

# 基于生态足迹模型修正的忻州市生态承载力空间差异变化

赵鹏宇<sup>1</sup>, 郭劲松<sup>2</sup>, 刘秀丽<sup>1</sup>, 崔 嫣<sup>3</sup>, 张俊卿<sup>3</sup>, 冯文勇<sup>3</sup>

(1.忻州师范学院 五台山文化研究中心,山西 忻州 034000;2.广西壮族自治区环境保护科学研究院,广西 南宁 530000;

3.忻州师范学院旅游管理系,山西 忻州 034000)

**摘要:**为了给忻州市矿粮复合区与重点生态功能区生态环境治理提供科学依据,在现有生态足迹模型中增加了包括废气、废水和固体废弃物科目的污染排放账户和水资源账户,重新确定了忻州各项生物账户全球平均产量与生产性土地均衡因子。采用修正后的生态足迹模型测算了忻州市14个县(区)生态足迹和生态承载力空间差异。主要结论为:人均生态足迹集中于能源资源相对丰富的县域,如静乐、河曲、保德、原平;忻州生态承载力主要来自于耕地与林地,人均生态承载力主要集中于相对资源富裕、人口较多的县域,如宁武、静乐、神池、五寨、岢岚、偏关;2004—2009年间生态赤字县域数量呈上升趋势,且整体上向严重赤字区、压力指数大于1的区域集中;依据区域经济活动对自然空间的占用率是否高于全市平均水平,可将忻州市分为两类区域,第一类包括河曲、保德、原平、静乐等4县超过全市平均水平,技术效率较低,对生态环境的扰动较大;另一类为其它8个县级单位,低于全市区平均水平,技术效率较高,对生态环境的影响较小。从能源利用与城镇发展角度分析了空间差异产生的原因。

**关键词:**生态足迹;生态承载力;生态赤字;空间差异

**中图分类号:**S181; X171.1    **文献标识码:**A

## Spatial differences of ecological carrying capacity in Xinzhou City based on the ecological footprint method

ZHAO Peng-yu<sup>1</sup>, GUO Jin-song<sup>2</sup>, LIU Xiu-li<sup>1</sup>, CUI Qiang<sup>3</sup>, ZHANG Jun-qing<sup>3</sup>, FENG Wen-yong<sup>3</sup>

(1. Mount Wutai Cultural Research Center, Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi 034000, China;

2. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning, Guangxi 530000, China;

3. Department of Tourism Management, Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi 034000, China)

**Abstract:** The indices , waste gas, waste water, solid waste pollution subjects accounts and water resources accounts were added into the current ecological footprint model and the biological account, global average yields and productive land equalization factor were re-identified to provide reference for mineral-grain compound area and key ecological functional areas comprehensive improvement in Xinzhou. Spatial differences of ecological footprint and ecological capacity among 14 counties ( districts ) in Xinzhou were estimated. The results were as follows: The ecological footprint per capita was mostly in the county with relatively rich energy resources, such as Jingle, Hequ, Baode, Yuanping. The ecological carrying capacity in Xinzhou was mainly derived from the cultivated land and the forest land, and the ecological capacity per capita concentrated on the resource-rich county with a relatively large population ,such as Ningwu, Jingle, Wuzhai, Kelan, Pianguan. During 2004—2009, the number of counties ( districts ) with ecological deficit increased and trended towards the serious deficit area and the area with pressure index greater than 1 generally. According to whether the occupancy rate of natural space on regional economic activities is higher than the average level of the whole city, Xinzhou City can be divided into two categories. The first type in-

收稿日期:2016-10-10

修回日期:2018-05-02

基金项目:2018年山西省高校哲学社会科学研究一般项目“乡村振兴战略下五台山景区农户旅游参与模式及生态效益研究”

(201803096);2018年忻州科技计划项目“五台山景区农户旅游参与模式及生态效益研究”(20180106);2014年忻州师范学院

专题研究项目“忻州市资源与生态承载力和生态安全评价”(ZT201405)

作者简介:赵鹏宇(1981-),男,山西保德人,硕士,副教授,主要从事区域可持续发展研究。E-mail:497154516@qq.com

通信作者:冯文勇(1967-),男,山西保德人,博士,教授,主要从事区域资源开发研究。E-mail:fengwenyong6000@163.com

cludes four counties which exceed the average level of the whole city, such as Hequ, Baode, Yuanping and Jingle. The technical efficiency is lower and the disturbance to the ecological environment is greater in these areas. The second type is the other eight counties, which are lower than the average level of the whole city. The technical efficiency is greater and the impact to the ecological environment is lower in these areas. Finally, we analyzed the causes of spatial differences from the perspective of energy utilization and urban development. The findings might provide the scientific evidence for the mine-food complex area and the ecological environment of the key ecological function areas.

**Keywords:** ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological deficit; spatial difference

生态足迹法是一种以生物生产性为媒介,从生产端和消费端核算人类一定条件下生态承载力供给与需求,进而判明区域自然资源是否被过度利用的方法。自1995年Wackernagel<sup>[1]</sup>和Rees<sup>[2]</sup>提出的生态足迹基本模型,在广泛应用之后又扩展出基于投入产出、生命周期分析技术或物质流分析技术的生态足迹模型,不同时空尺度的实证研究相继涌现,对模型参数、项目的计算,账户扩展等方面做了调整与修正<sup>[3-7]</sup>。生态足迹模型存在一定的缺陷,主要表现为:一是核算的足迹是不准确不完整的,如某些产品用生产数据代替实际消费数据,没有充分考虑地下水在内的地下资源,污染物的足迹因计量复杂被忽略;二是模型仅可以测算已发生年份生态足迹大小,得到的结论是瞬时性的,不能预测未来,缺乏动态性。但因其计算方法简单、结果表达形象、易理解等优点,依然不失为核算生态承载力的良好方法。

基于上述分析,本文将对生态足迹模型参数、账户进行修正扩展,并以忻州市为研究对象,探讨重点生态功能、能源开采、旱作农业复合区生态足迹和生态承载力的测评研究,对于生态资源稀缺、生态环境脆弱区域的可持续发展十分重要。

