

## 西安市主要农作物秸秆资源量估算及能源化潜力分析

王涛<sup>1</sup>, 常小箭<sup>1</sup>, 黄宗华<sup>2</sup> (1. 陕西省西安市农业技术推广中心, 陕西西安 710061; 2. 陕西省户县农村能源办公室, 陕西西安 710300)

**摘要** [目的]正确评价西安市主要农作物秸秆资源量及其分布特性,充分认识西安市秸秆资源的开发潜力。[方法]以草谷比法为基础方法,对西安市主要农作物秸秆资源进行全面系统的估算,并分析各区县秸秆资源量分布。[结果]2015年西安市主要农作物秸秆理论资源量211.93万t,可收集资源量为175.95万t,可能源化利用量为149.55万t,可转化能源量82.35万t标准煤;小麦秸秆量占总量的55.4%,玉米秸秆占总量的43.6%,棉花、油菜占总量的1.0%。临潼、长安、户县的秸秆资源量分布较大,分别占比为18.0%、19.0%、17.0%。西安市年平均秸秆的化石能源替代量88.83万t,全部转化为经济价值相当于节约5.49亿元的煤炭消耗。[结论]该研究可为西安市秸秆资源的综合利用提供借鉴。

**关键词** 秸秆资源;估算;区域分布;草谷比;能源;西安市

**中图分类号** S210.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)16-0073-05

### Estimation of Main Crop Straw Resources and Analysis of Energy Potential in Xi'an

WANG Tao<sup>1</sup>, CHANG Xiao-jian<sup>1</sup>, HUANG Zong-hua<sup>2</sup> (1. Xi'an Agricultural Technology Extension Center, Xi'an, Shaanxi 710061; 2. Rural Energy Office of Hu County, Huxian, Shaanxi 710300)

**Abstract** [Objective] To correctly evaluate the amount and distribution characteristics of main crop straw resources in Xi'an, and to fully understand the development potential of straw resources in Xi'an. [Method] Based on the method of straw to valley ratio, the crop resources of main crops in Xi'an were estimated comprehensively and systematically, and the amount of straw resources in each county was analyzed. [Result] In 2015, theoretical resources of main crop stalks was 2119.3 thousand tons, the amount of resources to be collected was 1759.5 thousand tons, the amount of potential utilization was 1495.5 thousand tons, amount of energy to be converted was 823.5 thousand tons. Wheat straw accounted for 55.4% of the total, corn straw accounted for 43.6% of the total, cotton, rape accounted for 1% of the total. The distribution of straw in Lintong, Changan and Huxian was relatively large, accounting for 18.0%, 19.0% and 17.0%, respectively. Annual average straw fossil energy replacement capacity of 888.3 thousand tons, all translated into economic value, equivalent to saving 549 million yuan of coal consumption in Xi'an. [Conclusion] The study can provide reference for the comprehensive utilization of straw resources in Xi'an.

**Key words** Straw resources; Estimate; Regional distribution; Grass valley ratio; Energy; Xi'an City

近年来,为了应对突出的能源危机和气候变化,我国已通过立法将可再生能源开发利用列为能源发展的优先领域<sup>[1]</sup>。西安市作为一个农业、经济和能源消费较大的城市,其丰富的生物质能资源的开发利用显得尤为重要,特别是农作物秸秆资源,若将其合理高效地利用起来,不仅能够促进农业和农村经济可持续发展,减少污染,还能为建立资源节约型社会的能源工程提供新途径<sup>[2]</sup>。但是由于秸秆资源分布分散、统计困难,截至目前对西安市秸秆资源量缺乏系统研究。基于此,笔者对西安市主要农作物秸秆进行了调查,并对农作物秸秆进行了全面科学的评价。

## 1 资料与方法

**1.1 资料来源** 资源来源于《2015年西安市统计年鉴》中各区、县主要农作物产量数据。

**1.2 农作物秸秆理论资源量计算** 农作物秸秆是农作物去除根系和果实之后的剩余部分。农作物秸秆理论资源量即农作物秸秆产量,通常通过农作物产量和草谷比系数计算而得。计算公式如下:

$$CR = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_i$$

式中,CR为区域内农作物秸秆理论资源量;*i*为农作物种类,*i*=1,2,3,⋯,*n*;Q<sub>*i*</sub>为区域内第*i*种农作物的产量;*r<sub>i</sub>*为第*i*种农作物秸秆的草谷比系数。

