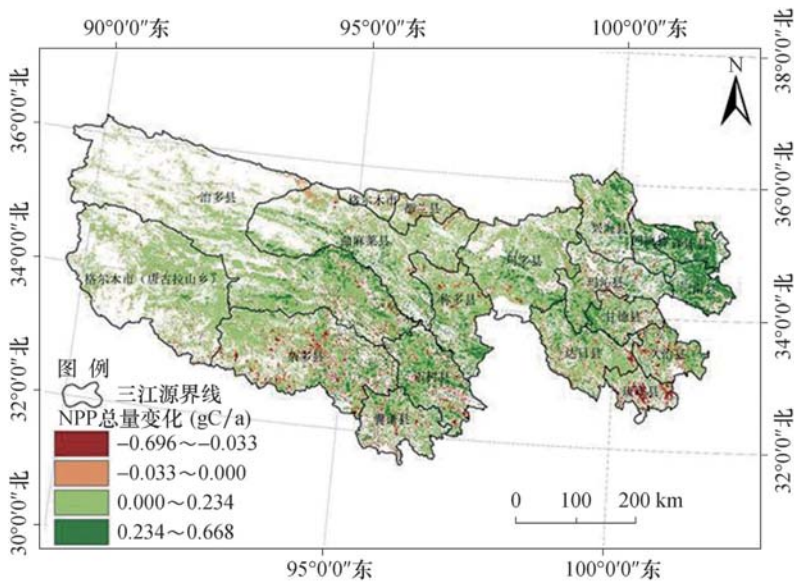


图 4-12 1988—2012 年三江源地区气候变化对草地 NPP 影响的空间分布

三、气候和土地利用变化对草地 NPP 影响的相对贡献

对草地 NPP 变化因素分解可知(表 4-6),仅在气候变化的影响下草地 NPP 增加 21.968TgC;而仅在土地转移的作用下,草地 NPP 总量减少了 2.483TgC;在气候变化和土地转移的共同作用下,耕地 NPP 增加了 4.692TgC。相较而言,气候变化对草地 NPP 的影响较大,贡献率达到 75.38%,影响量占 1988 年耕地 NPP 总量的 44.58%;其次是气候和土地利用变化的共同影响,贡献率达 16.10%,影响量占 1988

年草地 NPP 总量的 9.52%；而土地转移耕地相对较小，贡献率仅为 8.52%，影响量占 1988 年草地 NPP 总量的 5.04%。

表 4-6 草地 NPP 变化因素分解

因素类型	NPP 变化(TgC)	贡献率(%)	变化量的比例(%)
气候变化	21.968	75.38	44.58
土地利用变化	-2.483	8.52	5.04
气候变化和土地利用变化	4.692	16.10	9.52

第六节 气候变化对三江源地区草地 NPP 及牧民收入的影响

一、气候变化影响草地 NPP 生产

为分析气候变化对三江源地区草地生态系统服务功能的影响,选取草地 NPP 作为表征其生产功能的指标。首先采用多层次线性模型(Hierarchical Linear Modeling,HLM)模拟气候变化在不同尺度下对生态系统服务功能的作用机制,其次利用联立方程组方法,结合农户调查数据,分析牧民收入对气候变化的传导响应。

