

基于 GIS 的中国 2000 年水足迹省区差异分析

高孟绪¹, 任志远¹, 郭 斌¹, 李小燕²

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 陕西理工学院历史文化系, 陕西 汉中 723001)

摘 要: 总结目前对于水足迹测评的常用方法, 并简要介绍了虚拟水的核算原则。通过对 2000 年中国各省人均水足迹与人均用水量的比较, 借助于统计分析软件 SPSS 对各省区人均水足迹进行了系统聚类, 在 GIS 软件的支持下, 将中国 31 个省区的人均水足迹划分为 5 类, 其中人均水足迹在 $480\text{ m}^3/\text{a}$ 以下的仅有广西, $480\sim 550\text{ m}^3/\text{a}$ 的有四川、贵州、江西、浙江, $700\sim 850\text{ m}^3/\text{a}$ 的有新疆、甘肃、宁夏、山西、北京、上海、天津、黑龙江、辽宁, $850\sim 950\text{ m}^3/\text{a}$ 的有内蒙古和青海, 其余省份介于 $550\sim 700\text{ m}^3/\text{a}$, 制作了中国 2000 年各省人均水足迹空间分布图。

关键词: 水资源足迹; 虚拟水; 空间差异分析; GIS
中图分类号: Q 149 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008) 01-0131-06

水是人类和一切生物赖以生存和发展的物质基础, 也是构成生态环境的基本要素。由于自然和人为因素的影响, 水资源危机日益明显, 水资源短缺已经成为许多国家和地区社会经济可持续发展的瓶颈, 也是我国 21 世纪所面临的亟待解决的重大问题。目前, 对于水资源的现状及开发利用、保护管理, 水资源质量评价、优化配置以及价值评估等已有大量的研究论文, 理论成果也不断完善。然而人类不仅直接利用水资源, 更多的是间接地消费由水资源提供的产品和服务, 因此核算人类对水资源的真实消费并揭示其区域差异具有重要意义, 但目前国内外这方面的研究相对还较少。Allan, Gleick, Hoekstra 和 Chapagain 等最早提出了虚拟水的概念, 并进行了水足迹的测评研究^[1~3]; 徐中民、龙爱华、王新华、张志强、马静等先后对于区域以及中国范围内的水足迹作了初步估算, 并提出许多提高水资源利用率的对策^[5~9], 程国栋院士撰文从战略安全的角度提出了虚拟水战略的对策建议^[4]。但探讨区域间水资源足迹的空间差异, 揭示其变化规律的相关文章较鲜见, 本文拟在此方面有所突破。

1 水足迹的基本理论

1.1 水足迹的相关概念

人类不仅通过获取必须的食物、日用品以及日常生活所需等途径直接消费水资源, 而且间接地消费由水资源所提供的各种产品以及为人类提供的生态系统服务和功能。基于对生态足迹概念的认识, 水资源足迹(Water footprints, WF) 可定义为: 在一

定的物质生活水平下, 生产一定人群(个体、区域或全球) 消费的产品和服务所需要的水资源数量。通过对水资源足迹的定量测评以及区域空间差异分析, 可以真实地反映某一国家或地区对水资源系统的消费和需求状况, 揭示人类对水资源量的承载压力, 从而发现对水资源足迹有重要意义的因素, 有效地提高水资源利用率, 实现对水资源的可持续发展利用。

虚拟水(Virtual water) 是英国学者 Tony Allan 于 20 世纪 90 年代初提出的新概念, 是指生产商品和服务所需要的水资源数量^[1]。在人类对水资源的消费量中, 直接消费的水量并不大, 大部分的消耗量是通过间接消耗实现的, 它们以“看不见”的形式蕴藏于产品和服务中, 这些生产过程中所消耗的水量称为“虚拟水”。当人们直接消费这些产品和服务时, 实际上是以虚拟水的形式消费了水资源, 因此虚拟水的消费量是水资源足迹的主要组成部分, 对于水资源足迹的考察分析有重要意义^[4]。