**1.3 农作物秸秆可收集资源量计算** 农作物秸秆的可收集

资源量,即在理论资源量中扣除留茬、收集过程中损失的穗轴、枝梗等无法从田间收集的部分。农作物秸秆的可收集资源量通过秸秆资源总产量和可收集系数来计算。计算公式如下:

$$CR_a = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_i \cdot f_i$$

式中,CR<sub>*a*</sub>为区域内秸秆可收集资源量;*f<sub>i</sub>*为区域内第*i*种秸秆的可收集系数。

**1.4 农作物秸秆可能源化利用量计算** 农作物秸秆可能源化利用量,即在秸秆可收集量中扣除用于饲养牲畜、工业生产、还田、食用菌基料和农户生活能源后剩余的部分。农作物秸秆可能源化利用量通过秸秆可收集资源量和可能源化利用系数来计算。计算公式如下:

$$CR_c = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_i \cdot f_i \cdot \lambda_i$$

式中,CR<sub>*c*</sub>为区域内农作物可能源化利用量;*λ<sub>i</sub>*为区域内第*i*种农作物秸秆的可能源化利用系数。

**1.5 农作物秸秆可转化能源量计算** 农作物秸秆可转化能源量是在秸秆可能源化利用量的基础上,通过各种农作物秸秆的折标煤系数计算。计算公式如下:

$$CR_e = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_i \cdot f_i \cdot \lambda_i \cdot \eta_i$$

式中,CR<sub>*e*</sub>为农作物能源量;*η<sub>i</sub>*为第*i*种农作物的折标煤系数。

**1.6 草谷比系数、可收集系数、可能源化利用系数、折标煤系数的确定**

**1.6.1 草谷比系数** 草谷比系数是农作物单位面积秸秆产

量与籽粒产量的比值<sup>[2]</sup>。在不同地域、气候、农作物品种、耕作制度、收集方式和测量方法下,农作物的草谷比系数差异明显。草谷比系数的差异对农作物秸秆理论资源量的估算产生较大影响,因而确定合理的草谷比系数尤为重要。根据王晓玉等<sup>[3]</sup>和李逸辰<sup>[4]</sup>的研究,确定西安市农作物秸秆草谷比系数,即小麦 1.27,稻谷 0.94,玉米 1.10,棉花 2.62,油菜籽 2.57。

**1.6.2 可收集系数。**秸秆可收集系数是指单位面积内秸秆可收集量占秸秆总产量的比例,即秸秆可收集系数 = ( 秸秆总产量 - 留茬量 - 穗轴枝梗损失量) / 秸秆总产量。在人工收割和机械收割 2 种不同收获方式下秸秆留茬量不同。穗轴枝梗损失量指秸秆自然脱落和收获运输中的损失量。毕于运<sup>[5]</sup>对我国主要农作物秸秆可收集利用系数进行估算时考虑较全面,同时参考陕西省农业机械化信息网的相关政策,分析具体实际情况后选用王亚静等<sup>[6]</sup>对农作物秸秆收集系数的研究数据,即小麦 0.83,稻谷 0.83,玉米 0.83,棉花 0.90,油菜籽 0.85。

**1.6.3 折标煤系数。**农作物秸秆的折标煤系数是农作物秸秆热值与标准煤热值的比值。各农作物的热值取值范围在

低位热值和高位热值之间,且不同的研究热值取值范围不同。该研究中稻谷、小麦、玉米、棉花秸秆的折标煤系数根据《2014 年中国能源统计年鉴》<sup>[7]</sup>获得,油菜籽的秸秆折标煤系数根据韦茂贵<sup>[8]</sup>等统计的各农作物热值范围,取加权平均值,即小麦 0.55,稻谷 0.46,玉米 0.55,棉花 0.63,油菜籽 0.61。