(一)建模分析

HLM 建模的数据基础是观测数据在不同水平上保持嵌套关系。本研究包含时间、小流域和县域的两层次面板数据(图 4-13),不同时间观测的面板数据作为第一

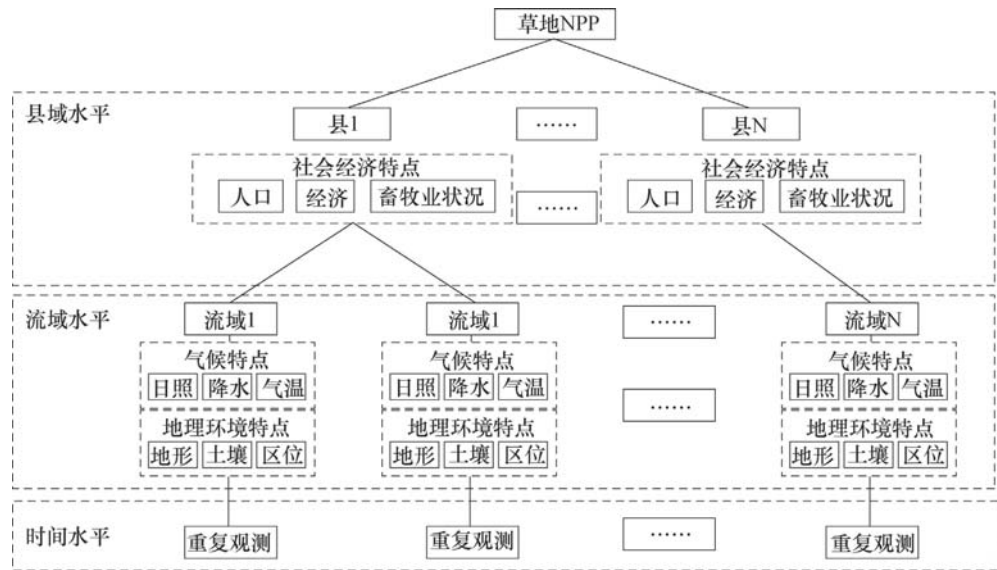


图 4-13 数据嵌套关系

层次嵌套于小流域中;具有不同气候及地理环境特点的小流域作为个体对象(第二层次)同时嵌套于不同的县域水平(第三层次)。因此,通过此嵌套关系既可分析气候变化对其不同小流域影响的趋势和差异,同时也可分解流域层次变量与县域层次变量中的交互作用。

为分析草地 NPP 的总体变异中不同层次间方差的比例,在传统 OLS 回归的基础上,分别引入小流域和县域截距项,建立三层随机截距模型(表 4-7)。

表 4-7 三层基本线性增长模型

层次	回归模型	残差方差	跨级相关
Level 1	$y_{ijk} = \beta_{0jk} + \beta_{1jk}(\text{year}) + \epsilon_{ijk}$	$\text{var}(r_{ijk}) = \sigma^2$	$\rho_1 = \sigma^2 / (\sigma^2 + \tau_{\beta 00} + \tau_{\pi 00})$
Level 2	$\beta_{0jk} = \gamma_{00k} + \mu_{0jk}; \beta_{1jk} = \gamma_{10k} + \mu_{1jk}$	$\text{var}(\mu_{0jk}) = \tau_{\beta 00}$	$\rho_2 = \tau_{\beta 00} / (\sigma^2 + \tau_{\beta 00} + \tau_{\pi 00})$
Level 3	$\gamma_{00k} = \pi_{000} + e_{00k}; \gamma_{10k} = \pi_{100} + e_{10k}$	$\text{var}(e_{00k}) = \tau_{\pi 00}$	$\rho_3 = \tau_{\pi 00} / (\sigma^2 + \tau_{\beta 00} + \tau_{\pi 00})$

注: i 为时间层次(Level 1); j 为小流域层次(Level 2); k 为县域层次(Level 3), β_{0jk} 为时间层次的随机效应, μ_{0jk} 为小流域层次的随机效应, e_{00k} 是县域层次的随机效应。不同层级间的关联度分别为 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 ,分别由各层自变量解释后的残差方差占总方差中的比例计算得到。

在确定三层随机截距模型之前,需要进行三层空模型的选择,即不含任何预测变量。以草地 NPP 为被解释变量,回归结果如表 4-8 所示。

表 4-8 三层空模型的回归结果

固定效应	log(NPP)	γ_{00k}	π_{000}	lnsig_e
截距项	5.361 ***	-0.0998	-0.0232	-0.598 ***
	(0.215)	(0.174)	(0.0162)	(0.00691)
观测样本数	12,648	12,648	12,648	12,648
组数	18	18	18	18
随机效应	估计值	标准误	[95%置信区间]	
县域层次:				
$\tau_{\beta 00}$	0.905	0.157	0.644	1.272
小流域层次:				
$\tau_{\pi 00}$	0.977	0.016	0.946	1.009
σ^2	0.550	0.004	0.542	0.557

