

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.008

基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析

王丹阳¹, 李景保¹, 叶亚亚¹, 谭芬芳^{1,2}

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南长沙 410081; 2. 长沙市环境科学研究所, 湖南长沙 410001)

摘要: 提出基于不同受纳水体的灰水足迹, 引入水环境荷载指数, 计算1985—2013年湖南省农业生产造成的灰水足迹, 比较该省地表和地下水的污染状况。并使用IPAT模型, 将灰水足迹与农业经济发展和技术进步结合分析, 为湖南省的水环境保护和农业可持续发展决策提供参考。结果表明: 近29年来湖南省农业生产造成的灰水足迹呈递增趋势, 地表与地下水灰水足迹之比约为7:3; 地表水环境荷载指数较低, 环境状况优于地下水, 但两水体的环境状况都呈现恶化趋势; 湖南省农业可持续发展经历了3个阶段, 初期技术进步占据主导, 中后期农业经济发展加速, 而农业技术则在经过瓶颈阶段后重获发展。

关键词: 灰水足迹; 受纳水体; 水环境荷载指数; 农业生产; 可持续发展; 湖南省

中图分类号: X502 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)04-0049-06

Analysis of agricultural grey water footprint in Hunan Province based on different receiving water bodies

WANG Danyang¹, LI Jingbao¹, YE Yaya¹, TAN Fenfang^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;
2. Changsha Institute of Environmental Science, Changsha 410001, China)

Abstract: A concept of the grey water footprint based on different receiving water bodies is proposed, and the water environment load index is introduced. We calculated the grey water footprint caused by agricultural production in Hunan Province during the period from 1985 to 2013, and compared the statuses of surface water pollution and groundwater pollution in this province. Using the IPAT model, we analyzed the grey water footprint jointly with the agricultural economy and agricultural technology, providing references for water environment protection and agricultural sustainable development in Hunan Province. The results show the following: over the last 29 years, the grey water footprint caused by agricultural production in Hunan Province has shown an increasing trend; the ratio of the grey water footprint of surface water to the grey water footprint of groundwater has been about 7:3; and the surface water environment load index has been lower than the groundwater environment load index, indicating that the environmental condition of surface water was better than that of groundwater, but both showed a deteriorating trend. The sustainable development of agriculture in Hunan Province has experienced three stages: in the first stage, agricultural technology developed faster than the agricultural economy; in the middle and later stages, the development of the agricultural economy accelerated; and in the last stage, agricultural technology resumed development after experiencing a bottleneck period.

Key words: grey water footprint; receiving water bodies; water environment load index; agricultural production; sustainable development; Hunan Province

基金项目: 国家自然科学基金(41571100); 湖南省重点学科(地理学)建设项目

作者简介: 王丹阳(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水环境保护。E-mail: danyang144@163.com

通信作者: 李景保, 教授。E-mail: lijingbao1951@126.com

灰水足迹最早由 Hoekstra 等^[1]于 2008 年提出,是指为了达到一定的水质标准将污染物稀释至该标准允许的最大浓度时所消耗的淡水量。灰水足迹理论为定量评估水环境污染状况提供了新的方法,引起了广泛的重视。联合国环境规划署(UNEP)在其公共网站发布了全球 5 大洲的人均灰水足迹^[2]; Mekonnen 等^[3]计算了肯尼亚纳瓦沙湖盆地鲜切花生产的灰水足迹;曾昭等^[4]使用灰水足迹对北京市水资源进行了评价。目前国内外的研究主要集中在计算某一地区、产业或产品的灰水足迹并进而评价水污染状况,没有区分污染物的不同受纳水体,计算结果无法反映和比较不同水体的污染程度,也鲜见将灰水足迹与经济社会指标结合的分析^[5-8]。因此,笔者提出基于不同受纳水体的灰水足迹,引入水环境荷载指数,计算 1985—2013 年湖南省农业生产对地表水和地下水造成的灰水足迹,比较两种水体的污染状况,并在 IPAT 模型下将灰水足迹与相关经济社会指标结合进行动态分析,探讨农业水污染的变化趋势及其与经济发展、技术进步的关系,以期为水环境保护和农业可持续发展决策提供参考。

