

延边州水资源生态足迹与承载力动态研究

赵静¹ 王颖¹ 赵春子¹ 金明姬^{2*}

(1. 延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002;

2. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133002)

摘要 为评估并分析延边州的水资源生态足迹和生态承载力,基于生态足迹分析方法,对延边州2006—2015年水资源生态足迹、生态承载力、生态盈余、万元GDP水资源生态足迹以及延边州各县市的水资源生态足迹与生态承载力的空间分布进行了分析和水资源基础数据的计算。结果表明,在2006—2015年间延边州水资源生态足迹总体呈波动上升趋势,用水主要以农业用水为主,分析年份延边州平均农业用水、工业用水、生活用水、生态用水足迹分别为 99.77×10^4 、 19.95×10^4 、 18.36×10^4 和 2.07×10^4 hm^2 ,占水资源总生态足迹的71.2%、14.2%、13.1%、1.5%;水资源生态承载力与生态盈余的变化趋势类似,波动显著;10年间延边州水资源消耗量减少,水资源利用效率逐渐提高;延边州8个县(市)水资源生态足迹与生态承载力空间分布不均衡,存在一定的地区差异。

关键词 水资源;生态足迹;生态承载力;生态盈余;万元GDP水资源生态足迹;空间分布;延边州

中图分类号 X24; X14

文章编号 1007-4333(2017)12-0074-09

文献标志码 A

Dynamic research on the ecological footprint and load-carrying capacity of water resources in Yanbian area

ZHAO Jing¹, WANG Ying¹, ZHAO Chunzi¹, JIN Mingji^{2*}

(1. Sciences College, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. Agricultural College, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract Based on the analysis method of ecological footprint, the water resources ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological surplus, and water resources ecological footprint per 10 000 yuan GDP and spatial distribution on water resources ecological footprint and load-carrying capacity of each region in Yanbian area from 2006 to 2015 were analyzed. The results showed that, the water resources ecological footprint displayed a fluctuating upward trend in Yanbian area from 2006 to 2015, agricultural water was dominated, the agricultural water, industrial water, domestic water, ecological water footprint was 99.77×10^4 , 19.95×10^4 , 18.36×10^4 and 2.07×10^4 hm^2 , respectively, took up 71.2%, 14.2%, 13.1%, 1.5% of the total water resources ecological footprint; The changing trend of water resources ecological carrying capacity and ecological surplus were similar, and the fluctuation was significant; The water consumption showed a decreasing trend from 2006 to 2015, indicating the increasing of utilization of water resources; The spatial distributions of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity of 8 counties (cities) in Yanbian area were not balanced, and there were some regional differences.

Keywords water resources; ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological surplus; water resources ecological footprint per ten thousand yuan GDP; spatial distribution; Yanbian area

水是人类生产和生活中重要的自然资源、社会和经济资源^[1]。近年来随着城市化的推进,人口过

度膨胀,社会经济飞速发展,人们对水资源的需求与水资源短缺之间的矛盾日益凸显,严重威胁人类的

收稿日期:2016-12-20

基金项目:吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(吉教科合字【2015】第35号)

第一作者:赵静,硕士研究生,E-mail:1210867997@qq.com

通讯作者:金明姬,博士,副教授,主要从事环境科学研究,E-mail:jinmingji@ybu.edu.cn

生存,阻碍区域经济与生态环境的协调发展^[2]。水资源生态足迹与承载力是水环境研究不可缺少的两大要素,两者与生态环境和人类活动的关系密切,主要平衡自然资源与社会经济之间的关系,促进区域间经济的协调^[3]。目前生态足迹法在区域经济社会发展方面的研究较多,在水资源方面的研究也有较多的涉及^[4]。如焦雯珺等^[5]对常州市的水资源生态足迹与承载力进行了评估;方文青^[6]利用水资源承载力评价指标体系对德州市水资源承载力进行了计算与分析;李艳娟^[7]计算并分析了济南市的水资源生态足迹。生态足迹分析法主要是反映自然资源与人类社会之间的关系,人类社会利用自然资源促进经济发展,而自然资源为人类社会提供生态服务^[8],其具有操作简单,普遍适用等优点^[9]。通过对生态足迹的计算,可对自然资源的可持续利用程度进行评估^[10]。

当前延边州存在水污染,水资源浪费等问题,这将会制约延边州经济与生态环境的可持续发展。目前,有关水环境与经济发展间关系的研究报道较少,而水资源承载力就是在此基础上提出的。因此,研究并分析延边州水资源生态足迹与承载力,将对延边州的经济发展与水环境保护具有重要意义。本研究拟采用生态足迹分析法对延边州 2006—2015 年间的水资源生态足迹与承载力进行分析,并在研究其发展现状及变化趋势的基础上提出合理建议,以期对延边州水资源的可持续利用与规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延边朝鲜族自治州毗邻中国、朝鲜、俄国三国,总面积约为 4.27 万 km²,延边州处于中温带,属于季风气候^[12],具有冬暖夏凉的特点,平均气温在 2~6℃之间,年均降水量在 400~650 mm 之间^[11]。延边州河网交错纵横,水系众多,地下水资源总量充足,为 28.24 亿 m³^[12]。

