

## 第七章 结论与讨论

### 第一节 三江源土地利用变化及其生态效应

#### 1. 三江源地区气候呈暖湿化趋势

通过分析三江源地区的气象数据得知,近 20 年来,三江源地区的气温、降雨、日照时数变化存在时空异质性。三江源地区年均气温为 $-3.03^{\circ}\text{C}$ ,气温波动在 $-13.34\sim 4.98^{\circ}\text{C}$ ,在空间上,东部和东南部的气温相对较高,西部海拔较高的区域气温则较低,时间上,三江源地区的平均气温呈波动上升趋势,变化较为显著,平均气温增加了约 $0.89^{\circ}\text{C}$ ,增幅达到了 23.16%,高温主要出现在 7 月,而在 12 月至次年 1 月期间气温达到最低值,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 $0^{\circ}\text{C}$ 以下。

三江源地区降雨量相对较少年平均降雨量在 $144.16\sim 728.51\text{mm}$ ,空间上,呈自东南向西北递减的趋势,降雨集中于 6—9 月,南部降雨量最多,年均 700mm 以上,北部地区降雨量最少,年均降雨量则在 300mm 以下;时间上,三江源地区平均年降雨量呈波动上升趋势,总体增幅较小,并且近 10 年年均降水量的波动幅度显著地大于 2000 年以前。

#### 2. 农业经济驱动三江源地区土地利用的变化

三江源地区主要以草地为主,面积占比在 67%以上,其次是未利用地,而其他四类用地所占的比例较少。随着经济的发展和人类活动的增加,三江源地区各类用地发生了程度不一的变化,不同时期段,土地利用变化情况不一样,1988—1995 年,林地、水域和未利用地在减少,而耕地、草地和建设用地在增加;1995—2000 年,仅有草地呈减少的趋势,其他五类用地都有不同程度的增长;2000—2005 年,耕地、水域、建设用地呈增长趋势,而林地、草地、未利用地则不断减少;2008—2012 年,耕地、林地、水域面积在不断增长,草地、建设用地和未利用地在减少。总的来说,从 1988 年到 2012 年,耕地、林地、水域面积呈增长趋势,而草地、建设用地和未利用地则呈减少趋势;耕地呈一直增长趋势,林地呈波动型增长,水域先减少后增加的趋势,草地和建设用地则是先增加后减少,未利用地则是减少后增加之后再减少。

#### 3. 净初级生产力呈增加趋势且气候变化作用显著

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。1988—2012 年,三江源地区的植被年均 NPP 呈波动上升趋势,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  $1.97\%$ 。

具体来说,土地利用变化不利于耕地 NPP 的增长,贡献率为  $1.11\%$ ,气候变化则有利于耕地 NPP 的增长,其贡献率达  $40.60\%$ ,在土地利用变化和气候变化的协同作用下,耕地的 NPP 呈增长的趋势,贡献率达到  $58.29\%$ ;相比之下,土地利用变化和气候变化协同作用对耕地 NPP 的影响最大,而土地利用变化对耕地 NPP 的影响则不明显。

土地利用变化、气候变化、土地利用变化和气候变化的协同作用皆对林地 NPP 的影响有积极的影响。其中,土地利用变化和气候变化协同作用对林地 NPP 增长的贡献率达  $47.99\%$ ,气候变化贡献率也达到了  $32.25\%$ ,而土地利用变化对林地 NPP 的影响相对较小,其贡献率仅有  $19.76\%$ 。

气候变化、土地利用变化和气候变化的协同作用对草地 NPP 的增长起积极作用,其中气候变化的贡献率最大,达到了  $75.38\%$ ,气候和土地利用变化的共同影响,其贡献率也达到了  $16.10\%$ ;而仅在土地转移的作用下,草地 NPP 总量减少了  $2.483\text{TgC}$ ,贡献率仅为  $8.52\%$ ,影响量占 1988 年草地 NPP 总量的  $5.04\%$ ,土地利用变化虽不利于草地 NPP 的增长,但是其影响也不太显著。

#### 4. 气候变化对草地 NPP 和牧民收入存在正向作用

多层次建模分析结果显示,气候因素对草地 NPP 的影响占总体的  $21.93\%$ ,且社会经济、区位特征以及其他自然条件因素也是显著影响草地 NPP 的变化。社会经济的发展显著不利于有草地 NPP 的提高,而暖湿化的气候变化特征促进了草地的生长和发育。牧民收入与草地生长具有显著的正相关,区位特征、出栏重量等均有利于牧民的增收,牧民的增收另一方面也增加了草地 NPP 的供给压力。