1.2 水足迹的测评方法

一个国家或地区的水足迹等于生产该国家或地区居民消费的产品和服务所直接或间接利用的水资源总量。通常采用两种计算方法^[6~9]: 一种是考虑一个国家或地区居民消费的产品或服务的贸易影响, 将一个国家或地区的水足迹表示为:

$$WF = VW + RW + NVWI \quad (1)$$

式中, WF 为一个国家或地区的水资源足迹; VW 为本地居民消费的虚拟水总量; RW 为本地居民生活利用的实体水消费(包括实际生活用水和服务业

用水); $NVWI$ 为净进口虚拟水消费量, 其值可以为负。净进口虚拟水包括农产品净进口和工业产品净进口两部分。但这种方法在考虑当前省与省之间的地区贸易时不易获得详细的贸易数据, 从而较难获得准确数据。

另一种方法是把水足迹看成一个国家或地区居民所消费的产品(或服务)数量与它们各自的单位产品虚拟水含量相乘求和得到, 其计算公式为:

$$WF = RU + \sum_{i=1}^n P_i \times VWC_i \quad (2)$$

式中, WF 为一个国家或地区的水资源足迹; RU 为居民生活实体水消费总量; P_i 为第 i 种产品(或服务)的消费总数量; VWC_i 为第 i 种产品(或服务)的单位虚拟水消费量。在这种方法中, 居民的生活水消费包括居民实际生活用水和服务业用水。生活用水主要是城镇居民生活用水和农村居民生活用水, 服务业用水主要是第三产业用水和城镇公共用水。而测评一个国家或地区的水资源足迹主要需要量化虚拟水消费量, 一般情况下, 由于产品消费的实物量数据比较容易获得, 因而计算单位产品的虚拟水含量在水资源足迹测评中最为关键, 计算也最为复杂。

1.3 虚拟水消费的计算方法

工业品消费中的虚拟水含量计算十分复杂。首先, 工业品生产工艺复杂导致其虚拟水核算复杂; 其次, 工业品不同于农产品, 一般属于耐用(可折旧)产品。而且工业产品中的虚拟水含量相对农产品而言数量较小, 目前对其的计算多采用估计方法或忽略不计。

单位动物产品虚拟水含量, 主要依赖于动物的类型、动物的饲养结构和动物成长的自然地理环境(气候条件)等, 由于需考虑的数据较多, 且通常难以获得, 目前多数研究采用 Chapagain 和 Hoekstra 计算世界各国动物产品的虚拟水含量研究中的中国部分的数据成果。

由于农业用水占全球淡水总量的 80% 左右, 因此, 目前的研究主要集中在农作物的虚拟水含量^[7]上。生产农作物产品需要的水资源主要取决于农作物的类型、生长区域的自然地理条件、使用的灌溉系统及管理方式等。单位农产品的虚拟水含量可由公式(3)计算:

$$V_{rn} = \frac{W_{rn}}{P_{rn}} \quad (3)$$

式中: V_{rn} 为区域 r 作物 n 单位产量的虚拟水含量 (m^3/t); W_{rn} 指区域 r 作物第 n 生育期需水量 (m^3/hm^2); P_{rn} 是区域 r 作物 n 的产量 (t/hm^2)。

作物的生育期需水常根据联合国粮农组织推荐的标准彭曼公式和当地的气象资料计算获得^[7], 若考虑农作物产品的加工处理程度, 虚拟水的计算应考虑价值构成比例和产品质量比例因子以修正结果。

2 研究思路

2.1 研究技术路线

本文研究区域为中国大陆 31 个省、自治区和直辖市, 不包括台湾、香港和澳门。由于各个省区面积不同, 人口数量也相差悬殊, 因此对于居民生活水消费和虚拟水消费量均采用人均值, 以便于在中国区域范围内的比较研究。在分析中国各省人均水足迹和人均用水量的基础上, 结合各省相关的人均虚拟水消费量数据, 通过对比分析, 揭示区域间的水足迹空间差异特征, 并做出中国各省人均水足迹的空间分布图。研究技术路线如图 1 所示。