## 1 研究区概况

忻州市位于山西省北中部,地理坐标范围为E110°56'—E113°58'、N38°09'—N39°40',北临恒山山脉,南接太原盆地,西隔黄河,东倚太行山,总面积 $2.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占全省土地总面积的16%。下辖1市、1区、12县,2013年全市人口为 $311.4 \times 10^4$ 人,其中农业人口 $185.7 \times 10^4$ 人,耕地 $64.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,土地资源中山地、丘陵与平原所占比例分别为53.5%、35.96%、10.54%。全市河流有汾河、滹沱河、清水河等,区域水资源总量为 $18.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。主要面临的生态问题为水土流失,局部地区水资源短缺以及能源开采带来的生态问题。随着山西省国家资源型经济转型综合配套改革试验区战略的实施,忻州迎来新的发展机遇,2013年全市能源生产总量 $4773.9 \times$

$10^4 \text{ t}$ ,国内生产总值654.7亿元。与此同时资源和环境的刚性约束在忻州市的发展中愈加明显。现已表现出诸多问题,如资源供需矛盾突出、生态环境演变和区域发展不平衡等,影响到区域经济和社会的可持续发展。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

在计算人均生态盈亏的基础上,引入生态压力指数、万元GDP生态足迹、生态足迹多样性指数以及区域发展能力指数等指标来描述区域可持续发展水平。具体指标计算如下。

生态足迹计算公式一般可表示为:

$$EF = N \times ef = N \times \sum (r_i \times c_i / p_i) \quad (1)$$

式中, $i$ 、 $r_i$ 、 $N$ 、 $ef$ 、 $EF$ 分别为消费项目类型、均衡因子、人口数量,人均生态足迹、总生态足迹。 $p_i$ 、 $c_i$ 分别为第 $i$ 种项目的世界平均生产能力及人均消费量。

生态承载力( $EC$ )计算公式为:

$$EC = N \times ec = N \times \sum (a_i \times r_i \times y_i) \quad (2)$$

式中, $a_i$ 、 $y_i$ 、 $N$ 、 $ec$ 分别为人均生物生产面积、产量因子、人均生态承载力, $r_i$ 、 $N$ 同前。

生态盈亏( $ed$ )反映生态足迹与生态承载力差额。公式为:

$$ed = ec - ef \quad (3)$$

式中,当 $ed < 0$ 时显示为生态赤字,表明生态环境亏损,反之则为生态盈余,直接反映区域发展是否处于生态承载力范围之内。

生态压力指数( $Epi$ )反映人类活动对生态系统的干扰强度。计算公式为:

$$Epi = ef/ec \quad (4)$$

式中, $Epi < 1$ 表明干扰强度未达到区域生态系统的自反馈上限,生态系统平衡,反之表明生态安全已受到威胁。 $Epi$ 指数越大,生态系统遭受的干扰强度越大。

万元GDP生态足迹反映的是区域经济发展对系统资源利用率高低。指标值越大,区域系统资源的利用效率越低。公式表示为:

$$\text{万元 GDP 生态足迹} = EF/GDP \quad (5)$$

生态足迹多样性指数( $H$ )用来描述区域内各种消费所需生物生产性土地面积的均衡程度,通过Shannon-Weaver<sup>[8]</sup>公式计算:

$$H = - \sum (p_i \times \ln p_i) \quad (6)$$

式中, $p_i$ 、 $\ln p_i$ 分别表示第*i*类土地类型在生态足迹中的比例与分配状况。 $H$ 值越高,则表明区域内类型比例适中,生态系统结构处于稳定状态。

按照 Ulanowicz<sup>[9]</sup>的方法,发展能力指数的计算公式为:

$$C = ef \times H = ef \times \left[ - \sum (p_i \times \ln p_i) \right] \quad (7)$$

## 2.2 模型修正及数据处理

**2.2.1 模型修正** 模型主要在以下几个方面进行了修正:

(1) 生态足迹账户中加入污染排放与水资源。为体现污染物及为治理污染所占用的生态足迹,在原始模型以耕地、草地、林地、水域、化石能源地、建筑用地6大类生态足迹计算的基础上,将污染排放账户纳入其中。以废水(灰水)、废气、固体废弃物等排放量衡量污染直接或间接占用土地的生态足迹。同时,基本模型中的水域仅体现了生物生产功能,水资源(蓝水)生态足迹的意义可以表述为人类在生活生产中消耗水资源的过程。为此加入水资源账户,计算方法就是将消耗的水资源量转化为相应账户的生产面积——水资源用地面积。水资源生态足迹 $EF_w$ 可以表示为:

$$EF_w = N \times ef_w = r_{iw} \times (W/p)$$

式中, $ef_w$ 、 $r_{iw}$ 、 $W$ 、 $p$ 分别代表水资源账户的人均生态足迹、均衡因子、水资源消耗量、水资源全球平均生产能力。

水资源生态承载力体现为区域某一时间段内水资源最大供给量可供支持该区域资源、环境和社会(生态、生产和生活)可持续发展的能力。根据刘乐冕<sup>[10]</sup>的方法在计算中扣除60%维持生态环境的水资源量,水资源承载力 $EC_w$ 公式可表示为:

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times r_{wi} \times y_{iw} \times Q/p$$

式中, $ec_w$ 、 $r_{wi}$ 、 $y_{iw}$ 、 $Q$ 、 $p$ 分别为水资源人均承载力、水资源均衡因子、产量因子、区域水资源总量、水资源全球平均生产能力。

(2) 修正均衡因子以减少误差。40多年来,Wackernagel学者<sup>[1]</sup>、世界自然基金会(WWF)、伦敦动物协会、全球足迹网络(GFN)、水足迹网络等学者组织多次发布了6类账户的均衡因子,其变动幅

度不大。参照杨屹<sup>[11]</sup>计算均值的办法,选取各因子均值用于计算,即耕地、建设用地、林地、化石能源用地、草地、水域分别取2.34、2.34、1.64、1.64、0.48、0.32。同时,假设土地为生物生产能力较差的土地,根据吸纳污染与水资源用地含义及相关文献<sup>[10]</sup>,将二者均衡因子设定为1.0。