1 计算方法与数据来源

1.1 灰水足迹

1.1.1 基本理论和计算

水体对污染物的稀释不具有排他性,已经稀释一种污染物的水体仍可继续稀释另一种污染物,灰水足迹由需要稀释水量最大的污染物解释:

$$G = \max \{P_1, P_2, \dots, P_m\} \quad (1)$$

某种污染物的灰水足迹由该污染物的排放量、在水中的初始浓度和允许浓度决定:

$$P_i = \frac{l_i}{\rho_i^{\max} - \rho_i^{\text{net}}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: G 为总灰水足迹, m^3 ; P_i 为第 i 种污染物的灰水足迹, m^3 ; l_i 为第 i 种污染物的排放量, kg ; ρ_i^{\max} 为水质环境标准允许的第 i 种污染物的最大质量浓度, kg/m^3 ; ρ_i^{net} 为第 i 种污染物在受纳水体中的初始质量浓度, kg/m^3 , 一般以零计入^[9]。

1.1.2 基于不同受纳水体的灰水足迹

为了揭示和比较不同水体的污染状况,提出基于不同受纳水体的灰水足迹,为各类水体的灰水足迹之和:

$$G = \sum W_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

某类水体的灰水足迹由排入该水体的需要稀释水量最大的污染物决定:

$$W_j = \max \{P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{mj}\} \quad (4)$$

其中

$$P_{ij} = \frac{l_{ij}}{\rho_{ij}^{\max} - \rho_{ij}^{\text{net}}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{且} \quad l_{ij} = \lambda_{ij} T_i \quad (6)$$

式中: W_j 为第 j 种水体的灰水足迹; P_{ij} 为第 i 种污染物造成的第 j 种水体的灰水足迹; l_{ij} 为第 i 种污染物在第 j 种水体中的排放量; ρ_{ij}^{\max} 为环境水质标准允许的第 i 种污染物在第 j 种水体中的最大质量浓度; ρ_{ij}^{net} 为第 i 种污染物在第 j 种水体中的初始质量浓度,仍以零计入; T_i 为第 i 种污染物的总排放量; λ_{ij} 为第 i 种污染物的总排放量分解到第 j 种水体中的比例系数。

此外,一些污染物由于受到大气、土壤和生物的吸附、滞留和转化,只以排放量的一定比例进入水体,产生灰水足迹,记这一比例为流失率,则式(6)变为

$$l_{ij} = \lambda_{ij} \mu_i T_i \quad (7)$$

式中: μ_i 为第 i 种污染物的流失率。

使用式(3)~(7)计算考虑了不同受纳水体后的灰水足迹,在计算过程中不仅能够描述某一污染物在江、河、湖、海、冰川、水库、池塘、地下水 and 大气水中的分布,还能够给出造成上述这些水体污染的污染物组合特征;而在计算结果上,则可以反映和比较不同水体环境受到污染的程度。

1.1.3 水环境荷载指数

定义水环境荷载指数(L_{we})为污染物对某类水体造成的灰水足迹(W)与该类水体水量(Q)的比值:

$$L_{we} = \frac{W}{Q} \quad (8)$$

水环境荷载指数反映水体受到污染的程度,取值范围为 $(0, +\infty)$ 。当这一指数大于 1 时,意味着对于某类水体来说,以现有的水量已无法将其中的污染物浓度稀释至环境标准以内。指数越大,水体受到污染就越严重。不同水体的污染状况可以通过水环境荷载指数进行比较。

1.2 IPAT 模型

IPAT 模型是环境冲击(I)与人口(P)、富裕度(A)和技术(T)3 个变量建立的等式^[10]:

$$I = PAT \quad (9)$$

以总灰水足迹(G)表示环境冲击,以人均农业产值(G_{VF})表示富裕度,以单位农业产值消耗的灰水足迹表示技术水平,则有:

$$G = P \frac{G_{VF}}{P} \frac{G}{G_{VF}} \quad (10)$$

对式(10)变形,得到:

$$\frac{G}{G_{VF}} = \frac{G}{P} / \frac{G_{VF}}{P} \quad (11)$$

式中： $\frac{G}{P}$ 为人均灰水足迹，令其为常数 k ，表示个体对环境的压力稳定在某一水平，区域处于某种可持续发展的状态^[11]，又将 $\frac{G}{G_{VF}}$ 记做因变量 y ， $\frac{G_{VF}}{P}$ 记做自变量 x ，则有：

$$y = \frac{k}{x} \quad (12)$$

在该反比例函数中， k 、 x 、 y 均在 $(0, +\infty)$ 区间内取值(图1)，常数 k 越小，曲线越靠近坐标轴，表示人均环境压力越小，区域农业活动所处的可持续发展阶段越高。 k 值固定，即维持一定可持续发展状态下， y 随 x 的增大而减小，表示随着富裕程度的提高，区域有能力增加科研投入，提高科技水平，降低单位农业产值的灰水足迹，减少环境代价。