## 第二节 喀斯特山区土地利用变化及其生态效应

1. 从 1990—2010 年,喀斯特山区除了土壤保持量在增加之外,产水量、营养截留量和碳储量均有不同程度的减小。

1990—2010 年,产水量大致呈现出由西北向东南方向递增的趋势,数量上,平均产水量减少了  $24.50\text{mm}$  ( $2.47\%$ );西北部、中部和西南部坡度较高的地区为土壤保持量的高值区,而北部、南部和东南部地势较为平坦的区域为土壤保持量的低值区,数量上,土壤保持量大致呈增长的趋势,约  $29295.05\text{t}/\text{km}^2$  ( $39.43\%$ );碳储量大致呈两头低中间高的趋势,数量上,平均碳储量减少了  $10.34\text{kg}/\text{km}^2$  ( $0.34\%$ );喀斯特山区大部分地区营养截留量都在  $1000\text{kg}/\text{km}^2$  以下,仅有少量大于  $1000\text{kg}/\text{km}^2$  的区域零星分布于整个区域,数量上,营养截留量呈波动型下降趋势,平均营养截留量减少了  $7.12\text{kg}/\text{km}^2$  ( $1.16\%$ )。

2. 耕地和林地的各项生态服务功能相对均衡,林地的各项生态服务功能除产水能力外其他 3 项能力均较大,水域的 4 项生态服务能力均较小,而建设用地和未利用

地仅产水能力相对较大。

各土地利用类型的各项生态服务功能均不一样,可以用土地利用类型解释生态服务功能的差异。耕地和草地的各项生态服务功能相对均衡,营养截留能力最大分别为 0.2659、0.2690,产水能力最小分别为 0.1623、0.1653;而林地的各项生态服务功能除产水能力外其他 3 项供给能力均较大,皆在 0.2 以上,产水能力(0.4867)最大;水域的 4 项生态服务供给能力均较小,都不超过 0.2,碳储能力几乎为 0;而建设用地和未利用地的产水能力相对较大,分别为 0.1996、0.1731,其他 3 项供给能力均较小,均不超过 0.15,碳储能力几乎为 0。

3. 生态服务功能存在明显的梯度效应,海拔越高,产水量越小,碳储量和营养截留量则呈现出波动减少的趋势,土壤保持量随海拔升高变化不显著。

海拔越高,产水量越小,从低到高四个梯度多年平均产水量分别为 1077.32mm、947.28mm、827.42mm、799.29mm;碳储量和营养截留量呈现出波动减少的趋势,从低到高四个梯度多年平均碳储量分别为 2981.04t/km<sup>2</sup>、3297.80t/km<sup>2</sup>、3022.75t/km<sup>2</sup>、2939.60t/km<sup>2</sup>;从低到高四个梯度多年平均营养截留量分别为 678.02kg/km<sup>2</sup>、566.56kg/km<sup>2</sup>、628.15kg/km<sup>2</sup>、460.40kg/km<sup>2</sup>;土壤保持量随海拔升高变化不显著。海拔从低到高四个梯度多年平均土壤保持量分别为 77926.57t/km<sup>2</sup>、100627.01t/km<sup>2</sup>、81485.69t/km<sup>2</sup>、91442.87t/km<sup>2</sup>。

4. 在空间尺度上,产水量和土壤保持、产水量和营养截留、碳储量和产水量、土壤保持和营养截留均存在权衡关系,而碳储量和营养截留、碳储量和土壤保持存在协同关系。

土壤保持量、营养截留量、碳储量的增加均不利于产水量的增加,根据各生态服务功能的生产可能性边界曲线可知,要实现 20000 t 的土壤保持量的增量,不同阶段产水量的减少量分别为 80.00mm、144.00mm、208.00mm 则可以实现;要实现 100×10<sup>2</sup>kg 营养截留量的增长,不同阶段产水量的减少量分别为 59.18mm、95.18mm、131.18mm;要实现 1000 t 碳储量的增长,不同阶段产水量减少的量分别为 3.38mm、15.02mm、26.67mm 才能实现;土壤保持量的增加亦不利用营养截留量的增加;要实现 20000 t 土壤保持量的增加,不同阶段营养截留量减少的量分别为 80×10<sup>2</sup>kg、49×10<sup>2</sup>kg、42×10<sup>2</sup>kg。