**2.2.2 数据来源与处理** 研究数据来源于忻州统计年鉴(2008—2014年)<sup>[12]</sup>、忻州国民经济和社会发展统计公报(2008—2013年)<sup>[13]</sup>、忻州市环境状况公报(2009—2013年)<sup>[14]</sup>、忻州市水资源公报(2004—2014年)<sup>[15]</sup>以及忻州市国土资源局提供的土地利用变更数据(2008—2013年)资料。部分数据经过计算整理并在文中注明。为统一数据统计口径,采用农作物产量替代消费量。

(1) 生物账户全球平均产量表的处理。国内文献提及的生物账户全球平均产量主要有三种来源:一是直接采用1993年联合国粮食及农业组织(FAO)的统计<sup>[16]</sup>;二是Wackernagel等<sup>[1]</sup>在测算1993年意大利平均生态足迹时提出的全球账户平均产量;三是以上述数据为主,个别类别采用我国学者谢鸿宇<sup>[17]</sup>对中国主要农产品全球平均产量更新计算结果。本文在收集1999—2009年FAO统计年鉴<sup>[2]</sup>基础上,计算了部分生物产量,见表1。由此发现个别类别结果差异较大。

在忻州统计年鉴上查阅各项生物账户年产量。本文确定忻州生物账户全球平均产量的原则为,为了与同类研究成果相比较,以及保证数据的完整性,主要采用1993年Wackernagel等<sup>[1]</sup>提出的全球平均产量。核桃、花椒和羊绒3个科目无法归类,为此,采用如下方法估算全球平均产量:核桃直接采用谢鸿宇等<sup>[17]</sup>的测算结果( $2\ 322\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),商务部特办资讯资料显示,我国花椒产量世界领先,采用杨屹<sup>[11]</sup>计算陕西生态足迹时的结果,花椒全球平均产量为 $385\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于羊绒产量较少,认为其产量与羊毛相同。

在消费项目划分以及其所对应的用地类型方面,考虑到忻州的具体情况,猪肉主要由规模化饲养厂生产,饲料来源以本地玉米为主,若将其用地类型归为耕地,则存在较大程度的重复计算,因此将猪肉的用地类型划归为草地。将水果划分为林地原因有以下两点,一是本地果园林木生态功能各方面与林地相似,二是退耕还林工程的实施,退耕地变成经济果林,按林地类型计算。

(2) 能源账户数据处理。忻州市能源消费主要

表1 忻州市生物账户全球平均产量/(kg·hm<sup>-2</sup>)  
Table 1 Global average production of biological accounts in Xinzhou city

类别 Category	1993年 Wackernagel测算 calculations in 1993	2008 谢鸿宇 测算 Xie Hongyu calculation in 2008	1999–2009年 FAO计算平均值 FAO calculated average for 1999–2009	类别 Category	1993年 Wackernagel测算 calculations in 1993	2008 谢鸿宇 等测算 Xie Hongyu calculation in 2008	1999–2009年 FAO计算平均值 FAO calculated average for 1999–2009
稻谷 Rice	2744	3946	3356	红枣 Red dates	3500	—	7242
小麦 Wheat	2744	2790	3356	柿子 Persimmon	3500	—	7242
玉米 Corn	2744	4586	3356	桃 Peach	3500	—	7242
谷子 Millet	2744	—	3356	猪肉 Pork	74	—	—
高粱 Sorbonne	2744	1326	3356	羊肉 Mutton	33	2.5 *	—
豆类 Legumes	1856	2302	848	牛肉 Beef	33	12.5 *	—
薯类 Potato	12607	—	13597	禽肉 Poultry	764	—	—
油料 Oil	1856	736	572	兔肉 Rabbit meat	15	—	—
蔬菜 Vegetables	18000	16927	17095	奶类 Milk	502	104 *	—
核桃 Walnut	—	2322	—	禽蛋 Eggs	400	—	—
花椒 Pepper	—	—	—	羊毛 Wool	15	2.3 *	—
苹果 Apple	3500	23019	7242	羊绒 Cashmere	—	—	—
梨 Pear	3500	—	7242	水产 Aquatic product	29	3264 *	—
葡萄 Grape	3500	8524	7242	蜂蜜 Honey	50	—	—

注: \* 为部分数据计算,无法比较。Note: \* calculated for part of data, not comparable.

包括有煤炭、焦炭、天然气、汽油、柴油及社会电力等,共6个消费项目。利用全球单位化石能源土地面积的平均发热量将其转化为化石能源土地面积,具体为:天然气折算系数单位是 GJ·10<sup>4</sup>m<sup>-3</sup>;电力折算系数单位是 GJ·10<sup>4</sup>kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,电力千瓦时与热量折算系数是单位千瓦时耗煤 397 g 的热量换算<sup>[18-21]</sup>。

(3) 污染排放账户处理。废水和废气的生态足迹分别指用于处理废水、大气污染物使之达到排放标准所占用的生物生产性土地面积。根据刘乐冕<sup>[10]</sup>,杨屹<sup>[11]</sup>居民生活污水排放占用湿地面积以 365 t·hm<sup>-2</sup>的标准进行换算;工业废水比生活污水成分复杂得多,处理难度大,但考虑到计算的可行性,将工业废水视同生活污水处理。计算废气生态足迹时,将其转换为吸收大气污染物所需的林地面积,并按照阔叶林对 SO<sub>2</sub>的平均吸收能力 88.65 kg·hm<sup>-2</sup>、对烟尘和粉尘的滞尘能力 10.11 t·hm<sup>-2</sup>的标准换算。处理固体废弃物主要方法是填埋和堆放,按照单位土地面积可堆积固体废弃物 10.19 万 t·hm<sup>-2</sup>的标准换算。

(4) 水资源账户处理。水资源全球平均生产能力根据资料取 3 140 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup><sup>[10]</sup>。水资源产量因子根据刘乐冕<sup>[10]</sup>取山西省的平均水平,其值为 2.45。

(5) 生态承载力数据处理。本文生态承载力采用面积转换法,利用忻州市 2008–2013 年数据计算。根据生态足迹的土地类型,需要对忻州的耕地、水域、林地、草地、化石能源地、建设用地面积进行转换。耕地以忻州市农村土地利用现状二级分类面积为准。耕地包括水田、水浇地、旱地。林地包括有林地、灌木林地、其他有林地,同时将园地归