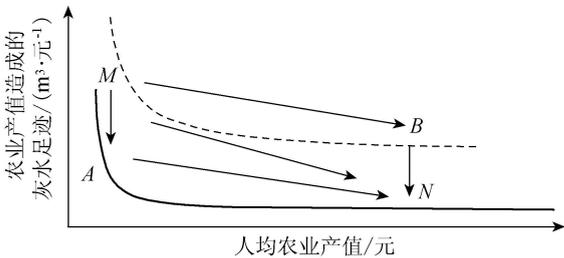


图1 农业活动的可持续发展路径

理想的区域农业活动可持续发展路径为 \vec{MN} ，农业技术和农业经济相互促进，互为因果，在协整关系中逐渐减轻环境压力，实现可持续发展。但实际上，受到政策因素和滞后效应的影响，区域农业活动通常是通过 $\vec{MA}-\vec{AN}$ 或 $\vec{MB}-\vec{BN}$ 2种路径实现可持续发展的。前者表示农业技术先行提高，在减轻对环境的压力后，促进了农业经济的进步；后者表示优先发展农业经济，之后再投资技术，减轻环境压力。

1.3 研究区域概况

湖南省位于我国中部，长江中游地区，属亚热带季风气候，四季分明，雨热同期，年降水量在1200~1700 mm之间，多年平均地表和地下水资源量分别为1682亿 m^3 和392亿 m^3 ，湘、资、沅、澧四水及汨罗河、新墙河分别从东、南、西三面汇入洞庭湖，并由城陵矶注入长江。全省面积约21.18万 km^2 ，2013年总人口7147.28万人，农村人口3719.44万人，约占52.04%；实现地区生产总值2.45万亿元，农业产值5043.58亿元，较2012年分别增长10.10%和2.84%；施用化肥857.27万t，农药12.43万t，较2012年分别增长0.24%和1.07%。

1.4 数据来源

化肥农药的施用和畜禽粪便是农业生产的主要污染源，考虑资料的可获得性，选取排放量较大的N、P、COD和石油类4类污染物纳入灰水足迹计算。农业生产造成的污染属于面源污染，没有固定的排污地点，污染物通过地表径流或地下渗漏，以一定流失率进入水体造成污染。参考相关研究^[11-13]，确定这4类污染物的流失率分别为18%、15%、22%和12%。此外，受到资料数据的限制，在下面计算中，水体只区分为地表水和地下水，地表水和地下水量以多年平均值计入。参考统计资料，将污染物的60.68%分解到地表水，39.32%分解到地下水^[14]。

我国GB/T14848—93《地下水质量标准》和GB3838—2002《地表水环境质量标准》对Ⅲ类水定义为“以人体健康基准值为依据，主要适用于集中式生活饮用水水源”，并给出了该类水质下不同污染物的含量标准。本文基于此确定污染物在地表和地下水体中的环境浓度上限(C_{max})。灰水足迹的计算数据来自《湖南省统计年鉴》《湖南省环境状况公报》和《湖南省水资源公报》，人口和经济数据来自《湖南省统计年鉴》。

2 结果与分析

2.1 灰水足迹变化趋势

1985—2013年间，湖南省农业灰水足迹从1311亿 m^3 增长到3072亿 m^3 ，年平均增长率3.09% (图2)。以2003年为界，1985—2003年的年平均增长率为3.23%；2004—2013年为2.83%，增速有所放缓。除1989—1990年、1992—1993年、1994—1996年和2000—2002年有4次幅度不超过5%的下降之外，其余年份均为递增趋势。