注:①***, **, * 分别表示在 1%,5%和 10%水平上显著;②括号中为标准误差;③LR test vs. linear model;chi2(2) = 19268.30,Prob > chi2 = 0.000。

对空模型变异成分的 χ^2 检验结果可以看出,组间变异显著不为零。因此,应对数据的聚类性质进行调节,使得标准误差更为精确。其次,在空模型的基础上增加时间变量作为本次研究的条件模型。

$$\log (NPP)_{it}=\beta_0+\beta_1 (year)_{ij}+\mu_{0i}+\epsilon_{it} \quad (4-14)$$

$$\log (NPP)_{it}=\beta_0+\beta_1 (year)_{ij}+\beta_2 (year)_{ij}^2+\mu_{0i}+\epsilon_{it} \quad (4-15)$$

式中, μ_{0i} 为截距项, ϵ_{it} 为随机误差项, β_1 和 β_2 为回归系数; 式(4-15)是在式(4-14)基础上增加 $year^2$ 区分时间变量的线性效应和二次效应。另外,

$$\log (NPP)_{it}=\beta_0+\beta_1 (year)_{ijk}+\beta_2 (year)_{ijk}^2+\mu_{0jk}+e_{00k}+\epsilon_{ijk} \quad (4-16)$$

$$\log (NPP)_{it}=\beta_0+\beta_1 (year)_{ijk}+\beta_2 (year)_{ijk}^2+\mu_{0jk}+\mu_{1jk} (year)_{ijk}+e_{00k}+\epsilon_{ijk} \quad (4-17)$$

式中, μ_{0ik} 和 e_{00k} 分别为小流域和县域水平的截距随机项。式(4-17)是在式(4-16)的基础上增加了时间($year$)这个预测变量, 而 μ_{1ik} 为小流域水平的斜率随机项。

可以看出, $year$ 的一次及二次项对草地 NPP 具有显著影响(表 4-9)。模型 4 和 5 均采用多层次模型, 二者似然比为 1723.01, 且 Base_Model 5 的 p-value 在 0.0001 水平上显著。因此, 选择 Base_Model 5 作为本研究的基本模型。

表 4-9 基本模型的选择

$\log(NPP)$	Base_Model 1	Base_Model 2	Base_Model 3	Base_Model 4
截距项	4.299 ***	4.398 ***	5.029 ***	4.883 ***
	(0.039)	(0.039)	(0.217)	(0.176)
$year$	0.032 ***	0.000	0.000	0.001
	(0.001)	(0.002)	(0.002)	(0.002)
$year^2$		0.001 ***	0.001 ***	0.001 ***
		(0.000)	(0.000)	(0.000)
Log-Likelihood			-11817	-10956
χ^2	1784.62	3297.28	4315.13	2237.93
观测样本数	12648	12648	12648	12648

注:① *** 表示在 1%水平上显著;②括号中为标准误。

为更精确地在时间尺度上刻画区域气候变化对草地 NPP 的影响, 本次研究增加表征气候及草地变化的小流域时变量、地理环境特征的小流域时不变量以及县域社会经济时变量 3 类解释变量, 得到式(4-18):

$$\begin{aligned} \log (NPP)_{it} = & \beta_0 + \beta_1 (year)_{ijk} + \beta_2 (year)_{ijk}^2 + \sum_{p=1}^P \alpha_p X_{pijk} + \sum_{q=1}^Q \omega_q X_{qijk} + \sum_{r=1}^R \gamma_r Z_{rijk} \\ & + \mu_{0jk} + \mu_{1jk} (year)_{ijk} + e_{00k} + \epsilon_{ijk} \end{aligned} \quad (4-18)$$

式中, X_p 为年均气温、年均降水、年日照时数以及草地面积等小流域时变量; X_q 为高程、坡度、土壤肥力(N、P、K 含量)以及到高速公路、水源地以及省会城市距离的小流域时不变量; Z_r 为人口密度、地区生产总值(GDP)、畜牧业产值和大牲畜量等县域时变量; α_p 、 ω_q 和 γ_r 分别为回归参数。

(二) 变量选取

以 ArcGIS 分布式水文模型为支持平台,利用研究区地形数据 (DEM), 经过 DEM 预处理→确定水流方向→汇流累积量→提取河网→连接河网节点→确定盆地→得到研究区的小流域(图 4-14)。