1.2 研究方法

生态足迹分析法。

1.2.1 水资源生态足迹模型

已有研究将生产(农业、工业)、生活及生态等消耗掉的水资源量称之为水资源生态足迹^[13]。为全面了解延边州水资源生态足迹的情况,分别建立了生产、生活和生态用水生态足迹^[10]。水资源账户的计算公式如下^[14-16]:

$$EF_n = N \times ef_n = N \times \gamma \times [W/p_n] \quad (1)$$

$$EF_a = \gamma W_a / p_n \quad (2)$$

$$EF_m = \gamma W_m / p_n \quad (3)$$

$$EF_e = \gamma W_e / p_n \quad (4)$$

式中:EF_n 为水资源总生态足迹, hm²; N 为人口数量; ef_n 为人均水资源生态足迹, hm²/人; W 为人均消耗的水资源量, m³; γ 为全球水资源均衡因子; p_n 为水资源全球平均生产能力, m³/hm²; EF_a 为生产用水生态足迹, hm²; EF_m 为生活用水生态足迹, hm²; EF_e 为生态用水生态足迹, hm²; W_a 为生产用水量, m³; W_m 为生活用水量, m³; W_e 为生态用水量, m³。

本研究选择的 γ 为 5.19^[10], 而 p_n 确定为 3 140 m³/hm²^[17]。

1.2.2 水资源生态承载力模型

如果一个区域的水资源能够持续满足该区域的经济发展和改善人们的生活方式,说明水资源的承载能力较强,能进一步提高该区域的经济的发展^[18]。生态承载力计算公式如下^[19-20]:

$$EC_m = N \times ec_m = 0.4\gamma\varphi Q / p_n \quad (5)$$

式中:EC_m 为水资源生态承载力, hm²; N 为人口数量; ec_m 为人均水资源承载力, hm²/人; φ 为研究区水资源产量因子; Q 为研究区水资源总量, m³。

研究区水资源产量因子(φ)的公式为^[21]:

$$\varphi = K / K_d \quad (6)$$

式中:K 为延边州单位面积产水量, K_d 为全国单位面积产水量^[21]。根据延边州基础数据计算所得延边州水资源平均生产能力为 24.23 × 10⁴ m³/km², 在此基础上,结合全国水资源平均生产能力(29.46 × 10⁴ m³/km²)^[14],计算所得延边州水资源的产量因子为 0.82。

1.2.3 水资源生态盈余(生态赤字)模型

若水资源能满足区域的发展需求,促进区域的可持续发展,说明存在生态盈余,反之存在生态赤字^[22],其公式为^[23]:

$$EH_r = EC_m - EF_n \quad (7)$$

式中:当 EH_r > 0 时为生态盈余,表明水资源充足,有利于持续利用;而 EH_r < 0 时为生态赤字,表明水资源短缺,不利于区域的协调发展^[24]。

1.2.4 水资源利用效率计算模型

根据生态足迹模型,水资源利用效率模型如下^[25-26]:

$$EF_i = EF_n / \text{GDP} \quad (8)$$

当 EF_i 值越大,说明研究区消耗和浪费的水资源越多,否则消耗的水资源较少,利用率越高^[27]。

1.3 数据来源

本研究相关数据来源于《延边朝鲜族自治州统

计年鉴》、《延边朝鲜族自治州水资源公报》(表1),部分数据根据相关参考文献计算得出。因缺少延边州2006—2009年的生态用水量,故生态用水生态足迹研究只计算了2010—2015年。

表1 延边州2006—2015年水资源基础数据统计

Table 1 Statistical data of water resources of 2006—2015 in Yanbian area

指标 Index	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
人口/ 10^4 Population	217.8	218.0	218.7	217.9	219.1	218.6	218.2	215.0	214.6	213.6
GDP/ 10^8 元	274.6	334.3	387.7	445.0	517.5	622.0	719.2	797.2	846.4	858.8
年降水量/mm Precipitation	555.7	642.3	560.3	631.3	777.2	483.8	777.2	807.6	518.9	660.7
耕地面积/ 10^4 hm^2 Arable land	27.0	28.9	29.9	35.4	36.0	36.6	38.2	38.2	37.2	38.4
水资源总量/ 10^8 m^3 Water resources	73.9	98.3	80.3	75.2	163.2	80.3	126.4	174.2	73.8	89.2
用水总量/ 10^8 m^3 Total water consumption	6.5	6.5	6.7	7.0	8.3	9.9	9.8	9.8	10.1	10.1
农业用水量/ 10^8 m^3 Agricultural water	4.8	4.6	4.8	5.1	6.0	6.9	6.9	6.7	7.2	7.2
工业用水量/ 10^8 m^3 Industrial water	0.8	0.9	0.8	0.8	1.2	1.6	1.5	1.5	1.5	1.3
生产用水量/ 10^8 m^3 Production water	5.6	5.5	5.6	6.0	7.3	8.6	8.5	8.3	8.6	8.5
生活用水量/ 10^8 m^3 Domestic water	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
生态用水量/ 10^8 m^3 Ecological water	—	—	—	—	0.01	0.1	0.1	0.3	0.2	0.4