碳储量和土壤保持、碳储量和营养截留存在协同关系,增加 1000t 碳储量,不同阶段土壤保持量的增量分别为 45137.00t、25346.00t、5555.00t;增加 1000t 碳储量,营养截留量的增量分别为 61.29×10<sup>2</sup>kg、100.67×10<sup>2</sup>kg、140.05×10<sup>2</sup>kg。

5. 模拟喀斯特山区自然增长情景、经济发展情景和生态保护情景下生态服务功能,经济发展情景下喀斯特山区生态系统总体效益最佳。

根据生态系统服务功能情景模拟标准化数据,经济发展情景下,喀斯特山区生态服务功能总量最大(2.2668),总体效益最佳,实际情景与自然增长情景生态服务功能总量相当,分别为 2.0279、2.0272,而生态保护情景生态服务功能总量最小(2.0000),

总体效益最少。与实际情景相比较,经济发展情景下,平均产水量、平均土壤保持量、平均碳储量、平均营养截留量分别增加了 19.96mm(1.34%)、-368.92t/km<sup>2</sup>(-0.36%)、-198.87t/km<sup>2</sup>(-6.47%)、45.51kg/km<sup>2</sup>(7.51%)。

### 第三节 黑河流域土地利用变化及其生态效应

1. 2007—2014 年黑河流域玉米和油菜的种植面积及种植比例呈增加趋势,小麦和大麦的种植面积及种植比例呈减少趋势。

2007—2014 年,黑河流域的农作物种植以玉米、小麦、大麦和油菜为主,玉米和油菜的种植面积及种植比例均呈现增加趋势,小麦和大麦的种植面积及种植比例均呈现减少趋势。其中,2012—2014 年玉米和油菜种植面积和种植比例的增加速度较之 2007—2012 年有所加快,然而 2012—2014 年小麦和大麦种植面积和种植比例的减少速度较之 2007—2012 年要慢。玉米主要分布于甘州区、临泽县、高台县、肃州区和金塔县,小麦、大麦和油菜主要分布于民乐县和山丹县,其中 2007—2014 年玉米在民乐县和山丹县的分布有所增加。玉米、小麦、大麦和油菜这四种主要农作物之间相互的种植类型转移较少,主要是与其他农作物的相互转移。整体上,玉米呈现出集中种植趋势,小麦、大麦和油菜呈现分散种植趋势;玉米种植的优势度高于小麦、大麦和油菜且呈增加趋势,小麦、大麦和油菜的种植优势度呈减少趋势;玉米在耕地景观中具有最好的连通性,是各类农作物之间能量与物质交互的不可或缺的通道,油菜表现出越来越好的连通性,小麦和大麦的连通性总体呈现下降趋势;耕地景观的农作物种植多样性呈现增加趋势,人类生产活动的干预使耕地景观的农作物分布趋于破碎化、多样化。

2. 农作物种植结构是农户对种植农作物类型的理性选择的结果,农作物种植结构变化是农户更理性种植的宏观表现。

社会经济因素、政策因素、自然条件因素和其他因素共同影响着农户对种植农作物类型的理性选择,从而导致黑河流域呈现出玉米和油菜种植面积增加、小麦和大麦种植面积减少的农作物种植结构变化特征。社会经济因素是最直接、最主要的因素,主要从经济效益、劳动力限制和食品消费结构改变等方面影响农户的理性选择,具有较高比较收益的经济作物(制种玉米和油菜)往往是优先于粮食作物(大麦和小麦)的种植选择,但由于劳动力的限制和家庭基础食物需求,粮食作物仍存在一定面积的种植。政策鼓励和补贴有效地增加了农户进行农作物种植的经济收益和积极性,尤其我国农业各项补贴更倾向粮食作物,这也在一定程度上保障了粮食作物的种植。自然条件方面,水资源是制约黑河流域农业生产的最主要因素,尤其是农业灌溉用水的时空分布不均,空间上的分布不均导致了各类农作物明显的空间分异规律,需水较多的玉米主要种植在灌溉水资源较易获取的地区,小麦、大麦和油菜分布在灌溉水资源较难获取的地区;时间上的分布不均(来水主要集中于 7—9 月)导