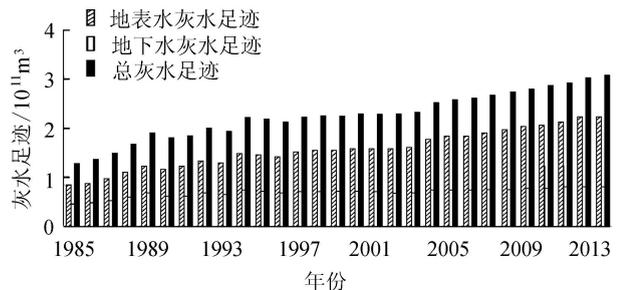


图2 1985—2013年湖南省农业灰水足迹变化趋势

1985—2013年间，湖南省农业生产对地表水造成的灰水足迹从840亿 m^3 增长到2248亿 m^3 ，年平均增长率3.58%，高于总灰水足迹的3.09%。地表农业灰水足迹的变化趋势可以分为两个阶段：1985—1996年为波动增长阶段，在这12年间，环比增长率最高达到14.27%，最低则为-2.85%，但总

体保持了递增的态势;1997—2013 年为稳定增长阶段,在此期间,地表农业灰水足迹保持了年平均 2.48% 的增速,低于整个研究时段平均值,并且没有出现负增长。

农业生产对地下水造成的灰水足迹在 1985—2013 年间从 471 亿 m^3 增长到 824 亿 m^3 ,年平均增长率 2.02%,低于总的农业灰水足迹增速。其变化趋势也可以分为两个阶段:1985—2003 年波动增长,19 年间的年均增长率 2.16%;2004—2013 年的 10 年间低速稳定增长,年均增长率 1.22%。

从构成上看,在研究时段内,湖南省农业生产对地表水和地下水造成的灰水足迹比例稳定在 7:3 左右。1985 年这一比值最小,说明该年地下水灰水足迹对总的灰水足迹贡献最大;2013 年这一比值最大,说明该年地下水灰水足迹对总的灰水足迹贡献最小。

2.2 地表水和地下水环境荷载指数

1996 年之前,地表水环境荷载指数处于波动上升阶段,年增长率在 -3.99% 到 14.27% 之间,1996 年之后没有再发生负增长,保持年均 2.64% 的增速,稳定地从 0.86 上升至 1.34 (图 3)。从数值上看,1985—2003 年间,地表水环境荷载指数始终小于 1,说明在这 19 年里,以湖南省地表水资源总量,能够将所有排入地表水体的农业生产污染物稀释直至达到 III 类水的水质标准;2004 年后该指数突破 1 并不断增长,意味着自 2004 年起,以湖南省现有的地表水资源总量,稀释农业生产产生的污染物后,已无法保证全部地表水水质均处在 III 类及 III 类以上,并且水质还有恶化的趋势。

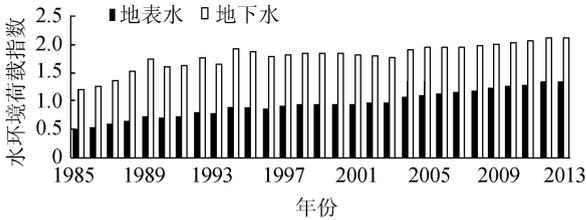


图 3 1985—2013 年地表水和地下水环境荷载指数变化趋势

地下水环境荷载指数在研究时段内从 1985 年的 1.20 上升至 2013 年的 2.10,总体上保持了较为平稳的增势,但 1989—2003 年的波动性较为明显,这 14 年间的增长率最高达到 14.92%,最低则为 -6.81%,相差超过 20%。地下水环境荷载指数在研究时段内始终大于 1,表明稀释进入地下水的农业生产污染物所需的水量始终超过地下水的总水量,即在研究时段内,全部地下水水质均在 III 类及 III 类之上的情况没有发生。

对比两条曲线,地下水环境荷载指数始终高于地表水,这主要是因为地下水资源量有限,而地表水

较丰富。分析地下水与地表水环境荷载指数之差可以发现,1985 年差值最小为 0.70,在这一年地下水环境状况最接近地表水;之后差值逐渐增大,至 1994 年达到拐点最大值 1.03 后出现缩小趋势,到 2013 年缩小为 0.77。这一倒 U 型的变化轨迹表明地下水与地表水的水质差别经历了先扩大再缩小的过程,并且在这一过程中,地表水水质始终优于地下水。