2 结果与分析

2.1 延边州水资源生态足迹及变化特征

结合表1中的基础数据及相关的计算式(1)—(4),计算得延边州2006—2015年水资源生态足迹(表2)。2006—2015年延边州水资源总生态足迹均值为 140.15×10^4 hm^2 ,整体呈现波动上升趋势。在2006—2015分析年份中,2015年水资源总生态足迹最大为 167.27×10^4 hm^2 ,2007年水资源总生态足迹最小为 107.57×10^4 hm^2 。分析年份延边州平均农业用水(包括农田灌溉用水与林牧渔畜用水)、工业用水(包括工业用水与城镇公共用水)、生活用水(包括城市居民生活用水与农村居民生活用水)、生态用水(包括城镇环境用水与农村生态用水)足迹分别为 99.77×10^4 、 19.95×10^4 、 18.36×10^4 和 2.07×10^4 hm^2 ;占水资源总生态足迹的71.2%、14.2%、13.1%、1.5%,延边州农业用水占得比重较大。

就农业用水生态足迹而言,在分析年份中随延

边州耕地面积的不断上升,农业用水生态足迹也随之波动上升,两者间的相关系数(R^2)达到0.80。在分析年份中,2015年出现最大值,为 119.15×10^4 hm^2 ,2007年出现最小值,为 76.45×10^4 hm^2 。工业用水生态足迹,在分析年份中大体呈先上升后下降的趋势。在2011年出现最大值,为 26.82×10^4 hm^2 ,2008年出现最小值,为 13.14×10^4 hm^2 。生活用水生态足迹,在分析年份中大体呈波动上升趋势。在2015年出现最大值,为 20.06×10^4 hm^2 ,2006年出现最小值,为 15.37×10^4 hm^2 。就延边州人口而言,在分析年份中2015年人口最低,但2015年的生活用水生态足迹略高于其它人口较多的年份。随人们生活要求的提高及生活习惯的改善,日常生活用水量不断增多,导致生活用水生态足迹在人口较少的2015年也出现较高的水平。生态用水生态足迹,随延边州对生态环境的重视,在分析年份中大体呈上升趋势;在2015年出现最大值,为 7.09×10^4 hm^2 ,2010年出现最小值,为 0.2×10^4 hm^2 。

表 2 延边州 2006—2015 年水资源生态足迹

Table 2 Water resources ecological footprint in Yanbian area from 2006 to 2015

10⁴ hm²

年份 Year	总生态足迹 Ecological footprint	农业用水足迹	工业用水足迹	生产用水足迹	生活用水足迹	生态用水足迹
		Ecological footprint of agricultural water	Ecological footprint of industrial water	Ecological footprint of production water	Ecological footprint of domestic water	Ecological footprint of ecological water
2006	108.00	78.67	13.96	92.63	15.37	—
2007	107.57	76.45	14.95	91.40	16.17	—
2008	110.25	79.77	13.14	92.91	17.33	—
2009	116.46	84.61	13.91	98.52	17.95	—
2010	137.56	99.72	20.46	120.17	17.18	0.20
2011	163.20	114.63	26.82	141.45	19.95	1.80
2012	161.84	114.86	25.37	140.23	19.68	1.93
2013	162.66	111.55	25.30	136.85	20.04	5.77
2014	166.72	118.28	24.66	142.94	19.84	3.95
2015	167.27	119.15	20.97	140.12	20.06	7.09
均值 Average	140.15	99.77	19.95	119.72	18.36	2.07

2.2 延边州水资源生态承载力及变化特征

延边州 2006—2015 年水资源生态承载力水平不稳定,波动较大。2006—2010 年间水资源生态承载力从 2006 年的 $400.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 上升至 2010 年的 $885.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 达到一个峰值; 而 2011 年承载力显著下降, 降到 $435.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 之后又有显著增加, 增加到 2012 年的 $685.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 到 2013 年达到分析年份中的最高值 $944.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 但 2014 年承载力又一次显著下降, 达到分析年份中的最低值 $399.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 2010、2012、2013 年延边州水资源承载力较其他年份高, 主要是因为这 3 个年份发生了洪涝灾害, 导致降水量和水资源总量显著增加, 因此水资源生态承载力提高。2015 年承载力有所上升, 为 $483.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