为林地。草地包括天然牧草、人工牧草、其他草地。化石能源地,理论上是指专门用于吸收能源燃烧排放的 CO<sub>2</sub>的森林,但目前并没有为此建立专门的用地,所以能源用地承载力面积取为零。

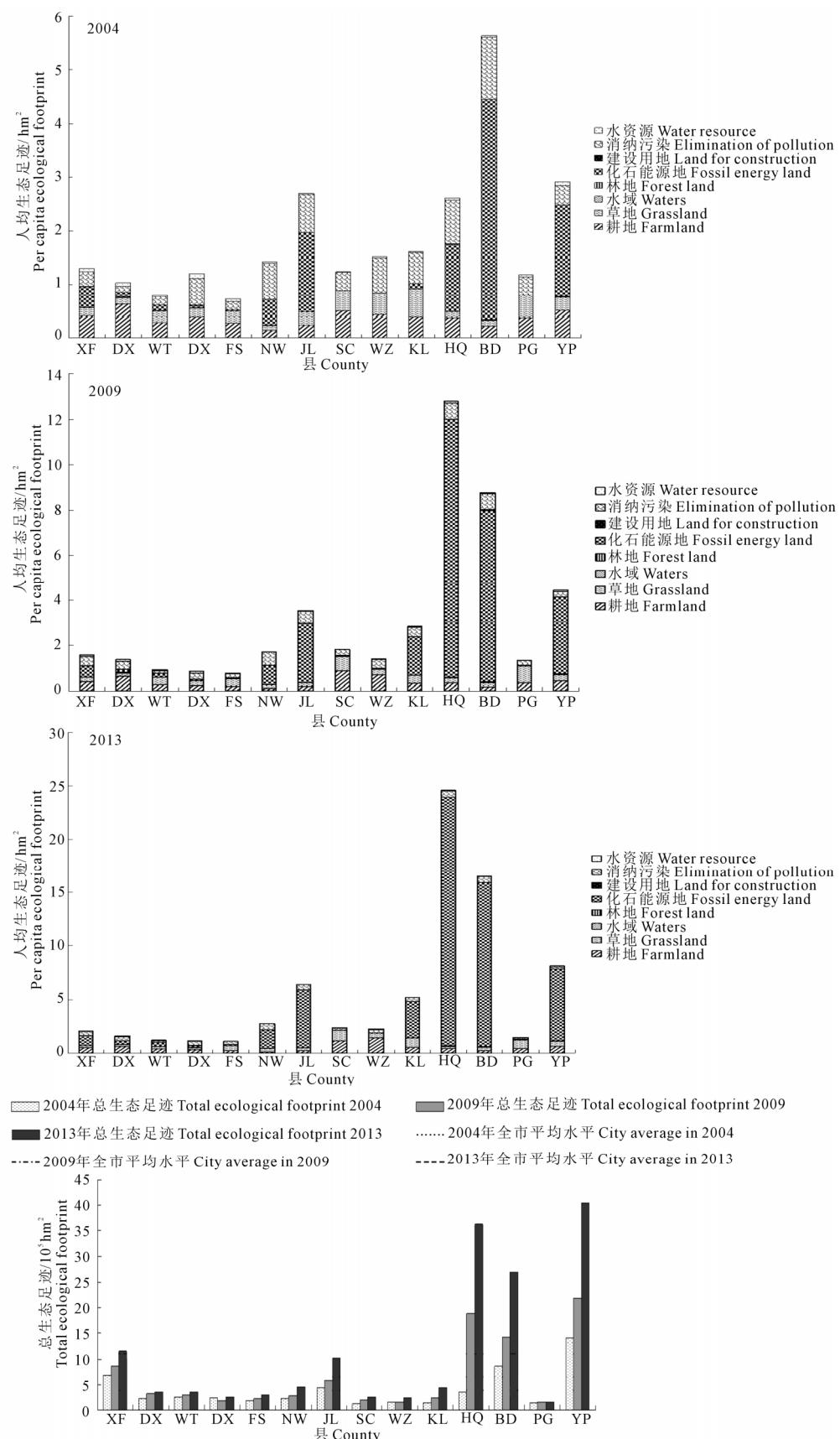
(6) 产量因子。土地类型产量因子选取 Wackernagel 等<sup>[1]</sup>计算中国生态足迹时采用的平均值,耕地、建筑用地为 1.66,林地为 0.91,草地为 0.19,水域为 1.00,化石原料用地为 0。

### 3 结果与分析

分别选取“十五”、“十一五”与“十二五”中的 2004、2009 年与 2013 年 3 个时间节点,比较忻州市域内部生态足迹、承载力、盈亏空间变化。

#### 3.1 生态足迹空间分布

图 1 为各县域人均生态足迹构成表。总体上,2004 年以来忻州各县的人均生态足迹基本上呈快速增长的;其中也表现出一些特点,虚态足迹即化石能源足迹呈现明显的增长趋势,2004 年全市人均能源足迹 1.171 9 hm<sup>2</sup>,其中,静乐、河曲、保德与原平高于上述水平,保德甚至达到 4.104 hm<sup>2</sup>,说明社会经济系统对生态服务消费由以往的供给服务为主向调节服务为主转变。除化石能源外的足迹称为实态足迹,其变化比较缓慢。从人均生态足迹空间分布来看,3 个时间节点上均表现为静乐、河曲、保德、原平高于全市平均水平,主要是这些区域能源资源相对丰富,影响能源利用规模与结构的结果。而其余 8 县(区)生态足迹又低于全市平均水平,其共同点是生物资源账户足迹能占到 50%~70%,尤



注 Note: XF-忻府 Xinfu; DX-定襄 Dingxiang; WT-五台 Wutai; DX-代县 Daixian; FS-繁峙 Fanshi; NW-宁武 Ningwu; JL-静乐 Jingle; SC-神池 Shenchi; WZ-五寨 Wuzhai; KL-岢岚 Kelan; HQ-河曲 Hequ; PG-偏关 Pianguan; YP-原平 Yuanping。下同 The same below。

图1 忻州市生态足迹空间分布

Fig.1 Spatial distribution of ecological footprint in Xinzhous city

其在定襄、神池和五寨表现突出。空间分布上总足迹与人均足迹基本类似,忻府区总足迹高于全市区总足迹平均水平,河曲、保德、原平同样高于全市平均水平,静乐总足迹在2009、2013年低于全市平均水平。