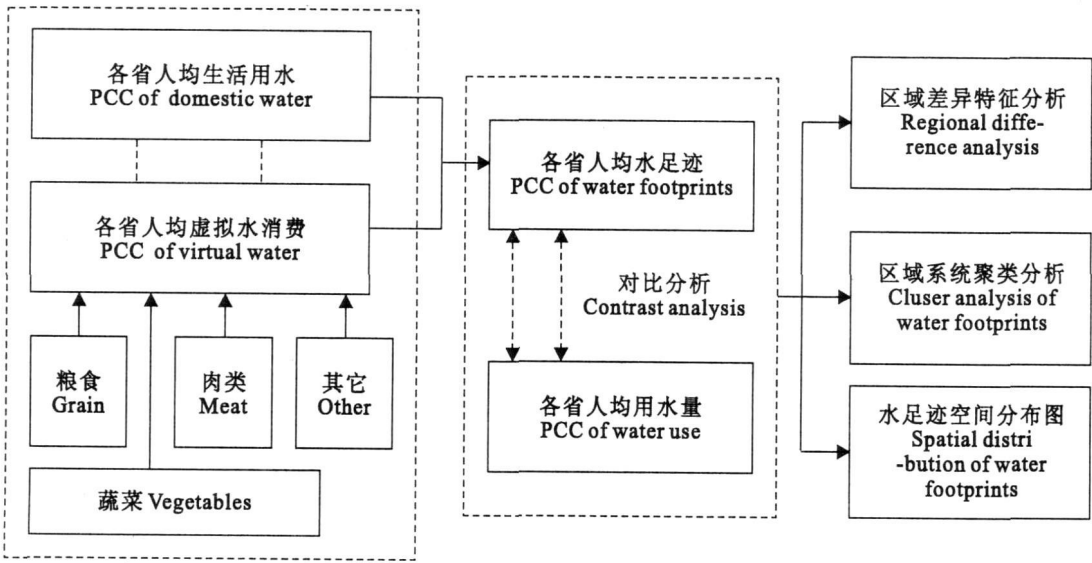
2.2 研究数据来源

王新华等对于中国 2000 年水足迹进行了计算, 其首先计算出中国各省区某种特定作物需水量和单位虚拟水含量, 然后根据作物种植面积加权平均获得该省农作物的虚拟水含量, 最后根据统计的产品消费量数据, 最终计算出农产品消费的虚拟水; 根据动物产品消费量的统计数据及有关动物产品的虚拟水含量的研究成果, 计算出动物产品的虚拟水含量; 把油料作物、鲜蛋、奶制品、酒精、饮料、瓜果、糕点和烟草等作为其它消费产品计算其虚拟水含量, 其计算结果数据可参看相关论文^[9]。本文拟采用其部分计算数据, 另外本文中其它数据来源于中国各省 2000 年的统计年鉴资料^[19], 数据见表 1。

3 水足迹差异分析

3.1 人均水足迹和用水量差异分析

从全国范围来看, 2000 年中国各省人均用水量为 $430 \text{ m}^3/\text{a}$, 人均水足迹为 $601.66 \text{ m}^3/\text{a}$ 。但是各省区人均用水量和水足迹却表现出很大的差异, 若在全国范围对比各省人均水足迹和人均用水量的关系, 发现其对应关系杂乱无章, 但将广西、黑龙江、西藏、宁夏、新疆 5 个省区的数据单独列出, 将其它 26 个省区及全国的平均数据对比, 通过图 2, 可以发现两者呈现较好的一致性, 各省区的人均水足迹普遍高于人均用水量, 且对应规律明显。而其它 5 个省区的数据也呈现出基本一致的规律, 见图 3。即这 5 个省的人均用水量均超过人均水足迹, 其中又以新疆地区人均用水量 $2490 \text{ m}^3/\text{a}$ 为最大。



(PCC :Per capita consumption 人均消费量)

图 1 研究技术路线
Fig.1 Technological route of the study

表 1 2000 年中国部分省区(市) 人均水足迹和用水量(m^3/a)
Table 1 PCC of water footprints(WF) and water use in most provinces of China in 2000