## 2 结果与分析

### 2.1 测算结果

**2.1.1 农作物秸秆理论资源量。**由秸秆产量的计算公式得出,各类农作物秸秆产量即为农作物产量与草谷比之积,为了研究秸秆资源量随时间的变化趋势,选取 2008—2015 年的统计数据,计算西安市主要农作物秸秆产量(表 1)。由表 1 可知,西安市主要秸秆资源来自小麦和玉米,占农作物秸秆资源总量的 99%。其中,小麦年平均 120.75 万 t,占秸秆总量的 53%;玉米年平均 103.83 万 t,占秸秆总量的 45%;其他谷类年平均 3.88 万 t,占秸秆总量的 2%。2008—2015 年农作物秸秆理论产量有所下降,由 2008 年的 252.32 万 t 下降至 2015 年的 211.93 万 t。

表 1 2008—2015 年西安市主要农作物秸秆理论资源量

Table 1 Theoretical resources of main crop stalks of Xi'an during 2008 - 2015

万 t

年份 Year	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	秋粮(玉米) Autumn grain crops (Corn)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
2008	134.11	0.85	113.30	1.62	2.44	252.32
2009	129.67	0.85	120.45	1.65	2.39	255.00
2010	134.37	0.75	119.79	1.57	2.57	259.05
2011	113.89	0.63	93.83	1.47	2.44	212.26
2012	120.55	0.54	98.22	1.23	2.26	222.80
2013	105.12	0.37	101.01	0.66	2.24	209.39
2014	110.93	0.24	91.63	0.08	2.06	204.93
2015	117.35	0	92.44	0.08	2.06	211.93

**2.1.2 农作物可收集资源量。**可收集系数与草谷比一样,不同学者对收集系数的研究都有不同的结果,根据可收集系数可计算出 2008—2015 年西安市主要农作物的可收集资源

资源量,结果见表 2。由表 2 可知,可收集资源量和农作物秸秆理论资源量变化规律一致。

表 2 2008—2015 年西安市主要农产品可收集资源量

Table 2 Amount of resources to be collected of main crop stalks of Xi'an during 2008 - 2015

万 t

年份 Year	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	秋粮(玉米) Autumn grain crops (Corn)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
2008	111.31	0.70	94.04	1.46	2.08	209.59
2009	107.62	0.70	99.97	1.49	2.03	211.82
2010	111.52	0.62	99.43	1.41	2.18	215.17
2011	94.53	0.52	77.88	1.32	2.08	176.33
2012	100.06	0.44	81.52	1.11	1.92	185.05
2013	87.25	0.30	83.84	0.59	1.90	173.88
2014	92.08	0.20	76.05	0.07	1.75	170.14
2015	97.40	0	76.73	0.07	1.75	175.95

**2.1.3 农作物可能源化利用量。**经过研究以往文献,对比陕西地区的具体情况,参考 Purohit 等<sup>[9-10]</sup>对生物质能源化利用的研究,选择秸秆资源用作适宜现阶段利用方式的比例为 15%,即可能源化利用量为 85%,得到的秸秆可能源化利

用量见表 3。由表 3 可知,2008—2015 年西安市农作物秸秆可能源化利用量分别为 178.15 万、180.04 万、182.90 万、149.88 万、157.29 万、147.80 万、144.62 万、149.55 万 t,由于考虑到综合利用的方式,秸秆的可利用率为固定秸秆资源的

85%,不同农作物秸秆的可能源化利用量与农作物秸秆的利用总量变化规律都与可收集资源量的变化趋势相同。

表 3 2008—2015 年西安市农作物秸秆可能源化利用量

Table 3 Available energy consumption of main crop stalks of Xi'an during 2008 - 2015

万 t

年份 Year	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	秋粮(玉米) Autumn grain crops (Corn)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
2008	94.62	0.60	79.93	1.24	1.76	178.15
2009	91.48	0.60	84.98	1.26	1.73	180.04
2010	94.80	0.53	84.51	1.20	1.86	182.90
2011	80.35	0.44	66.20	1.12	1.76	149.88
2012	85.05	0.38	69.29	0.94	1.63	157.29
2013	74.16	0.26	71.26	0.50	1.62	147.80
2014	78.26	0.17	64.64	0.06	1.49	144.62
2015	82.79	0	65.22	0.06	1.49	149.55