由式(5)计算可得, 水资源生态承载力随水资源总量的增加而增强, 而降水量对水资源总量的影响显著, 故本研究中就延边州水资源生态承载力与年降水量间的相关性进行了分析。结果, 两者间的相关系数(R^2)为 0.78, 两者之间具有一定的相关性。故就分析年份水资源生态承载力结果而言, 年降水量较丰富的 2010 年与 2013 年, 水资源总量充足, 因此水资源承载力随降水量的增加而提高; 而年降水

量低的 2014 年, 水资源总量降低, 随之水资源承载力也最低。

2.3 延边州水资源生态盈余及水资源利用效率

由式(7)计算可得, 延边州 2006—2015 年水资源生态盈余(EH_r)均大于 0, 说明延边州水资源供给充足, 能满足该区域的经济增长^[22]。就其变化趋势而言, 水资源生态盈余从 2006 年的 $292.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 到 2010 年上升至 $747.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 达到一个峰值; 而 2011 年生态盈余显著下降, 降到 $272.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 之后又有显著增加, 到 2013 年达到分析年份中的最高值 $781.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 但 2014 年生态盈余又一次显著下降, 达到分析年份中的最低值 $233.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。这与生态承载力的变化趋势类似, 故对水资源生态承载力与生态盈余进行了相关性分析, 其结果水资源生态盈余受生态承载力影响极大, 其相关系数(R^2)达到 0.98。

根据生态足迹理论, 计算延边州 2006—2015 年间的水资源利用效率(表 3, 图 1)。延边州 2006—2015 年万元 GDP 水资源生态足迹总体呈下降趋势。2006 年延边州万元 GDP 水资源生态足迹在分析年份中达到最高, 为 $0.39 \text{ hm}^2/\text{万元}$, 而 2015 年达到研究期间的最低值, 为 $0.19 \text{ hm}^2/\text{万元}$, 年均降幅为

8.12%，2006年是2015年的2倍。延边州水资源利用效率得到了明显提高，主要是因为随延边州经济结

构与产业结构的调整、经济增长方式的改善及科技的进步，近几年水资源的消耗和浪费减少了。

表3 延边州2006—2015年水资源生态盈余及万元GDP水资源生态足迹

Table 3 Water resources ecological surplus and water resources ecological footprint per ten thousand yuan GDP in Yanbian area from 2006 to 2015

指标 Index	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
生态盈余/ 10^4 hm^2 Ecological surplus	292.5	425.2	325.4	291.4	747.4	272.1	523.2	781.9	233.2	316.2
万元GDP生态足迹/(hm^2 /万元) Ecological footprint per ten thousand yuan GDP	0.39	0.32	0.28	0.26	0.27	0.26	0.23	0.20	0.20	0.19

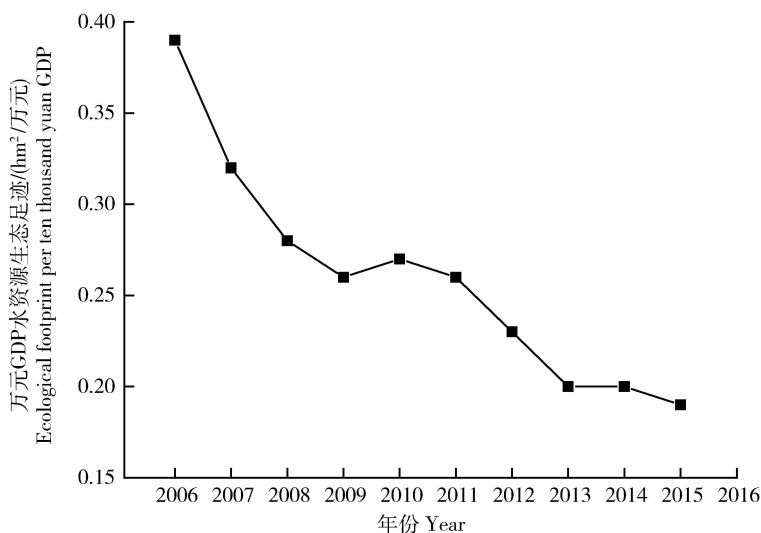


图1 延边州2006—2015年万元GDP水资源生态足迹

Fig. 1 Water resources ecological footprint per ten thousand yuan GDP in Yanbian area from 2006 to 2015

2.4 延边州水资源生态足迹与生态承载力的地域性差异

结合2015年延边州8个县(市)基础数据,分析和评估了延边州8个县(市)的水资源生态足迹和生态承载力的变化,结果如表4。结合表4中的数据,将延边州各县(市)水资源生态足迹及生态承载力分为5大类进行制图,其结果如图2、图3。