### 3.2 生态承载力空间分布

从承载力组成来看,忻州生态承载力以生态资源为主,主要集中在耕地与林地中。耕地中表现尤

其明显的是处于晋西北旱作农业区的神池、五寨等,可以占到总承载力的70%以上,另外滹沱河沿岸各县耕地承载力也较高,约占50%,林地承载力较高的地区主要集中在五台山与管涔山各县。水资源承载力五台与岢岚较高,而缺水严重的忻府、定襄以及晋西北保德、河曲承载力较小。

从图2 人均承载力来看,宁武、静乐、神池、五寨、

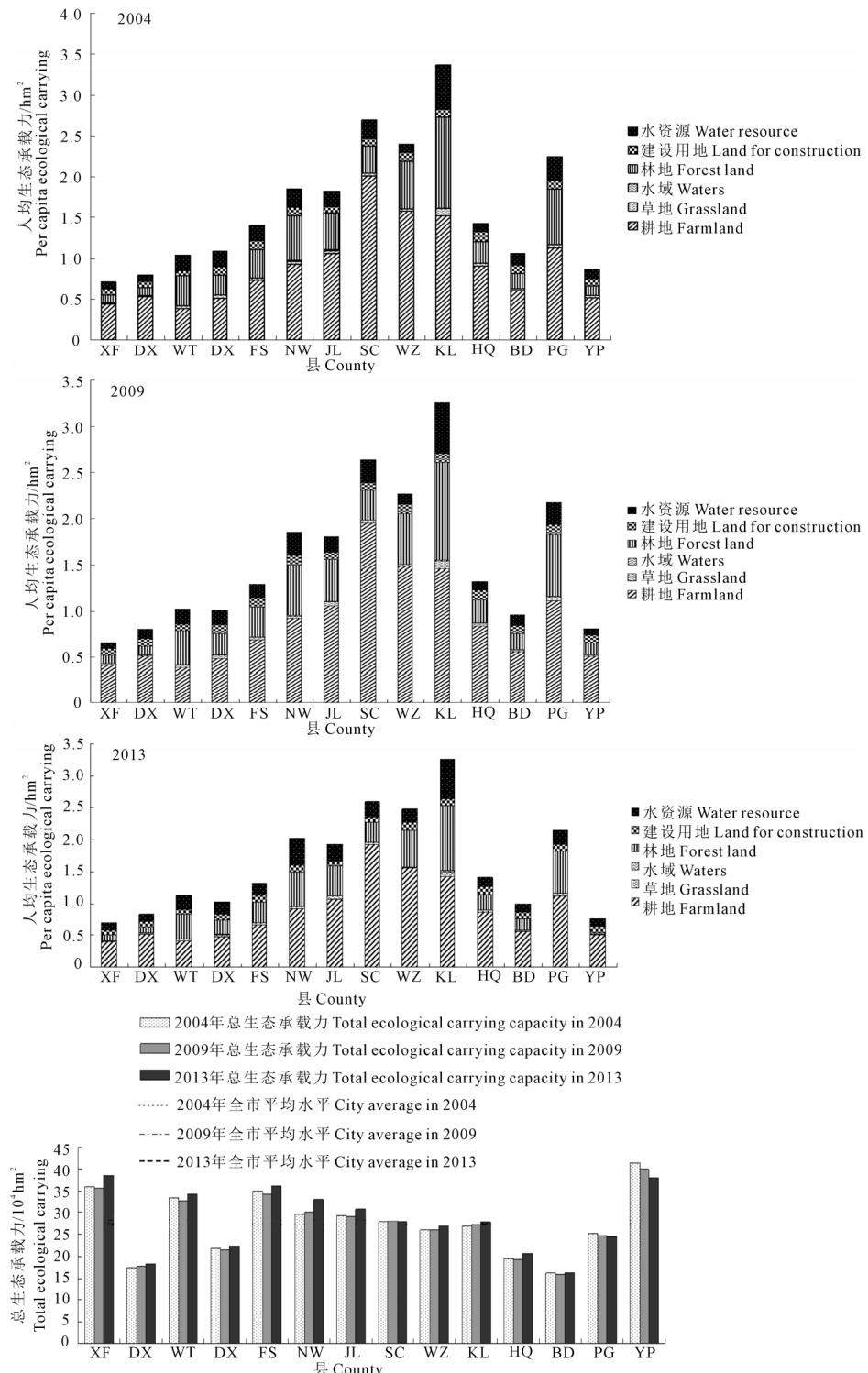


图2 忻州市生态承载力空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological carrying capacity in Xinzhong city

岢岚、偏关较高。这些区域人口相对较少,相对资源富裕,而忻定盆地各县虽为全市主要粮食主产区,但人口基数较大,在一定程度上降低了人均生态承载力。总承载力表现为,忻府、五台、繁峙、宁武、原平高于全市平均水平,静乐、神池、五寨、岢岚接近或超过全市平均水平,定襄、代县、河曲、保德、偏关低于全市平均水平。

### 3.3 生态盈亏与压力空间分布

生态盈亏计算结果见图3,发现在2004、2009、2013年三个时间段,14个县级行政区域显示出不同的特征。2004年生态盈余或保持平衡的共有7个县,分别为五台、繁峙、宁武、神池、五寨、岢岚、偏关。其中岢岚、神池、偏关生态盈余排在前3位分别为 $1.750\text{7}$ 、 $1.463\text{1}$ 、 $1.061\text{3}\text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 。按照WWF中国生态足迹报告标准<sup>[22]</sup>,生态赤字区共有4个级别(见表1),2004年有7个县属于生态赤字区,其中保德、原平生态赤字分别为 $4.581\text{7}$ 、 $2.053\text{6}\text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ,进入严重生态赤字区级别。2009年生态盈余或保持平衡的共有8个县,分别为五台、代县、繁