2.3 IPAT 分析

以历年的人均农业产值和农业产值造成的灰水足迹为横纵坐标,将坐标点描绘在坐标系中(图 4)。当纵坐标接近时,坐标点越接近纵轴,表示在同样的技术水平下,农业经济越发达;当横坐标接近时,坐标点越接近横轴,表示在同样农业经济水平下,技术水平越高。同时取 k 为研究时段内平均人均灰水足迹 3474 m^3 ,代入式(12),做出函数曲线。

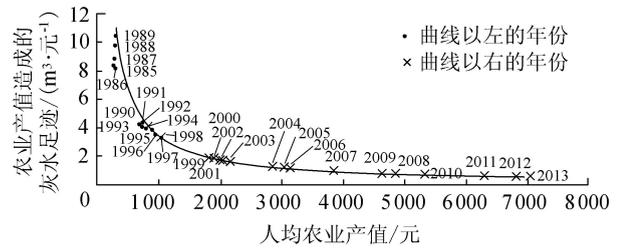


图 4 1985—2013 年湖南省农业活动 IPAT 分析

根据点与曲线的位置关系,可以将整个研究时段分为 3 阶段(表 1):1985—1989 年为第一阶段,5 年内人均农业产值从 281 元增加到 303 元,增加了 7.83%,年均增长 1.90%;农业产值造成的灰水足迹从 10.45 m^3 /元降低到 8.29 m^3 /元,降低了 20.67%,年均降低 5.62%。这一阶段农业经济的发展速度较慢,但农业技术取得了较大进步,表现为图 4 中对应点的下降趋势明显。1990—1998 年为第二阶段,9 年内人均农业产值从 704 元增加到 1055 元,增加了 49.86%,年均增长 5.19%;农业产值造成的灰水足迹从 4.20 m^3 /元降低到 3.33 m^3 /元,降低了 20.71%,年均降低 2.86%。相比上一阶段,农业经济的发展速度加快,而技术进步速度有所放缓,对应图 4 中点较为密集。1999—2013 年为第三阶段,15 年内人均农业产值从 1839 元增加到 7057 元,增加了 383.74%,年均增长 10.08%;农业产值造成的灰水足迹从 1.90 m^3 /元降低到 0.61 m^3 /元,降低了

表 1 1985—2013 年湖南省农业活动可持续发展 3 阶段

阶段	区间	人均农业产值		农业产值造成的灰水足迹	
		增长率/%	年均增长率/%	增长率/%	年均增长率/%
1	1985—1989 年	7.83	1.90	-20.67	-5.62
2	1990—1998 年	49.86	5.19	-20.71	-2.86
3	1999—2013 年	383.74	10.08	-67.89	-7.79

67.89%, 年均降低 7.79%。这一阶段农业经济的发展速度快于农业技术, 反映在图 4 中对应点的水平变化趋势显著。

总的来说, 湖南省农业活动的可持续发展属于 $\vec{MA}-\vec{AN}$ 路径(图 1), 前期农业技术的发展快于经济, 而随着技术进入瓶颈期, 农业经济的增速逐年加快, 逐渐成为可持续发展中的主导力量, 并推动农业技术突破瓶颈重获发展。从整体发展态势上看, 湖南省的农业活动的可持续化是乐观的。

3 结论与讨论

目前国际上计算灰水足迹的方法较多, 自环境管理技术委员会制定 ISO14046 水足迹国际标准之后, 学者又相继提出了基于生命周期、投入产出和效益分摊和污染稀释等的计算方法。由于计算简便、数据易得等优点, 使用污染稀释方法计算灰水足迹得到了广泛运用。