致了秋熟作物玉米和油菜(主要需水期为7、8月)种植面积的增加、夏熟作物小麦和大麦(主要需水期为5、6月)种植面积的减少;其次,气候变暖对喜温作物玉米的种植有利,气候变暖还致使黑河流域无霜期呈现变短趋势,为玉米和油菜向高海拔地区的种植扩张以及玉米向高纬度地区的种植扩张提供了有利条件。此外,耕地地理区位(地形、交通)、生产者特征(文化程度、兼业情况、风险投资偏好)、家庭特征(人口构成、饮食习惯、饲养牲畜数量、经济条件、耕地面积)等其他因素也对农户的农作物种植类型的理性选择造成了一定的影响。

3. 黑河流域农作物种植结构变化促使了耕地生态服务价值的增加。

2007—2014年期间黑河流域呈现的玉米和油菜种植面积和种植比例增加、小麦和大麦种植面积和种植比例下降的农作物种植结构变化,导致玉米和油菜的生态服务价值呈增加趋势、小麦和大麦的生态服务价值呈减少趋势,耕地生态服务价值呈增加趋势。小麦和大麦向玉米和油菜的种植类型转移,不仅有利于提高农户进行农作物种植的经济收益、缓解农业灌溉用水在时间上的矛盾,而且有助于提高耕地生态系统的服务价值。

未来全球人口增长和气候变化,必将加剧区域和全球食物生产与水消耗的矛盾,尤其将加深生态脆弱的干旱半干旱区的食物和水短缺问题。在干旱半干旱区开展农业生态系统用水效率研究,对维持区域粮食和水安全至关重要。为此,我们集成多种模型和方法,模拟并分析了2007—2012年黑河流域的作物产量、耗水量和用水效率的时空格局,揭示了用水效率空间异质性及其原因。基于本研究的结果,我们提出了减少农业水浪费、提升用水效率的政策建议,这可为农业生态系统可持续管理提供科学支撑。

2007—2012年,黑河流域玉米产量和耗水量均大于小麦、大麦、油菜和其他作物。玉米和大麦的平均产量分别小幅减少 $39.49\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $87.24\text{kg}/\text{hm}^2$ ,油菜、小麦和其他作物分别增产 $192.72\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $75.46\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $40.25\text{kg}/\text{hm}^2$ 。玉米平均耗水量增加 $95.64\text{mm}$ ,小麦、油菜、大麦和其他作物的平均耗水量分别减少 $95.78\text{mm}$ 、 $58.71\text{mm}$ 、 $40.63\text{mm}$ 和 $32.60\text{mm}$ 。小麦、油菜、大麦和其他作物的平均用水效率分别增加 $21.13\%$ ( $106.54\text{g}/\text{m}^3$ )、 $21.44\%$ ( $81.54\text{g}/\text{m}^3$ )、 $4.96\%$ ( $27.12\text{g}/\text{m}^3$ )和 $6.02\%$ ( $30.22\text{g}/\text{m}^3$ )。在制种玉米种植比例增加、流域降水减少和气温升高的共同影响下,玉米的平均用水效率减少 $10.68\%$ ( $78.58\text{g}/\text{m}^3$ )。然而,由于玉米的用水效率远大于其他几种作物,以玉米扩张为主要特征的农作物种植结构变化,导致流域农业生态系统的平均用水效率小幅增加 $3.36\%$ ( $19.90\text{g}/\text{m}^3$ )。由于作物耗水量远大于实际需水量,玉米耗水量增加导致的其他几种作物耗水量减少,对作物产量影响极小。作物用水效率因此呈现出由耗水量主导的空间分异,即耗水量减少区的用水效率增加、耗水量增加区的用水效率减少。这种空间异质性随种植结构调整和气候波动而变化。

虽然玉米的产量和用水效率最高,但其耗水量远大于其他几种作物,且用水效

率下降。遏制玉米和耕地扩张、调整种植节水性高用水效率作物是保障黑河流域和相似干旱半干旱地区粮食、水和生态安全的重要前提。若根据作物实际需水制定灌溉制度,2007 年和 2012 年黑河流域农业生态系统可分别节水  $1619.24 \times 10^6 \text{ m}^3$  和  $1564.33 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 分别占流域总耗水量的 32.52% 和 30.06%; 流域用水效率能提升 48.33% 和 43.12%, 其中玉米用水效率能提升 71.80% 和 81.44%。增加灌溉成本、提高公众认识、增强用水监督, 有利于提高农民节水意愿和保障科学灌溉制度的执行。在减少农业用水浪费的基础上增加作物产量、减少作物产量差, 将进一步提升农业生态系统用水效率。