峙、宁武、神池、五寨、岢岚、偏关,但生态盈余均有所下降,其中五寨、偏关、神池人均生态盈余排在前三位分别为 $0.853\text{6}$ 、 $0.822\text{9}$ 、 $0.803\text{9}\text{ hm}^2$ ,生态赤字区虽数量较2004年减少1个,但有整体上向严重赤字区集中的倾向;2013年生态盈余或持平区有5个,赤字区进一步扩大达到8个,其中严重生态赤字级别扩展到河曲、保德、原平、静乐,人均生态赤字分别为 $23.209\text{4}$ 、 $15.531\text{5}$ 、 $7.356\text{1}$ 、 $4.446\text{4}\text{ hm}^2$ 。由此可见忻州生态盈亏空间分布上极不均匀,表现为生态赤字高度集中,且数值已达到严重生态赤字区下限的数倍。而盈余区向平衡区过渡,最终进入生态赤字区,如五台、代县、宁武、岢岚属于此类,由2009年的盈余区变成2013年的赤字区。从总生态盈亏来看,2013年忻府、五台、繁峙、原平高于全市平均水平,而河曲、保德低于全市平均水平,人口基数和人均生态足迹大小同时决定着总生态盈亏。

图4显示为14个县(区)在 $Epi = 1$ 分布的情况下,保德、河曲远离中心线。从2004年到2013年生态压力指数大于1的区域出现的县(区)明显增多。

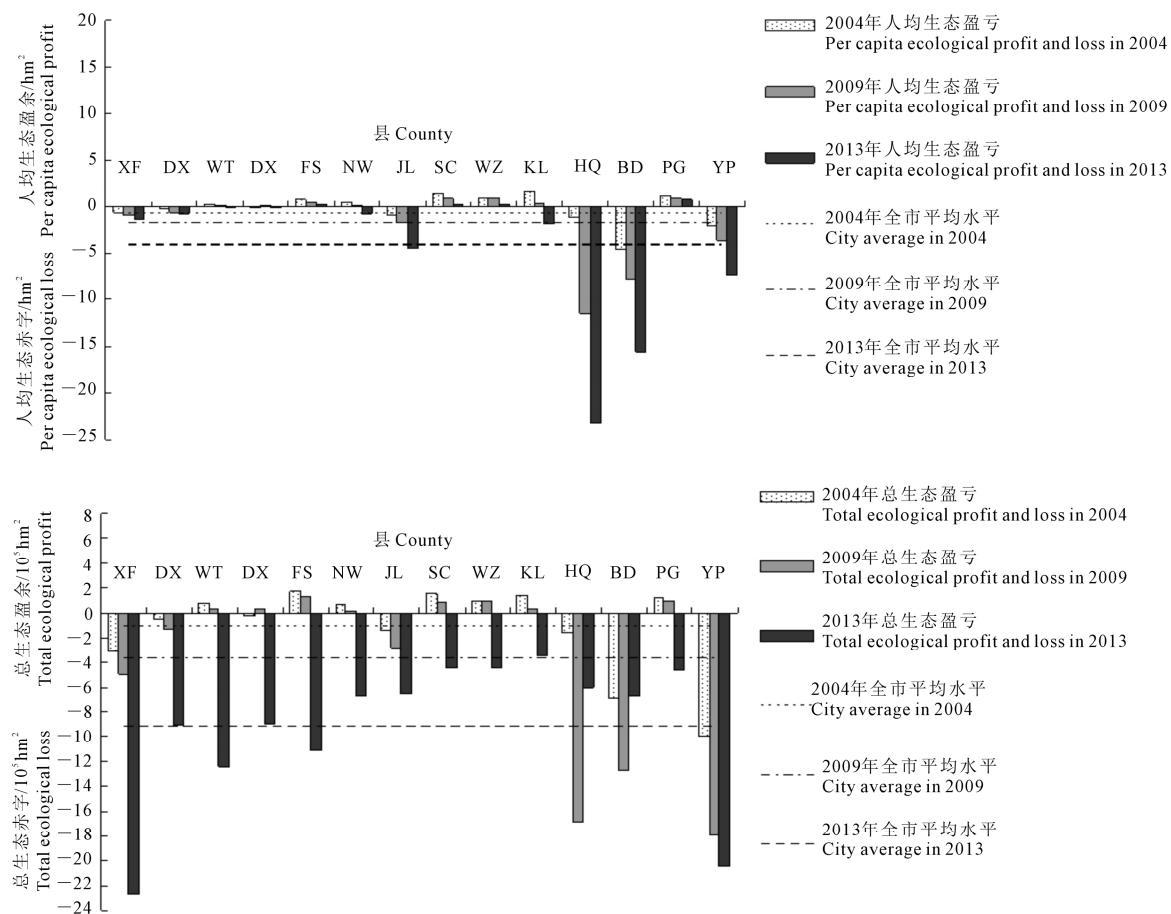


图3 忻州市生态盈亏空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological profit and loss in Xinzhou city

表2 忻州不同时期处于生态赤字区的县(市、区)数量  
Table 2 Number of counties ( cities, districts ) in ecological deficit areas in different periods of Xinzhou city

生态赤字区 Ecological deficit area	2004	2009	2013
生态赤字区 Ecological deficit area	7	6	9
严重生态赤字区 Serious ecological deficit area( $<-2.0$ )	2	3	4
较严重生态赤字区 More serious ecological deficit area( $-2.0 \leq ed < -1.0$ )	1	1	2
中度生态赤字区 Moderate ecological deficit area( $-1.0 \leq ed < -0.5$ )	2	2	2
轻度生态赤字区 Light ecological deficit area( $-0.5 \leq ed < -0.1$ )	2	0	1
生态盈余或持平区 Ecological surplus or flat area	7	8	5
生态基本持平区 Basic ecological flat area( $-0.1 \leq ed < 0.1$ )	0	1	1
生态盈余区 Ecological surplus area( $ed \geq 0.1$ )	7	7	4

注:划分标准来源于WWF中国生态足迹报告<sup>[22]</sup>。

Note: Classification criteria derived from WWF China Ecological Footprint Report<sup>[22]</sup>.