同一污染物往往是由不同水体分别接纳和稀释的。以化工厂为例, 建筑在河流附近的工厂产生的磷酸盐通常排入河流, 而湖泊附近的工厂则多排入湖泊。这样, 污染物同样是磷酸盐, 却分别由河流和湖泊接纳, 如果在计算灰水足迹时不加以区分, 就可能掩盖某一水体的实际污染状况。举例来说, 已知 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水质对硫化物浓度的要求为不超过 0.2 mg/L (20 t/亿 m^3), 假若有 10 t 和 30 t 的硫化物分别进入水量均为 1 亿 m^3 的河流水和湖泊水中, 若不考虑接纳污染物的水体不同, 要将这 40 t 硫化物稀释至 20 t/亿 m^3 , 刚好需要 2 亿 m^3 的水量, 换句话说, 以现有的河流湖泊水体水量之和, 正好可以将这 40 t 硫化物稀释至达到Ⅲ类水质标准。而若考虑实际上硫化物被河流和湖泊分别稀释这一事实, 则会发现, 10 t 硫化物进入 1 亿 m^3 的河流, 其浓度已然在Ⅲ类水质标准之内, 而即使 1 亿 m^3 的湖泊水全部用做稀释, 排入湖泊的硫化物浓度也无法达到标准。因此, 考虑污染物由不同接纳水体稀释的事实, 提出基于不同接纳水体的灰水足迹, 并引入水环境荷载指数。先以需要稀释水量最大的污染物计算某一水体的灰水足迹, 再将各水体的灰水足迹加总, 得到总灰水足迹, 并比较不同水体的污染状况。

计算 1985—2013 年湖南省农业生产造成的灰水足迹, 评价水环境污染状况。结果显示, 湖南省农业生产造成的灰水足迹总体呈增长态势, 地表水和地下水的灰水足迹比例维持在 7 : 3 左右。研究时段内, 地表水环境荷载指数始终小于地下水, 两者的

差值经历了先扩大再缩小的过程, 说明地表水环境状况优于地下水, 但近年来两者差距在不断缩小。需要注意的是, 差距缩小的原因在于地表水水质的恶化速度快于地下水的, 而并非地下水的环境质量在逐渐好转。

在 IPAT 模型下将农业生产灰水足迹与农业经济发展和技术进步结合分析, 结果显示, 湖南省农业可持续发展分为 3 个阶段, 初期农业技术进步迅速但农业产值提高较慢, 中期技术进步速度放缓而农业经济发展加速, 后期农业技术在突破瓶颈后得到了新发展, 但技术的提升不足以抵消农业活动强度的增大, 人均灰水足迹超过研究时段内的平均值, 并不断提高, 这是由于农业经济的增速更快, 技术的发展仍未达到相应经济条件下应有的水平。由于农业经济是一个半自然的再生产过程, 生产周期长, 受自然力约束大, 技术进步比较困难, 因此这一情况是合理的^[15]。尽管湖南省农业活动的可持续发展状态总体乐观, 仍然要注意合理控制农业生产强度, 避免出现不可逆转的环境破坏。

使用灰水足迹评价水环境污染状况具有量化、计算简便的优点, 但也存在一定局限性。一些污染物的排放量数据难以获得, 并且污染物的流失率受到地形、土壤和气候的影响, 在较大空间尺度上具有差异性, 使用同一比例系数计算会影响结果的准确性。在今后的研究中, 基于灰水足迹, 结合分布式水文模型, 从水质水量相结合的角度评估水环境状况, 是一个可行的探讨方向。

参考文献:

- [1] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [2] 联合国环境规划署. 世界水周[EB/OL]. [2013-09-03]. <http://t.qq.com/p/t/285081011458934>.
- [3] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y, BECHT R. Mitigating the water footprint of export cut flowers from the Lake Naivasha Basin, Kenya[J]. Water Resource Management, 2012, 26(13): 3725-3742.
- [4] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169-1175. (ZENG Zhao, LIU Junguo. Historical trend of grey water footprint of Beijing, China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1169-1175. (in Chinese))
- [5] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 63-70. (CAO Lianhai, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30