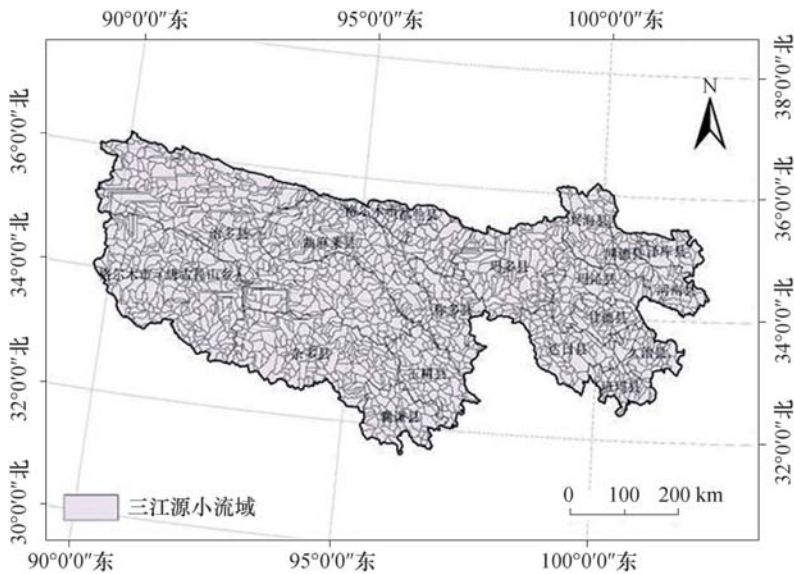


图 4-14 三江源地区小流域的分布情况

其次,提取 1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年 6 年包含草地 NPP、气候和草地变量、地形变量、土壤肥力(N、P、K 含量)、区位特征以及县域社会经济等面板数据(表 4-10),其中,社会经济数据已消除价格指数。

表 4-10 模型变量说明

层次	类型	变量	变量说明
小流域水平	时变量	草地 NPP	1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年流域草地平均 NPP(单位:gC/m ²)
		气温	1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年流域平均气温(单位:℃)
		降水	1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年流域平均年降水总量(单位:mm)
		日照时数	1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年流域平均年日照时数(单位:h)
	时不变量	区位特征	到邻近高速公路、水源地、省会城市的距离(单位:km)
		地形要素	流域平均高程和坡度(单位:m 和°)
		土壤肥力	流域土壤单位面积 N、P、K 含量(单位:%)

续表			
层次	类型	变量	变量说明
县域尺度	人口密度	时变量	1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年各县单位土地面积人口数(单位:万人/km ²)
	GDP		1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年各县生产总值(单位:万元)
	产肉量		1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年各县年末产肉总量(单位:t)
	大牲畜量		1988、1995、2000、2005、2008 和 2012 年各县年末大牲畜数(单位:万头)

(三)结果与分析

利用多层线性模型,依次加入小流域的气候变量(Model_1)、土地、区位和地形变量(Model_2)、土壤变量(Model_3)以及在 Model_1 的基础上增加县域的社会经济变量(Model_4),Model_5 为投入全部变量,得到模拟结果,如表 4-11 所示。

表 4-11 多层线性模型模拟结果

类型	变量	log(NPP)				
		Model_1	Model_2	Model_3	Model_4	Model_5
固定效应						
时间	<i>year</i>	0.013***	0.012***	0.012***	-0.007***	-0.009***
		(-0.002)	(-0.002)	(-0.002)	(-0.002)	(-0.002)
	<i>year</i> ²	0	0	0	0.001***	0.001***
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
气候	log(<i>rain</i>)	1.166***	1.160***	1.153***	1.077***	1.061***
		(-0.03)	(-0.031)	(-0.031)	(-0.03)	(-0.03)
	log(<i>ta</i>)	1.053***	1.052***	1.030***	1.499***	1.473***
		(-0.092)	(-0.092)	(-0.091)	(-0.1)	(-0.099)
	log ² (<i>ta</i>)	0.214***	0.185***	0.167***	0.099***	0.063*
		(-0.029)	(-0.032)	(-0.032)	(-0.032)	(-0.034)
	log(<i>shour</i>)	1.143***	1.202***	1.301***	0.663***	0.821***
		(-0.158)	(-0.158)	(-0.158)	(-0.151)	(-0.151)
土地	log(<i>pctgrass</i>)		-0.017	-0.029**		-0.024**
			(-0.013)	(-0.013)		(-0.012)
区位	log(<i>prefcap</i>)		-0.286**	-0.498***		-0.470***
			(-0.127)	(-0.125)		(-0.125)