2.1.4 农作物秸秆可转化能源量。根据农作物秸秆折标煤系数和西安市秸秆可利用量,计算出西安市主要农作物秸秆可转化能源量,结果见表4。由表4可知,2008—2015年西安市农作物秸秆可转化能源量分别为98.14万、99.18万、100.75万、82.59万、86.65万、81.40万、79.62万、82.35万t标准煤。2015年西安市能源消费总量为430000万t标准

煤,年均秸秆能源替代量82.35万t标准煤,占每年能源消费的0.019%。按照最新的国内煤炭价格624元/t,2008—2015年西安市平均秸秆的化石能源替代量88.83万t来计算,每年西安市将节约5.49亿元的煤炭消耗,可见秸秆能源带来的经济价值巨大。

表 4 2008—2015 年西安市农作物秸秆可转化能源量

Table 4 Amount of energy to be converted of main crop stalks of Xi'an during 2008 - 2015

万 t 标准煤

年份 Year	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	秋粮(玉米) Autumn grain crops (corn)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
2008	52.04	0.27	43.96	0.78	1.08	98.14
2009	50.31	0.27	46.74	0.80	1.05	99.18
2010	52.14	0.24	46.48	0.76	1.13	100.75
2011	44.19	0.20	36.41	0.71	1.08	82.59
2012	46.78	0.17	38.11	0.59	1.00	86.65
2013	40.79	0.12	39.20	0.32	0.99	81.40
2014	43.05	0.08	35.55	0.04	0.91	79.62
2015	45.53	0	35.87	0.04	0.91	82.35

## 2.2 主要农作物秸秆资源分布

2.2.1 秸秆理论资源量的空间分布。根据《2015年西安市统计年鉴》中西安市各区县主要粮食作物产量和草谷比系数可以计算出西安市各区县主要农作物秸秆理论资源量,结果见表5、图1。

由表5可知,从空间分布地区来看,秸秆资源量主要分布在务农大县临潼、长安、蓝田、周至、户县,分别为37.98万、41.25万、29.81万、27.39万、36.07万t,占全市秸秆总量的81%(图1)。从秸秆类型来看,秸秆资源量主要是玉米和小麦秸秆,占秸秆总量的99%。

表 5 2015 年西安市各区县主要农作物秸秆理论资源量

Table 5 Theoretical resources of main crop stalks in counties and districts of Xi'an in 2015

万 t

区县 District and county	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
阎良 Yanliang	6.26	4.28	0.08	0.03	10.64
临潼 Lintong	22.66	15.04	0	0.28	37.98
长安 Chang'an	20.94	19.71	0	0.59	41.25
高陵 Gaoling	11.51	11.14	0	0	22.65
蓝田 Lantian	17.34	11.29	0.58	0.62	29.81
周至 Zhouzhi	14.83	12.28	0	0.28	27.39
户县 Hu County	19.58	16.34	0	0.15	36.07
灞桥 Baqiao	4.10	2.28	0.21	0.10	6.69

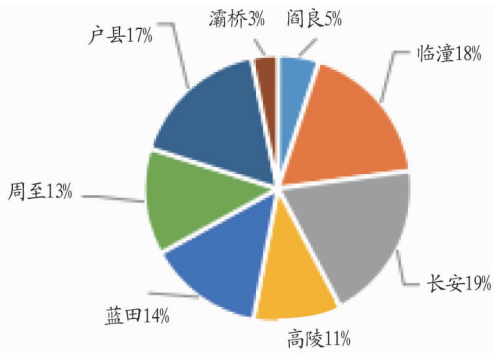


图1 2015年西安市各区县主要农作物秸秆理论资源比例

Fig.1 Theoretical resource ratio of main crop stalks in counties and districts of Xi'an in 2015

表6 2015年西安市各区县主要农作物秸秆可收集资源量

Table 6 Amount of resources to be collected of main crop stalks in counties and districts of Xi'an in 2015

万 t

区县 District and county	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
阎良 Yanliang	5.20	3.55	0.07	0.02	8.84
临潼 Lintong	18.81	12.48	0	0.24	31.53
长安 Chang'an	17.38	16.36	0	0.50	34.25
高陵 Gaoling	9.55	9.25	0	0	18.80
蓝田 Lantian	14.39	9.37	0.52	0.52	24.80
周至 Zhouzhi	12.31	10.19	0	0.24	22.74
户县 Hu County	16.25	13.56	0	0.13	29.94
灞桥 Baqiao	3.40	1.89	0.19	0.09	5.57