省份 Provinces	人均水足迹 PCC of WF	人均用水量 PCC of water use	省份 Provinces	人均水足迹 PCC of WF	人均用水量 PCC of water use
北京 Beijing	734.51	290.00	山东 Shandong	573.12	270.00
天津 Tianjin	805.01	230.00	河南 Henan	564.95	220.00
河北 Hebei	576.35	310.00	湖北 Hubei	568.93	450.00
山西 Shanxi	707.97	170.00	湖南 Hunan	591.99	490.00
内蒙古 Inner Mongolia	900.45	720.00	广东 Guangdong	618.21	500.00
辽宁 Liaoning	754.39	320.00	海南 Hainan	593.24	560.00
吉林 Jilin	591.96	420.00	重庆 Chongqing	559.60	180.00
上海 Shanghai	764.09	650.00	四川 Sichuan	506.00	250.00
江苏 Jiangsu	614.17	600.00	贵州 Guizhou	536.98	240.00
浙江 Zhejiang	536.14	430.00	云南 Yunnan	600.61	340.00
安徽 Anhui	601.57	300.00	陕西 Shaanxi	568.05	220.00
福建 Fujian	577.39	510.00	甘肃 Gansu	706.28	480.00
江西 Jiangxi	522.40	530.00	青海 Qinghai	935.75	540.00

3.2 区域系统聚类分析

对中国 31 个省区的虚拟水数据,借助于统计分析软件SPSS 12.0 中的Herachical cluster 进行系统聚类分析。数据处理方法为标准差标准化,聚类时样本间距离采用欧氏距离测度,最后采用最短距离法计算类间的距离对样本进行归类,得到聚类谱系图(如图 4)。

根据聚类分析的原理,通过用数学方法进行的聚类划分,有效地避免了人为分类和定性分析的主观随意性^[1]。由图 4 可以看出:① 山西、甘肃、上

海、新疆、辽宁、黑龙江、宁夏、天津、北京、内蒙古、青海这 11 个省区属于一类,其人均虚拟水消费和总的人均水足迹均在 $600 \text{ m}^3/\text{a}$ 以上,而又以内蒙古和青海两个省区为最大(人均虚拟水消费分别为 863.79 和 $885.55 \text{ m}^3/\text{a}$),从而形成一个小类;② 广西单独为一类,分析其数据知,广西的居民人均虚拟水和人均水足迹分别为 401.69 和 $466.31 \text{ m}^3/\text{a}$,在所有省区中为最小值;③ 其余 19 个省区为一类,其中浙江、江西、贵州、四川为一子类,这 4 个省的人均虚拟水消费相对较小。

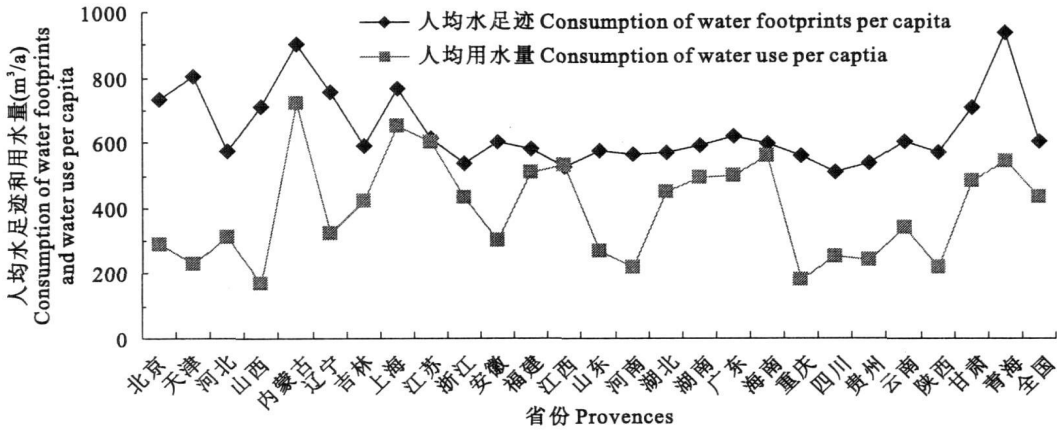


图 2 中国大部分省人均水足迹和用水量对比 (2000 年)