延边州8个县(市)水资源总生态足迹及人均水资源生态足迹空间分布极不均衡。8个县(市)中水资源总生态足迹大于 $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的高值区主要集中在延吉市、和龙市、珲春市,其中珲春市最高,为 $42.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$;其余5个县(市)水资源总生态足迹均小于 $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 为低值区,其中图们市最低,为 $10.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。而人均水资源生态足迹大于 $1.0 \text{ hm}^2/\text{人}$ 的高值区主要集中在和龙市和珲春市,其中珲春市最高,为 $1.8 \text{ hm}^2/\text{人}$;其余6个县(市)

人均水资源生态足迹均低于 $1.0 \text{ hm}^2/\text{人}$ 为低值区,其中敦化市最低,为 $0.4 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。总体来看,延边州各县(市)的水资源总生态足迹与人均水资源生态足迹的空间分布具有一定差异。但因在水资源账户中,农业用水生态足迹比重较大,8个县(市)中水资源生态足迹较大的区域主要集中于以农业生产为主的县(市)。

延边州8个县(市)中水资源生态承载力及人均水资源生态承载力空间分布具有很好的一致性。水资源生态承载力大于 $80.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 及人均水资源生态承载力大于 $3 \text{ hm}^2/\text{人}$ 的高值区均分布在敦化市、珲春市、汪清县和安图县,其中敦化市水资源承载力最高,为 $145.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$;而珲春市的人均水资源生态承载力最高,为 $5.7 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。受水资源总量及人口的影响,延吉市水资源生态承载力与人均水资源生态承载力均位于8个县(市)中的最低。

表 4 2015 年延边州各县(市)水资源生态足迹及生态承载力

Table 4 Water resources ecological footprint and ecological carrying capacity for each counties (cities) in Yanbian area in 2015

县(市) County (City)	生态足迹/ 10^4 hm^2 Ecological footprint	人均生态足迹/ $(\text{hm}^2/\text{人})$ Ecological footprint per capita	生态承载力/ 10^4 hm^2 Ecological carrying capacity	人均生态承载力/ $(\text{hm}^2/\text{人})$ Ecological carrying capacity per capita
延吉市 Yanji City	24.8	0.5	6.8	0.1
图们市 Tumen City	10.2	0.9	11.1	0.9
敦化市 Dunhua City	18.6	0.4	145.6	3.1
和龙市 Helong City	25.8	1.4	19.3	1.1
龙井市 Longjing City	14.6	0.9	3.2	0.2
珲春市 Hunchun City	42.0	1.8	129.8	5.7
汪清县 Wangqing County	18.7	0.8	98.5	4.3
安图县 Antu County	12.6	0.6	86.4	4.2

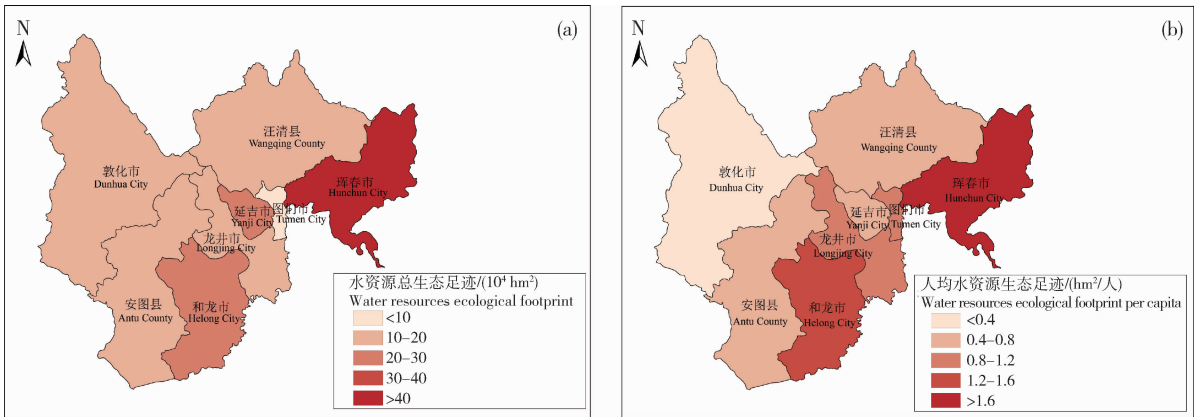


图 2 2015 年延边州 8 个县(市)水资源总生态足迹及人均水资源生态足迹分布图

Fig. 2 Distribution map of water resources ecological footprint and water resources ecological footprint per capita in 8 counties (cities) of Yanbian area in 2015