### 3.4 综合可持续发展能力空间变化

生态足迹的大小受该地区的人口、经济发展和技术效率等因素的影响,为了利用生态足迹概念分析生态、经济和社会之间的关系,引入IPAT等式<sup>[6]</sup>加以推导和分析。

图5反映了忻州生态、经济和社会协调发展的空间状态。分别以2004、2009、2013年忻州总体人均生态足迹为参数,在环境因子不变的情况下,用人均GDP反映经济发展程度即区域富裕度,用万元GDP占用生态足迹衡量经济活动的自然空间占用率即技术效率,图中的曲线表示其动态关系。若分布在曲线以上表明创造相同的GDP,该地区的经济活动对自然空间的占用率高于全市平均水平,区域技术效率较低,对生态环境的扰动较大;反之则表明,该地区的资源能源利用率高于全市水平,其技术效率较高,对生态环境的影响较小。

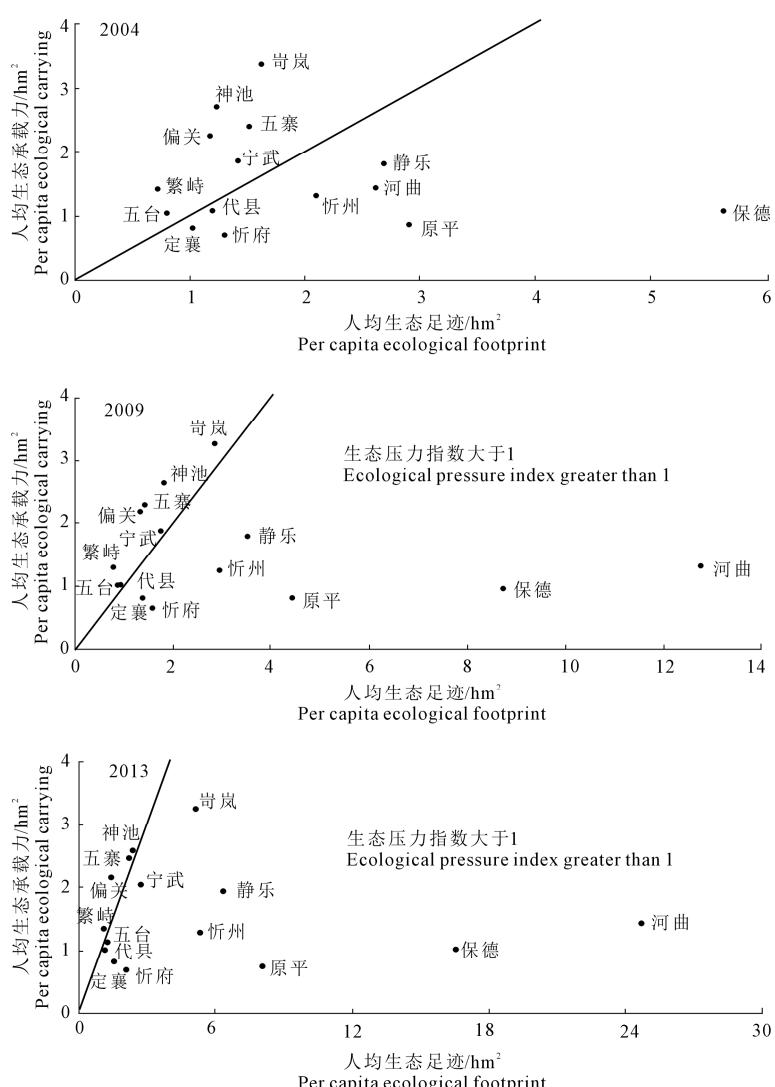


图4 忻州市生态压力指数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological pressure index in Xinzhou city

由图5所示,河曲、保德、原平、静乐等4个地区在三个时间节点上都不同程度地处于曲线以上区域。资源、能源利用效率和经济发展程度不匹配,维持经济又好又快发展,技术创新成为减少生态占用的驱动力。分布在曲线下方的县域在其相应的经济条件下,资源利用效率高于全市平均水平,或者说其经济活动中突出了技术要素的贡献率,在保护好环境的同时不断提高人民生活的富裕度。

#### 4. 结论与讨论

在生态足迹模型中增加了包括废气、废水和固体废弃物科目的污染排放账户和水资源账户,重新确定了忻州各项生物账户全球平均产量与生产性土

地均衡因子。采用修正后的生态足迹模型测算了忻州市14个县(区)生态足迹和生态承载力空间差异。结论为:(1)人均生态足迹集中于区域能源资源相对丰富的县域,如静乐、河曲、保德、原平。(2)忻州生态承载力主要来自于耕地与林地,人均生态承载力主要集中于相对资源富裕人口较多的县域,如宁武、静乐、神池、五寨、岢岚、偏关。(3)2004—2009年间生态赤字县域数量呈上升趋势,且整体上向严重赤字区、压力指数大于1的区域集中。(4)从资源、能源利用效率和经济发展程度的匹配上,可以分为两类区域,河曲、保德、原平、静乐等4县经济活动的自然空间占用率高于全市平均水平。