Fig. 2 Consumption of water footprints per capita and water use in most provinces of China in 2000

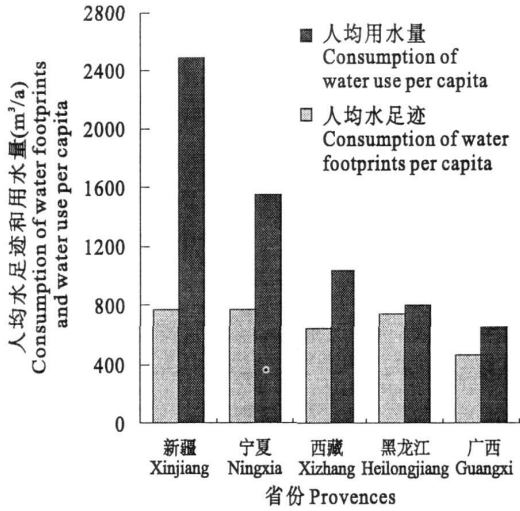


图 3 中国 5 省人均水足迹和用水量对比 (2000 年)

Fig. 3 Consumption of water footprints per capita and water use in 5 provinces of China in 2000

3.3 人均水足迹空间差异分析

依据中国 31 个省区的人均水足迹数据,运用 Arc View GIS 3.3 软件,在矢量化中国区域界限的基础上,将各省人均水足迹作为一个重要的属性值,制作中国各省人均水足迹空间分布图^[13],见图 5。

根据运用系统聚类分析方法得出的中国各省人均水足迹的聚类结果,运用软件的 Classify 功能将中国 31 个省区的人均水足迹分为五类,分类标准见图 5 的图例。对照该空间分布图,可以看出在中国各省人均水足迹在 $0\sim480\ m^3/a$ 范围内,仅有广西一个省区,这也与前面的聚类结果相吻合;而最高值 $850\sim950\ m^3/a$ 的省份为内蒙古和青海;四川、贵州、江西、浙江 4 个省区的人均水足迹介于 $480\sim550\ m^3/a$;其它省份的分布规律也显而易见。

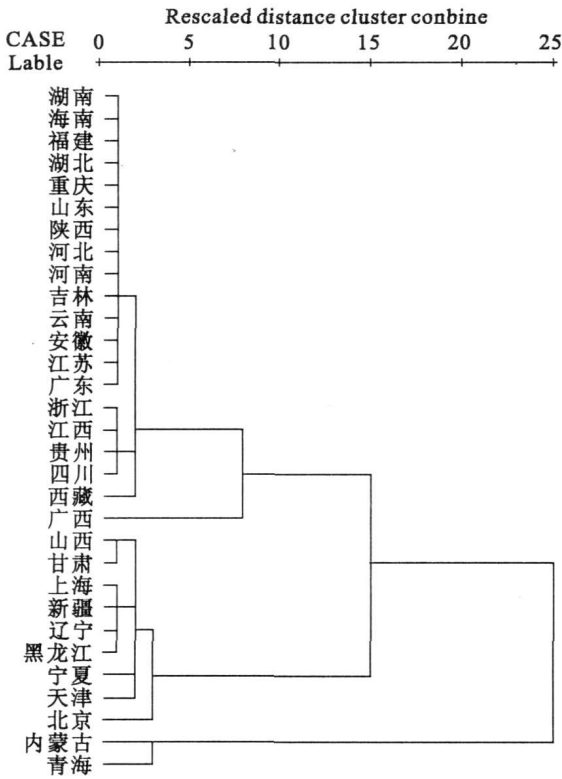


图 4 聚类分析树状图

Fig. 4 Tree type of duser analysis

中国 31 个省区的人均水足迹存在着较为明显的空间差异,从而在图 5 中我们可以看到人均水足迹可以划分为几个大类。造成这种省际间差异的主要原因有以下几个:① 由于不同省区之间生活水平、民族构成、生活习惯等造成人们的消费结构有所不同,而不同饮食结构对应的虚拟水消费差别很大,一般来讲,肉类消费水平高的地区,虚拟水消费相对较大;② 粮食在虚拟水消费中占有较大比重,各省区原粮消费水平的不同也造成人均虚拟水消费的差