续表

类型	变量	log(NPP)				
		Model_1	Model_2	Model_3	Model_4	Model_5
	log(<i>d2highw</i>)		0.987***	0.959***		1.101***
			(−0.178)	(−0.172)		(−0.172)
	log(<i>d2water</i>)		0.151***	0.150***		0.140***
			(−0.021)	(−0.021)		(−0.021)
地形	log(<i>slope</i>)		0.188***	0.086*		0.098**
			(−0.049)	(−0.049)		(−0.049)
	log(<i>dem</i>)		−0.954**	−0.106		0.052
			(−0.39)	(−0.388)		(−0.382)
土壤	log(<i>soil_N</i>)			0.263***		0.213***
				(−0.037)		(−0.037)
	log(<i>soil_P</i>)			0.231**		0.305***
				(−0.101)		(−0.1)
社会经济	log(<i>aGDP</i>)				−0.091***	−0.083***
					(−0.015)	(−0.015)
	log(<i>popden</i>)				−0.122***	−0.108***
					(−0.01)	(−0.01)
	log(<i>meat</i>)				0.297***	0.307***
					(−0.017)	(−0.017)
	截距项	−14.026***	−12.006***	−16.956***	−11.070***	−16.512***
		(−1.336)	(−3.346)	(−3.287)	(−1.293)	(−3.218)
	约束似然值	−9,237.11	−9,166.31	−9,064.02	−8,466.43	−8,304.76
	χ^2	7,345.92	7,530.01	7,867.74	8,646.77	9,165.61
	观测样本	12,647	12,639	12,625	12,220	12,198

注：①***，**，* 分别表示在 1%，5%和 10%水平上显著；②括号中为标准误。

1. 影响草地 NPP 的因素分解

(1)气候变化

降水是草地生长的重要限制因素之一。从模拟结果上看,降水对草地 NPP 的作用为显著正向作用。Model_5 中降水的弹性系数为 1.061,即降水每增加 1%,草地 NPP 增加 1.061%。

本研究模型包含气温变量的一次项和二次项。从模拟结果上看,不仅气温直接作用于草地 NPP 的积累,同时气温波动的幅度也对草地的 NPP 具有显著正向作用。Model_5 中气温的一次项和二次项分别为 1.473 和 0.063。

草地植被生物量的累计离不开光合作用,从模拟结果上看,日照时数草地 NPP 的具有显著地正向作用。Model_5 中日照时数的回归系数为 0.821,即日照时数每增加 1%,草地 NPP 增加 0.821%。

(2) 区位特征

模型中包含各流域到省会城市、高速公路和水源地的平均距离 3 个区位特征,用以表征各小流域受到人类活动的干扰以及草地的自然禀赋情况。从 Model_5 的模拟结果上看,到高速公路和水源地的距离的回归系数分别为 1.101 和 -0.140,即远离高速公路以及水源充足的地区有利于草地的生长;到省会城市距离的回归系数为 -0.470,与预期估计不符,究其原因主要是由于三江源地区相距拉萨和西宁两市较远的区域恰是气候较干旱的地区,不利于草地 NPP 的累积。

(3) 地形条件及土壤肥力

地形条件和土壤肥力是决定草地分布和产出的重要指标。从模拟结果上看,坡度和土壤肥力(N 和 P 的含量)均具有显著的正向作用,Model_5 的回归系数分别为 0.098、0.213 和 0.305,即研究区草地多分布于坡度微大且土壤肥力(N 和 P 的含量)较好的区域;相对于前者,高程变量在增加了社会经济变量后显著性降低。