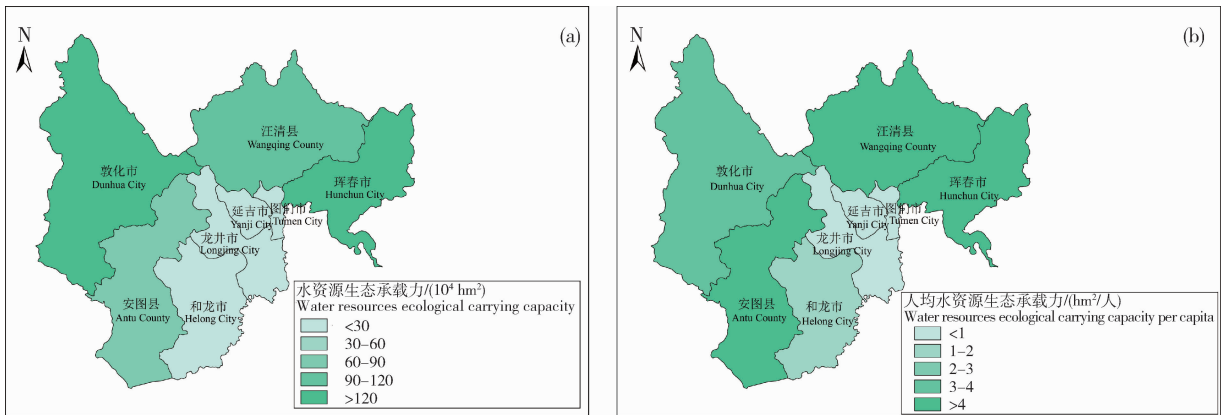


图 3 2015 年延边州 8 个县(市)水资源生态承载力及人均水资源生态承载力分布图

Fig. 3 Distribution map of water resources ecological carrying capacity and water resources ecological carrying capacity per capita in 8 counties (cities) of Yanbian area in 2015

本研究对比分析了延边州 2011—2015 年 8 个县(市)的人均水资源生态足迹与人均水资源生态承载力,结果如图 4、图 5。2011—2015 年间图们市、和龙市、龙井市人均水资源生态足迹有逐年上升的趋势,但变化不显著,只有珲春市人均生态足迹呈下降趋势,是因为 2013—2015 年珲春市人口有所增加,导致人均生态足迹降低,其他地区 5 年间人均生态足迹呈波动上升趋势,可能是由于人口及经济的变化造成的。延边州的和龙市和珲春市由于总生态足迹较高,

因此人均水资源生态足迹最高。在 2011—2015 年间延吉市、敦化市、和龙市、龙井市、安图县的人均水资源生态承载力呈先上升后下降的趋势,而其它地区出现先上升后下降再上升的趋势,这与各县市的人口、降水量和水资源总量波动变化有关。各县市 2013 年人均水资源生态承载力基本上最高,是因为 2013 年延边州各地区的年降水量高于其它年份,因此人均水资源生态承载力也显著高于其它年份。其中延吉市和龙井市 5 年间的人均水资源生态承载力最低。

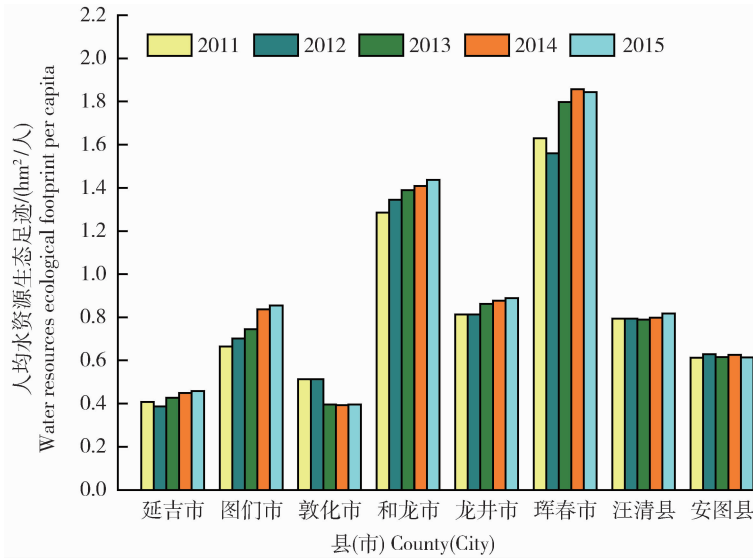


图 4 2011—2015 年延边州 8 个县(市)人均水资源生态足迹变化趋势

Fig. 4 Variation trend of water resources ecological footprint per capita in 8 counties (cities) of Yanbian area from 2011 to 2015