表7 2015年西安市各区县主要农作物可能源化利用量

Table 7 Available energy consumption of main crop stalks in counties and districts of Xi'an in 2015

万 t

区县 District and county	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
阎良 Yanliang	4.42	3.02	0.06	0.02	7.51
临潼 Lintong	15.98	10.61	0	0.20	26.80
长安 Chang'an	14.77	13.91	0	0.43	29.11
高陵 Gaoling	8.12	7.86	0	0	15.98
蓝田 Lantian	12.23	7.96	0.44	0.45	21.08
周至 Zhouzhi	10.47	8.66	0	0.20	19.33
户县 Hu County	13.82	11.52	0	0.11	25.45
灞桥 Baqiao	2.89	1.61	0.16	0.07	4.74

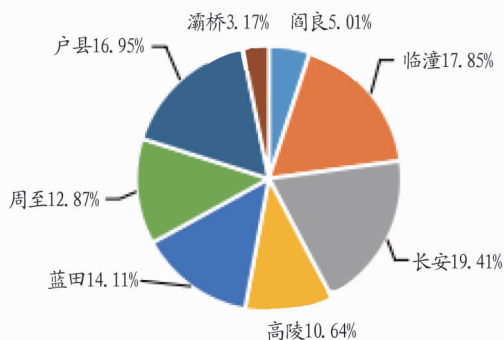


图2 2015年西安市各区县主要农作物秸秆可转化能量分布

Fig.2 Distribution of amount of energy to be converted of main crop stalks in counties and districts of Xi'an in 2015

2.2.2 可收集资源量的空间分布。根据理论资源量和可收集系数可以计算出秸秆可收集量,结果见表6。由表6可知,可收集资源量和农作物秸秆理论资源量空间分布变化规律一致。

2.2.3 可能源化利用量的空间分布。由可收集资源量和秸秆可能源化利用系数可计算出可能源化利用量,结果见表7。由表7可知,可能源化利用量分布区域和理论资源量分布区域规律一致。

2.2.4 秸秆可转化能量分布。由可能源化利用量和秸秆能源转化系数可计算出秸秆可转化能量量,结果见表8、图2。由表8可知,秸秆可转化能量量最大地区是长安,达16.04万t标准煤,占各区县秸秆总量19.41%;临潼、户县、蓝

田、周至、高陵、阎良、灞桥可转化能量量依次递减,分别为14.75万、14.01万、11.66万、10.64万、8.79万、4.14万、2.62万t标准煤,分别占各区县秸秆资源总量的17.85%、16.95%、14.11%、12.87%、10.64%、5.01%、3.17%。从农作物秸秆类型看,西安市各区县主要秸秆转化能源的来源是玉米和小麦,分别占秸秆总量的45%、53%,其他秸秆转化能量量只占2%。

### 3 结论与讨论

该研究表明,西安市秸秆资源丰富,总量逐年平稳增加。随着经济结构的调整,秸秆资源的种类也发生变化,但小麦秸秆和玉米秸秆资源仍占主导地位。2015年西安市秸秆资源理论资源量为211.93万t,可收集秸秆量为175.95万t,可能源化利用量为149.55万t,可转化能量量82.35万t标准煤,以全部秸秆能源转化为价值计算西安市每年将节约5.49

表 8 2015 年西安市各区县主要农作物秸秆可转化能量量

Table 8 Amount of energy to be converted of main crop stalks in counties and districts of Xi'an in 2015

万 t 标准煤

区县 District and county	夏粮(小麦) Summer grain crops (wheat)	秋粮(稻谷) Autumn grain crops (rice)	棉花 Cotton	油菜籽 Rapeseed	总量 Total
阎良 Yanliang	2.43	1.66	0.04	0.01	4.14
临潼 Lintong	8.79	5.83	0	0.12	14.75
长安 Chang'an	8.13	7.65	0	0.26	16.04
高陵 Gaoling	4.46	4.32	0	0	8.79
蓝田 Lantian	6.73	4.38	0.28	0.27	11.66
周至 Zhouzhi	5.76	4.76	0	0.12	10.64
户县 Hu County	7.60	6.34	0	0.07	14.01
灞桥 Baqiao	1.59	0.88	0.1	0.05	2.62