(4) 社会经济系统

人类社会经济系统通过对生态系统的管理(如耕种、放牧、采伐森林等)最大化地从中获取所需的产品。然而,随着人口增长、社会发展以及消费需求的增加,扩大管理而忽视生态系统的自身运行方式,必然使其功能以及人类福祉受到威胁。三江源地区由于其独特的地理环境,使得以草地产出为依赖的畜牧业生产成为当地最重要的产业。本研究选择了人口密度、地区生产总值以及产肉量三个表征社会经济的指标。从 Model_5 中人口密度的回归系数上看,人口密度对草地 NPP 具有显著的影响,密度每增加 1%,其草地 NPP 减少 0.108%。近年来,三江源地区人口逐年递增,一方面城镇化快速发展,另一方面草地已成为城镇用地转移的主要来源,大量的草地被开垦或弃耕退化为裸地。与此同时,人类需要增加必将导致草地压力过大及耕地质量的下降。

地区生产总值(GDP)是反映区域经济总体状况的重要指标。对西部生态脆弱区而言,自然生态环境是社会经济系统重要的承载。从 Model_5 中 GDP 的回归系数上看,三江源地区经济发展对草地 NPP 具有显著的负向作用,地区生产总值每增加 1%,草地 NPP 减少 0.083%。近年来,三江源地区经济总体态势良好。从产业结构上看,2005 年以前第一产业是主要的经济驱动,此后第二产业逐渐替代为主导产业。但一方面,产业转型伴随着用地的转移,从而导致草地开垦和退化;另一方面,人类生活和工业生产也增加了对自然资源的攫取力度,导致草地 NPP 下降。

三江源地区畜牧业产值占农业总产值的比重高达 70%,是当地农业经济的重要组成部分,模型中的产肉量指标可反映畜牧业生产对草地 NPP 影响。从 Model_5

中产肉量的回归系数上看,该地区畜牧业发展对草地 NPP 具有显著的正向作用;一方面从畜牧业生产条件上看,位于三江源中、东部地区的中、高覆盖度草地相对于分布在西部高海拔的低覆盖度草地更适宜畜牧业的发展,不同盖度的草地叶面积和郁闭度导致草地 NPP 的差异;另一方面从畜牧业发展进程来看,三江源地区畜牧业生产从传统工业化畜牧业逐步向草地生态畜牧业过渡,在合理的草地载畜量范围内发展畜牧业生产,草畜业得以有序发展。

2. NPP 变化影响机制的尺度效应

表 4-12 反映了模型的变异分解情况。从 Model_5 的分解结果上看,县域层次上,小流域及县域影响因素分别解释了 NPP 变化的 26%和 53%,而时间因素影响不足 2%;其他没有观测因素的影响达 17%,这些因素可能来自于管理、政策干预或适应措施等方面。

表 4-12 多层次模型的随机效应

随机效应	Model_1	Model_2	Model_3	Model_4	Model_5
县域层次:					
$\tau_{\beta 00}$	0.293 (0.053)	0.408 (0.083)	0.370 (0.074)	0.328 (0.059)	0.399 (0.739)
小流域层次:					
$\tau_{\pi 00}$	0.832 (0.017)	0.805 (0.017)	0.773 (0.016)	0.874 (0.018)	0.811 (0.017)
σ^2	0.351 (0.003)	0.349 (0.003)	0.347 (0.003)	0.327 (0.003)	0.324 0.003

注:括号中数字为标准误差。

3. 草地 NPP 的因素分解

由表 4-13 对影响草地 NPP 变化的因素分解可以看出,1988—2012 年草地 NPP 增加了 53.26%,主要归因于气温升高、降水增加、人类扰动增多、载畜压力累积等。其中,气候变化(包括气温升高和降水增加)对草地 NPP 增加的贡献达到 21.93%,日照条件减弱对草地 NPP 减少了 10.54%;人类活动的增加不利于草地 NPP 的增加,贡献率达到-42.24%。此外,三江源地区管理、政策干预或适应措施的实施对于草地 NPP 的提高起到了极大的积极作用,贡献率达到 65.20%。