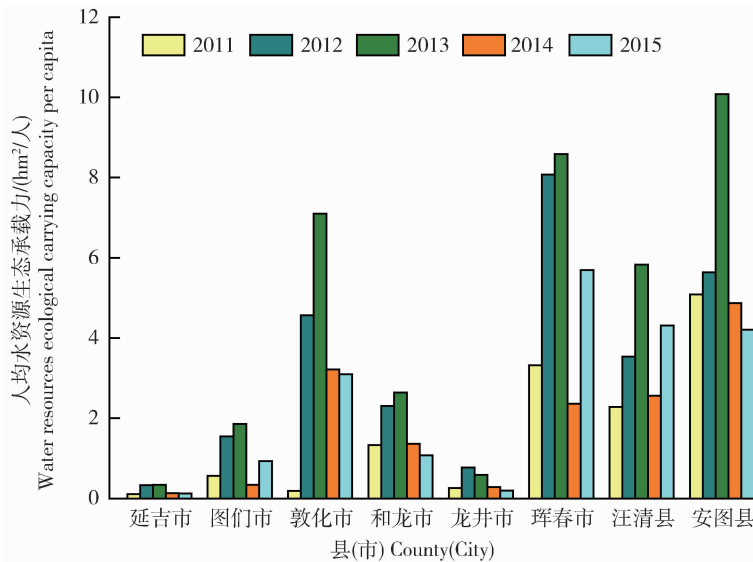


图 5 2011—2015 年延边州 8 个县(市)人均水资源生态承载力变化趋势

Fig. 5 Variation trend of water resources ecological carrying capacity per capita in 8 counties (cities) of Yanbian area from 2011 to 2015

3 结 论

1) 2006—2015年延边州水资源总生态足迹呈现波动上升变化,可能与延边州的经济发展和人们生活要求的提高有关。分析年份延边州平均农业用水、工业用水、生活用水、生态用水足迹分别为 99.77×10^4 、 19.95×10^4 、 18.36×10^4 和 $2.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 占水资源总生态足迹的 71.2%、14.2%、13.1% 和 1.5%, 延边州农业用水较多, 这是由延边州耕地面积不断增加引起的。分析年份中水资源生态承载力水平不稳定, 波动较大, 2013 年达到最高值, 说明自然灾害的发生也会对水资源承载力产生影响; 且水资源生态承载力随着年降水量与水资源总量的增加而提高。

2) 2006—2015年延边州存在水资源生态盈余, 说明延边州水资源供给充足, 在目前的经济状态下, 能够满足该区域的需要, 并且近几年延边州水资源消耗的较少, 利用率提高。但为了今后延边州的发展, 应该升级产业结构, 制定科学的水资源利用制度。此外, 应提高节水意识, 使水资源得到有效的利用, 以满足延边州的社会、经济以及生态的发展。

3) 在地区分布差异上, 2015年延边州8个县(市)水资源生态足迹及生态承载力空间分布极不平衡, 主要是由于各个地区的用水量、经济发达程度及人口数量存在较大差异。总生态足迹与人均生态足迹的高值区均集中在农业生产为主的和龙市和珲春市。水资源生态承载力及人均生态承载力空间分布具有很好的一致性, 高值区均分布在敦化市、珲春市、汪清县和安图县, 而最低值均出现在延吉市。

4) 本研究中所用模型能够精确分析延边州的水资源状况, 但是也存在很多不足, 使用的计算模型是传统模型, 与改进的模型计算的水资源承载力有一定的差距, 因此有待于进一步研究。

参考文献 References

[1] 代稳, 张美竹, 秦趣, 王金凤. 基于生态足迹模型的水资源生态安全评价研究[J]. 环境科学与技术, 2013(12): 228-233
Dai W, Zhang M Z, Qin Q, Wang J F. Ecological security evaluation of water resource based on ecological footprint model[J]. *Environment Science & Technology*, 2013(12): 228-233 (in Chinese)

[2] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1338-

1344
Li X, Shi J P, Cao H. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1338-1344 (in Chinese)

[3] 侯丽敏, 岳强, 王彤. 我国水环境承载力研究进展与展望[J]. 环境保护科学, 2015, 41(4): 104-108
Hou L M, Yue Q, Wang T. Research and prospect of the theoretical framework of water environmental carrying capacity in China[J]. *Environment Protection Science*, 2015, 41(4): 104-108 (in Chinese)

[4] 陈栋为, 陈晓宏, 孔兰. 基于生态足迹法的区域水资源生态承载力计算与评价: 以珠海市为例[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2224-2229
Chen D W, Chen X H, Kong L. The calculations and analysis of regional ecological water resources carrying capacity based on ecological footprint analysis method [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2224-2229 (in Chinese)

[5] 焦雯珺, 闵庆文, 李文华, Anthony M. F. 基于 ESEF 的水生态承载力: 理论、模型与应用[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1041-1048
Jiao W J, Min Q W, Li W H, Anthony M F. Measuring water ecological carrying capacity with the ecosystem-service-based ecological footprint (ESEF) method: Theory, models and application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1041-1048 (in Chinese)

[6] 方文青. 德州市水资源承载力研究[D]. 济南: 山东大学, 2009
Fang W Q. Study on water resources carrying capacity of Dezhou[D]. Jinan: Shandong University, 2009 (in Chinese)

[7] 李艳娟. 济南市水资源生态足迹计算与水环境压力分析[D]. 济南: 山东师范大学, 2010
Li Y J. Calculation of water ecological footprint and analysis of water environmental pressure of Jinan City [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2010 (in Chinese)

[8] 卢艳, 于鲁冀, 王燕鹏, 王振波. 河南省水资源生态足迹和生态承载力分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 182-186
Lu Y, Yu L J, Wang Y P, Wang Z B. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Henan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1): 182-186 (in Chinese)

