

江苏水生态系统可持续发展分析

崔冬梅<sup>1</sup>,朱翊宇<sup>2</sup>

(1. 泰州市水资源管理处,江苏 泰州 225300; 2. 泰州市水利局,江苏 泰州 225300)

**摘要:**基于生态足迹理论和环境压力控制模型,综合分析 2008—2014 年江苏水生态系统可持续发展情况。结果表明,研究期间江苏水生态足迹先升后降,受淡水资源生态足迹影响较大,水产品生态足迹逐年上升,水污染生态足迹逐年下降,水生态承载力年际波动,水生态赤字和压力较大;万元 GDP 水生态足迹逐年下降,水资源利用率逐年提高,科学技术进步对水生态足迹的正效应逐步超过社会经济发展的负效应,水生态系统发展向可持续状态靠拢。

**关键词:**水生态系统;水生态足迹;水生态承载力;可持续发展,环境压力控制模型

**中图分类号:**TV213      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004 - 6933 (2016) S1 - 0137 - 04

水是重要的自然资源,在生态系统和经济发展中发挥着重要作用。水生态足迹是一种衡量人类对水资源利用程度以及为人类提供生命支持服务功能的方法,可操作性强,结果直观,具有区域可比性,能揭示水生态和社会经济发展的关系,因而广泛应用于区域可持续发展评价中<sup>[1-3]</sup>。环境压力控制模型(IPAT 模型),广泛应用于环境降级的人为驱动力分析,在建设生态文明的过程中,该模型对于研究社会经济活动过程中的资源利用效率具有重要价值<sup>[4-6]</sup>。本文通过定量比较水生态足迹和承载力,结合水生态盈亏、压力指数和环境压力控制模型,综合分析 2008—2014 年江苏水生态系统可持续发展情况,以期为江苏水资源科学管理和有效利用以及区域可持续发展评估提供一定的依据。

1 研究方法

1.1 水生态足迹和水生态承载力

水生态足迹是指一定的人口和经济规模条件下维持水资源消费和消纳水污染所需的生物生产性土地面积,由淡水资源生态足迹、水产品(渔业)生态足迹和水污染生态足迹组成;淡水资源生态足迹反映人类在生产生活过程中对淡水资源的消费,包括人类在生活中的直接用水和人类在经济社会活动中对淡水资源的消耗;水产品生态足迹反映淡水产品对水资源的占用;水污染生态足迹反映稀释污水对水资源的消耗<sup>[7]</sup>。因水体同时具备水质净化和水

产养殖两种功能,为避免重复计算水产品足迹和水污染足迹,选取相对较大的值作为两者共同产生的生态足迹。水生态足迹的计算公式为

$$\left\{\begin{aligned} F &= P \cdot f = F_1 + \max(F_2, F_3) \\ F_1 &= P \cdot f_1 = r_1 \cdot \frac{W_1}{z_1} \\ F_2 &= P \cdot f_2 = r_2 \cdot \frac{W_2}{z_2} \\ F_3 &= P \cdot f_3 = r_3 \cdot \frac{W_3}{z_1} \\ W_3 &= 86400 \cdot \frac{W_4}{(31.536 \cdot i \cdot j)} \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: $F$  为水生态足迹; $F_1$  为淡水资源生态足迹; $F_2$  为水产品生态足迹; $F_3$  为水污染生态足迹,  $\text{hm}^2$ ;  $P$  为人口数,人; $f$  为人均水生态足迹; $f_1$  为人均淡水资源生态足迹; $f_2$  为人均水产品生态足迹; $f_3$  为人均水污染生态足迹,  $\text{hm}^2/\text{人}$ ;  $r_1$  为全球水资源均衡因子,5.19;  $r_2$  为平均水域均衡因子,中国为 0.35;  $W_1$  为水资源消耗量,  $\text{m}^3$ ;  $W_2$  为水产品消费量,  $\text{t}$ ;  $W_3$  为水污染稀释净化需水量,  $\text{m}^3$ ;  $W_4$  为污染物排放量,  $\text{t/a}$ 。  $z_1$  为全球水资源平均生产能力,  $31.4 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ ;  $z_2$  为全球水产品平均生产能力,  $0.18 \text{ t/hm}^2$ 。  $i$  为污染物综合降解系数,  $0.25\text{d}^{-1}$ ;  $j$  为水质目标值,  $\text{mg/L}$ ,Ⅲ类水基本能够维持水体的生态服务功能,低于此标准的水体的生态服务功能会衰退或丧失,本文选取具有代表性的有机物(COD)和

NH<sub>3</sub>-N 为研究内容;水质目标浓度为 GB 3838—2002《地表水水环境质量标准》Ⅲ类水质标准的上限; $\rho(\text{COD}) \leq 20 \text{ mg/L}$ , $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) \leq 1 \text{ mg/L}$ ;因两种污染物在环境影响上明显重叠,故以其中最大污染足迹为水污染生态足迹。