表 4-13 草地 NPP 变化影响因素分解

变量名	系数	1988—2012 年变化(%)	影响 NPP(%)	贡献率(%)
降水	0.1061	31.22	3.31	6.22
气温	1.473	6.01	8.85	16.62
气温二次项	0.063	-7.72	-0.49	-0.91

续表				
变量名	系数	1988—2012 年变化(%)	影响 NPP(%)	贡献率(%)
日照时数	0.821	-6.84	-5.62	-10.54
人口	0.108	71.74	7.75	14.55
GDP	-0.083	364.41	-30.25	-56.79
产肉量	0.307	113.91	34.97	65.65
其他因素				65.20
NPP		53.26		100

二、气候变化对牧民收入的影响

为了分析气候变化对牧民收入的间接影响,建立气候变化对牧民收入的联立方程组:

$$LP_{it} = \theta_0 + \theta_1 \lg NPP + \theta_2 Z_{it} + \theta_3 X_{it} + \epsilon_1 \tag{4-19}$$

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \lg NPP + \alpha_2 Z_{it} + \alpha_3 X_{it} + \epsilon_2 \tag{4-20}$$

本节将农牧民的资产代替农牧民的收入,以农牧民收入作为解释变量,同时,考虑牧民生产特征、草地特征,同时引入气候特征、区位特征,建立牧民收入的气候变化联立方程模型,变量选取如表 4-14 所示。对模型的因变量进行描述,并对各个变量的预期影响做出预测,认为家庭人口、草地面积、NPP、气温、降水以及农贸市场、省会城市和水源地距离、牦牛的存栏量对家庭的收入具有正向影响,同时出栏量的平均重量对牧民收入有正向影响,而存栏的平均重量则对其有负向影响。

对农户人口、草地占有面积、草地 NPP、年平均气温、年平均降水以及到农贸市场距离、到省会城市距离和到水源地距离、牛的存栏量进行联立方程回归,剔除不显著变量,得到农户资产方程的回归结果(表 4-15)。

表 4-14 变量描述性统计

变量类型	变量	代码	单位	平均值	标准差
被解释变量	资产	<i>Pro</i>	万元	1.5×10^6	1.33
农户特征	农户人口	<i>Pop</i>	人	4.73	1.79
草地特征	草地面积	<i>GArea</i>	hm ²	806.04	812.03
气候特征	草地 NPP	<i>Gnpp</i>	kg/hm ²	631.83	75.53
	降水	<i>Rain</i>	mm	4817.31	512.93
	气温	<i>Tamean</i>	℃	4.25	10.21
区位特征	到水源地距离	<i>d2water</i>	km	82.94	22.77
	到农贸市场距离	<i>d2market</i>	km	18.01	25.58
	到省会城市距离	<i>d2PVCAP</i>	km	16.42	35.53

续表					
变量类型	变量	代码	单位	平均值	标准差
生产特征	牦牛存栏量	<i>Tmao</i>	头	43.24	59.53
	牦牛存栏平均重量	<i>Tweight</i>	kg	191.29	146.60
	牦牛出栏平均重量	<i>Toweight</i>	kg	180.17	191.56

表 4-15 牧民收入对气候变化的响应结果

变量类型	变量	系数
农户特征	家庭人口	4.02E-05
草地特征	草地面积	0.08
	草地 NPP	4.074 ***
气候特征	降水量	-0.024 ***
	气温	1.32E-04
生产特征	牦牛出售平均重量	6.523 ***
区位特征	距离农贸市场距离	-5.69E-05
	距离省会城市距离	0.001 ***
回归统计	约束似然值	401.2
	χ^2	958.646
	观测样本	142

注：*** 表示在 1%水平上显著。

结果表明：出栏的平均重量对牧民收入有正向影响。降水的增加对牧民收入具有负向影响，该结果与降水对草地 NPP 的响应不一致，可能的原因是，在调研区内降水的分布与农牧民生产活动密集的区域不一致，导致回归结果具有差异。而农户家庭人口、草地 NPP、气温对农牧民家庭收入有正向影响。在区位上，距离农贸市场越近，对农户收入影响越大，其影响结果远大于到省会城市的距离，由于到主要道路和主要水源地的距离极不显著，故剔除。