[9] William E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment Urban*, 1992(4): 121-130

[10] 贾焰, 张军, 张仁陟. 2001—2011年石羊河流域水资源生态足迹研究[J]. 草业学报, 2016(2): 10-17
Jia Y, Zhang J, Zhang R Z. Ecological footprint of water resources in the Shiyang River Basin from 2001—2011[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016(2): 10-17 (in Chinese)

[11] 曲家媛. 基于 P-S-R 模型的延边州生态安全评价研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010
Qu J Y. The study on the ecological security evaluation in

- Yanbian based on the P-S-R model[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010 (in Chinese)
- [12] 宁宇. 延边生态环境与经济协调发展研究[D]. 延吉: 延边大学, 2007
- Ning Y. Research on coordinated development of ecological environment and economy in Yanbian [D]. Yanji: Yanbian University, 2007 (in Chinese)
- [13] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3559-3568
- Tan X J, Zheng Q Y. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3559-3568 (in Chinese)
- [14] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 范晓秋. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286
- Huang L N, Zhang W X, Jiang C L, Fan X Q. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286 (in Chinese)
- [15] 徐珊, 夏丽华, 陈智斌, 周锡振. 基于生态足迹法的广东省水资源可持续利用分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013(5): 11-15
- Xu S, Xia L H, Chen Z B, Zhou X Z. Analysis of sustainable utilization of water resources in Guangdong Province based on ecological footprint theory [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013(5): 11-15 (in Chinese)
- [16] 张义. 基于生态足迹模型的河池市水资源可持续利用评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 26-30
- Zhang Y. Assessment of sustainable utilization of water resources in Hechi City based on ecological footprint model [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(4): 26-30 (in Chinese)
- [17] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 267-274
- Zhang J, Zhang R Z, Zhou D M. A study on water resources carrying capacity in the Shule River Basin based on ecological footprints[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 267-274 (in Chinese)
- [18] 熊升银, 苟兴才. 成都市水资源承载力影响因素的实证分析[J]. 经济研究导刊, 2008(9): 161-162
- Xiong S Y, Gou X C. An empirical analysis on the influencing factors of water resources carrying capacity in Chengdu City [J]. *Economic Research Guide*, 2008(9): 161-162 (in Chinese)
- [19] 王文国, 何明雄, 潘科, 祝其丽, 周芸, 樊毅, 胡启春. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555-1565
- Wang W G, He M X, Pan K, Zhu Q L, Zhou Y, Fan Y, Hu Q C. Analysis of Spatio-Temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1555-1565 (in Chinese)
- [20] 王俭, 张朝星, 于英谭, 李法云, 马放. 城市水资源生态足迹核算模型及应用: 以沈阳市为例[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2257-2262
- Wang J, Zhang C X, Yu Y T, Li F Y, Ma F. Calculation model of urban water resources ecological footprint and its application: A case study in Shenyang City of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8): 2257-2262 (in Chinese)
- [21] 邢清枝, 任志远, 王丽霞, 张文梅. 基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 793-798
- Xing Q Z, Ren Z Y, Wang L X, Zhang W M. Evaluation on sustainable utilization of water resources in north Shanxi Province based on ecological footprint model [J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(6): 793-798 (in Chinese)
- [22] 张义, 张合平, 李丰生, 郭琳. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 4111-4124
- Zhang Y, Zhang H P, Zhang F S, Guo L. Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on an improved mode [J]. *Resources Science*, 2013, 35(8): 4111-4124 (in Chinese)
- [23] 李萍, 孙自保, 方江平, 冯平. 基于生态足迹动态分析的西藏可持续性发展评估[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 327-331
- Li P, Sun Z B, Fang J P, Feng P. The sustainable development assessment in Tibet based on the dynamic analysis of ecological footprint [J]. *Journal of Soil and Water conservation*, 2015, 29(6): 327-331 (in Chinese)
- [24] 刘子刚, 郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究: 以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088
- Liu Z G, Zheng Y. Evaluation of water ecological carrying capacity based on ecological footprint theory: A case study of Huzhou [J]. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1083-1088 (in Chinese)
- [25] 周悦, 谢屹. 基于生态足迹模型的辽宁省水资源可持续利用分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3157-3163
- Zhou Y, Xie Y. Analysis of sustainable utilization of water resource in Liaoning Province based on ecological footprint model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3157-3163 (in Chinese)
- [26] 杨屹, 加涛. 21世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 7987-7997
- Yang Y, Jia T. The 21st century ecological carrying capacity and footprint in Shanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 7987-7997 (in Chinese)
- [27] 马豪. 新疆水资源生态足迹与用水效率研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012
- Ma H. Research on Xinjiang water resources ecological footprint and water use efficiency [D]. Wulumuqi: Xinjiang University, 2012 (in Chinese)