- (1):63-70. (in Chinese))
- [6] 张郁,张峥,苏明涛. 基于化肥污染的黑龙江垦区粮食生产灰水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(7):28-32. (ZHANG Yu,ZHANG Zheng,SU Mingtao. Research on grey water footprint based on chemical fertilizer use in the grain production in Heilongjiang reclamation area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(7):28-32. (in Chinese))
- [7] 盖力强,谢高地,李士美,等. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究[J]. 资源科学,2010,32(11):2066-2070. (GAI Liqiang,XIE Gaodi,LI Shimei,et al. A study on production water footprint of winter-wheat and maize in the north China plain[J]. Resources Science,2010,32(11):2066-2070. (in Chinese))
- [8] CHAPAGAIN A K,HOEKSTRA A Y,SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics,2006,60(1):186-203.
- [9] 王来力,丁雪梅,吴雄英. 纺织产品的灰水碳足迹核算[J]. 印染,2013(9):41-43. (WANG Laili,DING Xuemei,WU Xiongying. Assessment of grey water footprint of textile products[J]. Printing and Dyeing,2013(9):41-43. (in Chinese))
- [10] 宋晓晖,张裕芬,汪艺梅,等. 基于IPAT扩展模型分析人口因素对碳排放的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(1):109-114. (SONG Xiaohui,ZHANG Yufen,WANG Yimei,et al. Analysis of impacts of demographic factors on carbon emissions based on the IPAT model[J]. Research of Environmental Sciences,2012,25(1):109-114. (in Chinese))
- [11] 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. (ZHANG Hengyi,LIU Weidong,LIN Yuxin,et al. A modified ecological footprint analysis to a sub-national area: the case study of Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(5):2738-2748. (in Chinese))
- [12] 王家玉,王胜佳,陈义,等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报,1996,33(1):28-35. (WANG Jiayu,WANG Shengjia,CHEN Yi,et al. Study on the nitrogen leaching in rice fields[J]. Acta Pedologica Sinica,1996,33(1):28-35. (in Chinese))
- [13] 李学平,邹美玲. 农田土壤磷素流失研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(11):173-177. (LI Xueping,ZOU Meiling. Advance of farmland soil phosphorus running off[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(11):173-177. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国环境保护部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 北京:中华人民共和国环境保护部,2010.
- [15] 吴殿廷. 区域经济学[M]. 北京:科学出版社,2003:93-95.

(收稿日期:2015-10-08 编辑:徐娟)

(上接第48页)

参考文献:

- [1] 宿华,范晓娜,李环,等. 实施松辽流域水资源保护规划的思考[J]. 中国水利,2013(13):76-77. (SU Hua,FAN Xiaona,LI Huan,et al. Thinking about implementation of Songliao River Basin water resources protection planning[J]. China Water Resources,2013(13):76-77. (in Chinese))
- [2] 陈伟. 松辽流域河道岸线开发现状与保护对策[J]. 水利发展研究,2015(2):50-52. (CHEN Wei. Songliao Basin river shoreline development present situation and the protection measures[J]. Journal of Water Resources Development Research,2015(2):50-52. (in Chinese))
- [3] 刘辉,卓海华,刘云兵. 我国水资源保护监测规划编制的内容和方法[J]. 水资源保护,2015,31(1):106-109. (LIU Hui,ZHUO Haihua,LIU Yunbing. The content and the method for monitoring of our country water resources protection planning[J]. Water Resources Protection,2015,31(1):106-109. (in Chinese))
- [4] 孔庆辉,黄旭,王光磊,等. 现代水资源管理及松辽流域水资源管理系统框架[J]. 东北水利水电,2012(3):39-41. (KONG Qinghui,HUANG Xu,WANG Guanglei,et al. Modern water resources management and water resources management system framework of Songliao River Basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast,2012(3):39-41. (in Chinese))
- [5] 郁丹英,樊孔明. 2011和2012年淮河流域省界水体水资源质量状况对比分析[J]. 治淮,2013(1):113-114. (YU Danying,FAN Kongming. Analysis of water quality and water body of provincial boundary in Huaihe River in 2011 and 2012[J]. Harnessing Huaihe River,2013(1):113-114. (in Chinese))
- [6] 谢琳娜,白焱,高峰,等. 松辽流域省界缓冲区水环境质量现状分析[J]. 东北水利水电,2006,24(12):58-59. (XIE Linna,BAI Yan,GAO Feng,et al. Analysis of present situation of water environment quality in Songliao Basin boundary buffer[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast,2006,24(12):58-59. (in Chinese))
- [7] 张蕾. 松辽流域省界缓冲区水质主成分分析[D]. 长春:吉林大学,2010.
- [8] 张静波,李环,郑国臣,等. 松辽流域省界缓冲区水质监测现状分析[J]. 东北水利水电,2013,31(8):48-50. (ZHANG Jingbo,LI Huan,ZHENG Guochen,et al. Analysis of water quality monitoring situation in Songliao Basin boundary buffer[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast,2013,31(8):48-50. (in Chinese))

(收稿日期:2015-09-30 编辑:彭桃英)