异;③ 不同的农业生产区位、生产方式、气候条件等造成了农作物产品的单位虚拟水含量的不同,从而最终影响人均水足迹;④ 城乡不同消费水平的差

异,广大农村普遍不富裕,而农村居民人口数又占全国总人数的绝大部分,所以城市化水平的不同必然造成不同省区的人均水足迹的差异。

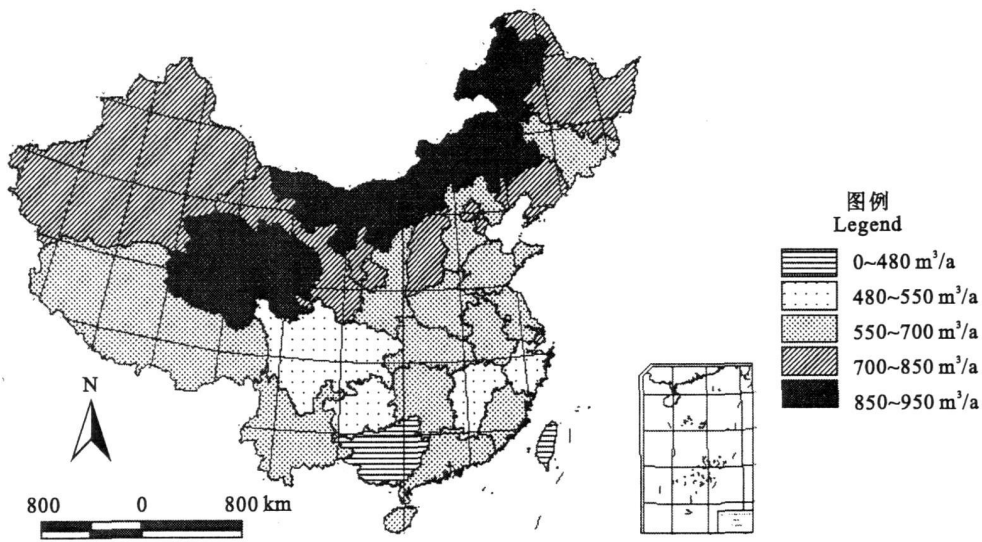


图 5 中国各省人均水足迹空间分布(2000 年)

Fig. 5 Spatial distribution of consumption of water footprints per capita in provinces of China in 2000

4 结论与讨论

通过比较中国各省区人均水足迹与人均用水量关系,发现各省人均水足迹与人均用水量有很好的对应关系。中国 31 个省区的人均水足迹可划分为 5 类,其中人均水足迹在 480 m³/a 以下的省份仅有广西;480~550 m³/a 的有四川、贵州、江西、浙江;700~850 m³/a 的有新疆、甘肃、宁夏、山西、北京、上海、天津、黑龙江、辽宁;850~950 m³/a 的有内蒙古和青海;其余省份介于 550~700 m³/a,中国 2000 年各省区人均水足迹空间分布图直观地反映出了各省区差异。

水资源足迹的衡量揭示了人类对于水资源的真实消费状况,虽然目前对于水足迹的具体核算尚没有统一确定的计算方法,而且对于水资源核算时所包含的内容也有所不同,但是分析现有研究成果,可以发现不同学者计算的最终数值虽有所不同,其区域差异规律却基本一致,所以研究水足迹的计算数据可以发现区域间水资源消费的差异。相对于国家甚至是世界范围而言,水资源的短缺通常只是局部现象,而当以系统的角度进行虚拟水战略研究时,往往能够有效地从问题范围之外找到解决内部问题的应对策略,从而通过贸易的方式最终解决水资源短缺问题^[4]。

参 考 文 献:

[1] Allan J A · Fortunately there are substitutes for water other wise our hydro political futures would be impossible[A] · Priorities for Water Resources Allocation and Management[C] · London :ODA , 1993. 13—26.