亿元的煤炭消耗,可见秸秆能源带来的经济价值巨大。

小麦秸秆占总量的 55.4%,玉米秸秆占总量的 43.6%,棉花、油菜占总量的 1.0%。临潼、长安、户县的秸秆分布面积较大,分别占比为 18.0%、19.0%、17.0%。秸秆区域主要分布在长安、临潼、户县、等区县,这与笔者调查的西安市农户用能情况一致,西安市农户用能调查数据显示,农户冬季用秸秆取暖和做饭比例占用能总量的 50.82%,蓝田县和周至县秸秆用量占总用能量的比例分别达 48.76% 和 39.70%。大量秸秆焚烧对环境造成污染,因此该研究对秸秆的综合利用提供了很好的数据支持,能够有针对性地对秸秆分布密度大的区域进行综合利用,对提高西安市农民生活水平,改善该市空气质量及农村生态环境有着积极的意义。

#### 参考文献

[1] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3):

345-359.

- [2] 鲍恩财, 田争光, 刘伟伟, 等. 主要农作物秸秆资源调查及能源化利用评价: 以安徽省为例[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 222-228.
- [3] 王晓玉, 薛帅, 谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(1): 1-8.
- [4] 李逸辰. 陕西省农作物秸秆资源量及其经济价值评估[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [5] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [6] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学院, 2010, 43(9): 1852-1859.
- [7] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [8] 韦茂贵, 王晓玉, 谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32-44.
- [9] PUROHIT P, TRIPATHI A K, KANDPAL T C. Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues[J]. Energy, 2006, 31(8/9): 1321-1331.
- [10] PUROHIT P. Economic potential of biomass gasification projects under clean development mechanism in India[J]. Journal of cleaner production, 2009, 17(2): 181-193.

(上接第 72 页)

社会、环境协调发展, 实施全流域统一规划管理和行政区域管理, 将水资源管理和水污染防治管理相结合, 设定科学的调查、监测和后评估方法和程序, 逐步建立并不断完善流域信息化管理体系。推进环保科技创新, 加强流域生态健康的基础研究工作, 重视科技技术与成果的推广和转化, 切实为管理体制提供技术保障, 同时调动公众参与流域治理的积极性和协作意识, 营造流域共建共管的良好氛围, 有效搭建流域管理的立体化网络。

**5.6 划定并严守流域生态保护红线** 划定牛栏江生态保护红线, 结合现有法定要求及生态系统完整性思考, 制定严格的管制和生态格局, 实施环境准入负面清单, 将流域内现有受保护区分散管理要求集聚形成合力。在生态保护红线框架的基础上, 建立具有明确关键性指标和引导性内容的管制性详规, 优化规划控制单元的产业布局与布局, 做到生态视角与规划策略的有机融合, 使生态格局有效落实于自然

格局、建设格局与文化格局之中, 建立生态红线政绩考核体系, 归并生态补偿渠道并完善补偿机制, 实现一套完整统一的河流生态健康管控体系。

#### 参考文献

- [1] KARR J R, CHU E W. Introduction: Sustaining living rivers[J]. Hydrobiologia, 2000, 422: 1-14.
- [2] KAMP U, BINDER W, HÖLZL K. River habitat monitoring and assessment in Germany[J]. Environmental monitoring and assessment, 2007, 127(1/2/3): 209-226.
- [3] KARR J R. Defining and measuring river health[J]. Freshwater biology, 1999, 41(2): 221-234.
- [4] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1191-1194.
- [5] 谢永红, 吴秀萍. 牛栏江流域水污染特征与水资源保护对策研究[J]. 水文, 2014, 34(3): 61-65.
- [6] 庞治国, 王世岩, 胡明昱. 河流生态系统健康评价及展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 151-155.
- [7] 环境保护部自然生态保护司. 流域生态健康评估技术指南[S]. 环境保护部自然生态保护司, 2013.