针对各县域生态承载力的空间差异,其主导因

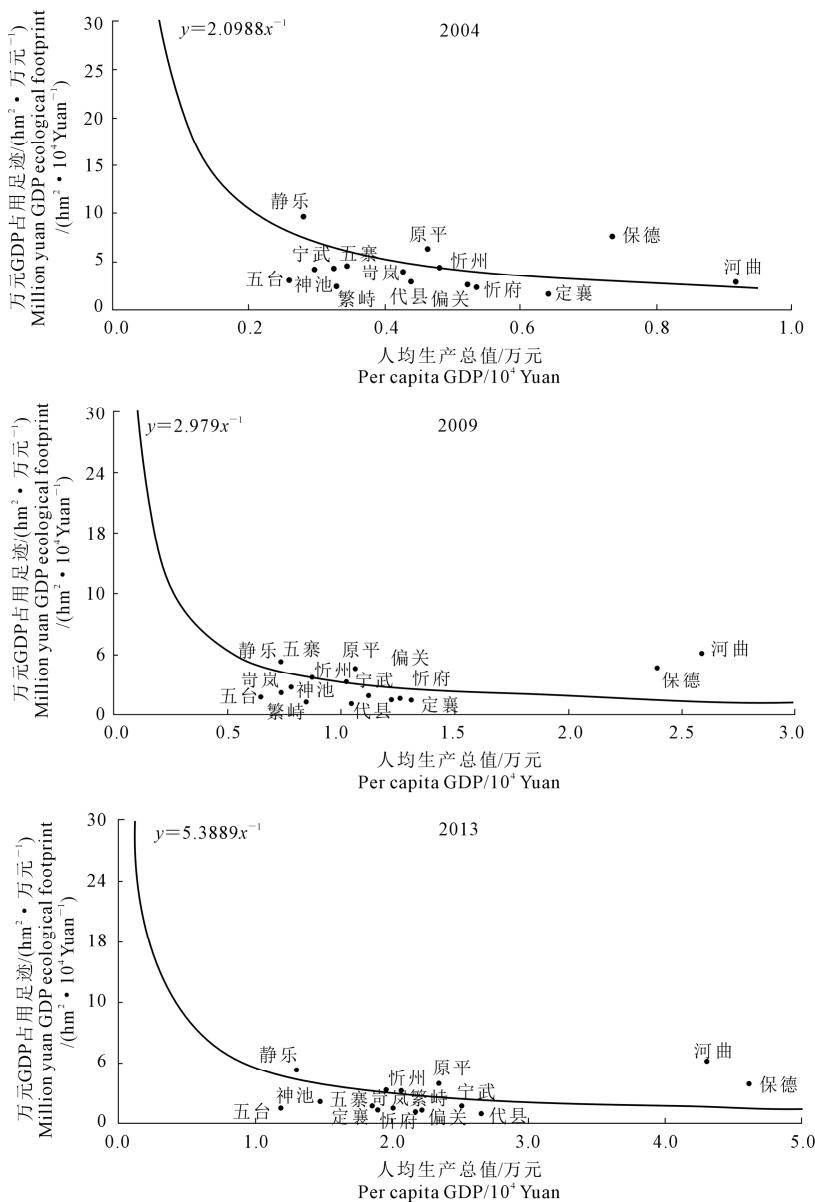


图5 忻州2004、2009、2013年各地生态、经济和社会IPAT分析

Fig.5 Analysis on IPAT of ecology, economy and society in Xinzhou city in 2004, 2009 and 2013

素为能源利用与城镇发展<sup>[23-25]</sup>。忻州市内的“东六县、西八县”地理区位、资源禀赋、自然环境有着明显差异。“东六县”所处的地区主要为滹沱河宽谷山区,土地平坦肥沃,农业生产水平较高、城镇集中,人口稠密。“西八县”所处黄土高原丘陵沟壑区,干旱少雨,以能源开采为主。因此,忻州市减少生态赤字缓解生态供需矛盾必须同区域实情结合,可以结合“十三五”规划,“西八县”通过降低过剩产能,降低能源生态足迹,同时结合精准扶贫政策,实行扶贫移民搬迁。“东六县”以持续改善农业生产条件,降低工农业生产能耗与污染,减少生态赤字。研究结果可为矿粮复合区与重点生态功能区生态环境治理提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines and South Korea for 1961–1999: comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach [J]. Land Use Policy, 2003, 21(3):261-269.
- [2] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):120-130.
- [3] 谢高地,曹淑艳,鲁春霞,等.中国生态资源承载力研究[M].北京:科学出版社,2011.
- [4] 周涛,王云鹏,龚健周,等.生态足迹的模型修正与方法改进述评[J].生态学报,2015,35(14):1-17.
- [5] 方恺.足迹家族:概念、类型、理论框架与整合模式[J].生态学报,2015,35(6):2741-2748.
- [6] 张恒义,刘卫东,林育欣,等.基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J].生态学报,2009,29(5):2738-2748.
- [7] 郭晓娜,李泽红,董锁成,等.基于改进生态足迹因子的区域可持续性动态评估—以陕西省为例[J].水土保持通报,2014,34(2):142-146.
- [8] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [9] Ulanowicz R E. Growth and development: ecosystems phenomenology [M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [10] 刘乐冕.炎陵县生态足迹动态分析与变化趋势研究[D].长沙:湖南农业大学,2009.
- [11] 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,2015,12(24):1-11.
- [12] 山西省统计局.忻州统计年鉴[DB/OL].[2016-06-09].<http://www.stats-sx.gov.cn/tjsj/tjnj/>
- [13] 忻州市统计局国家统计局忻州调查队.忻州市2013年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].[2016-05-15].[http://www.stats-sx.gov.cn/tjsj/tjgb/201706/t20170627\\_82919.shtml](http://www.stats-sx.gov.cn/tjsj/tjgb/201706/t20170627_82919.shtml)
- [14] 忻州市环境保护局.忻州市环境状况公报[EB/OL].[2016-05-19].<http://hbj.sxxx.gov.cn/xgk/hjzlgb/>.
- [15] 山西省水利厅.山西水资源公报[EB/OL].[2016-05-27].<http://www.sxwater.gov.cn/zncs/szyzc/szygb/>.
- [16] 联合国粮食及农业组织.全球主要农作物产量报告[EB/OL].[2015-01-24].<http://www.fao.org/home/en/>.
- [17] 谢鸿宇,叶慧珊.中国主要农产品全球平均产量的更新计算[J].广州大学学报(自然科学版),2008,7(1):76-80.
- [18] 张家其,王佳,吴宜进,等.恩施地区生态足迹和生态承载力评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):603-608.
- [19] 郭荣中,申海建,杨敏华.基于灰色模型的长沙市生态足迹与生态承载力预测分析[J].水土保持研究,2015,22(4):195-200.
- [20] 焦雯珺,闵庆文,李文华.基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J].资源科学,2014,36(11):2392-2340.
- [21] 汪霞,张洋洋,怡欣,等.基于生态足迹模型的舟曲县生态承载力空间差异[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):687-688.
- [22] 世界自然基金会.中国生态足迹报告2012[R].北京:中国科学院,2012.
- [23] 赵鹏宇,郭劲松,崔婧,等.忻州市相对资源承载力的时空动态变化[J].水土保持研究,2017,24(2):341-347.
- [24] 赵鹏宇,步秀芹,崔婧,等.2004-2013忻州市生态足迹和承载力变化[J].水土保持研究,2017,24(4):373-378.
- [25] 赵鹏宇,刘晓东,步秀芹,等.忻州市相对资源承载力的空间结构差异——基于相对资源承载力模型的改进[J].资源与产业,2017,19(3):60-66.