[2] Gleick P H · The world 's water 2000~2001[M] · Washington D C ;Island Press ,2000. 20—37.

[3] Hoekstra A Y · Virtual water trade an introduction[A] · Hoekstra A Y · Virtual Water Trade , Value of Water Research Report Series(No . 12)[C] · I HE Delft , 2003. 13—23.

[4] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路[J] · 中国科学院院刊, 2003, (4) : 260—265.

[5] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J] · 地理学报, 2003, 58(6) : 861—869.

[6] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J] · 冰川冻土, 2005, 27(5) : 774—780.

[7] 龙爱华, 徐中民, 张志强, 等. 甘肃省 2000 年水资源足迹的初步估算[J] · 资源科学, 2005, 27(3) : 123—129.

[8] 马 静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的估算[J] · 资源科学, 2005, 27(5) : 96—100.

[9] 龙爱华, 张志强, 徐中民, 等. 甘肃省水资源足迹与消费模式分析[J] · 水科学进展, 2005, 16(3) : 418—425.

[10] 中国统计局. 中国统计年鉴 2001[M] · 北京: 中国统计出版社, 2001.

[11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版)[M] · 北京: 高等教育出版社, 2002. 69—84.

[12] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. Arc View 地理信息系统空间分析方法[M] · 北京: 科学出版社, 2002. 99—111.

Analysis on regional differences of water footprint in China in 2000 based on GIS

GAO Meng xu¹, REN Zhi yuan¹, GUO Bin¹, LI Xiao yan²

(1. College of Tourism and Environmental Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2. Department of History and Culture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

Abstract : The article summarized the common methods of measuring water footprint currently, and analyzed synoptically the usual principle of calculating virtual water. The relationship of consumption of water footprint per capita and water use in provinces of China in 2000 is analyzed. With the help of statistical analytical software SPSS, a cluster analysis is made of consumption of water footprint per capita in provinces of China. In the end, based on GIS (Geographical Information System), a spatial distribution map is made and the consumption of water footprint per capita in 31 provinces of China are divided into five types. The result is that: only Guangxi's consumption of water footprint per capita is below $480 \text{ m}^3/\text{a}$; Sichuan, Guizhou, Jiangxi and Zhejiang are between $480 \sim 550 \text{ m}^3/\text{a}$; The consumption of water footprint per capita in the provinces of Xinjiang, Gansu, Ningxia, Shanxi, Beijing, Shanghai, Tianjin, Heilongjiang, Liaoning is categorized between $700 \sim 850 \text{ m}^3/\text{a}$; The provinces of Inner Mongolia and Qinghai have a high consumption of $850 \sim 950 \text{ m}^3/\text{a}$; Other provinces lie in $550 \sim 700 \text{ m}^3/\text{a}$.

Key words : water footprint; virtual water; spatial difference analysis; GIS

(上接第 124 页)

Assessing benefits of the conversion of cropland to forest and grassland project in the mountain area of southern Ningxia

MI Wen bao^{1,2}, FAN Xing gang³, XIE Ying zhong¹

(1. Grass Industry Research Institute, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. Office of Scientific Research, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract : The paper sets up the index systems from the theory of social, economic and ecological complex system, and calculates the segmental data which are difficult to measure using relevant experts' research results for reference. Based on the method of quantitatively describing the ecological benefit, the paper uses the principal component analysis (PCA) to calculate the project of the Converting Slope Farmland into Forestland and Grassland during the last five years. The result shows that the ecological benefit of the project of Converting Slope Farmland into Forestland and Grassland in mountain area of southern Ningxia in 2004 is 2.2 times to 2002. The increase has average out at 50% every year. The ecological benefit is shown gradually and accumulating.

Key words : mountain area of southern Ningxia; conversion of cropland to forest and grassland; assessing benefit