水生态承载力是指在维持水生态系统自身及其支持系统健康的前提下,基于一定的生态保护和承载目标,自然水生态系统所能支撑的人类活动的阈值。一个区域的水资源开发利用率若超过 30% ~ 40%,就可能引起生态环境恶化,因此计算水生态承载力时至少须扣除 60% 用于维持生态系统健康<sup>[8]</sup>。水生态承载力计算公式为

$$C = P \cdot c = 0.4 \cdot r_1 \cdot y \cdot \frac{Q}{z_1} \quad (2)$$

式中: $C$  为水生态承载力,  $\text{hm}^2$ ;  $c$  为人均水生态承载力,  $\text{hm}^2$ ;  $y$  为水资源产量因子,江苏为 1.02;  $Q$  为水资源总量,  $\text{m}^3$ 。

1.2 水生态系统可持续发展分析

1.2.1 可持续发展评价指标

水生态足迹从需求方面计算对水资源的占用,水生态承载力从供给方面计算水资源的承载力,比较两者,可分析评价水生态系统可持续发展的情况。

水生态盈亏是区域水生态足迹与承载力的差额<sup>[9]</sup>。计算公式为

$$E = P \cdot e = C - F = P \cdot (c - f) \quad (3)$$

式中: $E$  为水生态盈亏,  $\text{hm}^2$ ;  $e$  为人均水生态盈亏,  $\text{hm}^2$ 。

$E$  (或  $e$ ) < 0, 为水生态赤字,说明区域自然生态系统所提供的水生态容量不足以支撑区域内人口消费模式和水平,区域发展处于不可持续状态,维持这种状态的继续须消耗其自然资源的存量或依赖区域外补充; $E$  (或  $e$ ) > 0, 为水生态盈余,说明区域水生态容量除了保证社会、经济、生态和环境的生态需求,还可以满足区域内发展的进一步需求; $E$  (或  $e$ ) = 0 时,说明区域水生态平衡。

水生态压力指数是区域水生态足迹与承载力的比值<sup>[10]</sup>。计算公式为

$$B = \frac{F}{C} = \frac{f}{c} \quad (4)$$

式中: $B$  为水生态压力指数。

$0 < B < 1$ , 表示区域水生态系统安全,比值越小,可持续状态越好; $B > 1$ , 表示水生态系统安全受到威胁,比值越大越危险; $B = 1$ , 表示水生态系统处于临界状态。

1.2.2 环境压力控制模型

环境压力控制模型研究分析环境压力与人口、

富裕度和技术之间的相互作用<sup>[11]</sup>。基本方程为

$$I = P \cdot A \cdot T \quad (5)$$

式中: $I$  为环境压力; $A$  为富裕度; $T$  为技术。

万元 GDP 生态足迹是区域水生态足迹与 GDP 之比,反映水资源的利用率与经济增长的关系<sup>[12]</sup>。计算公式为

$$D = \frac{F}{G} \quad (6)$$

式中: $D$  为万元 GDP 水生态足迹,  $\text{hm}^2$ ;  $G$  为 GDP, 亿元。

若用水生态足迹表示  $I$ , 用人均 GDP 表示  $A$ , 用万元 GDP 水生态足迹表示  $T$ , 则式 (6) 可变成:

$$I = G \cdot D \quad (7)$$

设基准年 GDP 为  $G_0$ , 年增长率为  $g$ ; 基准年万元 GDP 水生态足迹为  $D_0$ , 年降低率为  $d$ , 则第  $n$  年的水生态足迹为

$$I_n = G_n \cdot D_n = G_0 \cdot D_0 (1 + g - d - g \cdot d)^n \quad (8)$$

第  $n$  年的水生态足迹较前一年变化的阈值为

$$d = g / (1 + g) \quad (9)$$

若实际情况下,  $d > g / (1 + g)$ , 说明技术进步对水生态足迹的正效应大于社会经济负效应; $d < g / (1 + g)$ , 说明技术进步的正效应小于社会经济负效应; $d = g / (1 + g)$ , 说明技术进步的正效应和社会经济负效应相抵消。

2 研究区概况

江苏位于中国大陆东部沿海中心,在南方热带、亚热带向北方温暖带、温带气候带的过渡带;雨季长,降水丰富,年降水量约为 800 ~ 1 200 mm。水面积高达 1.73 万  $\text{km}^2$ , 占全省总面积 17%, 是全国水面积所占比重最大的省区。不包含田间灌溉和排水渠道,共有大小河流 2 900 多条,长江横贯东西 425 多 km,京杭大运河纵贯南北 718 km,西南部有苏北灌溉总渠、新沭河、通扬运河等,河网密度居全国各省区之首;大小湖泊 290 多个,拥有全国五大淡水湖中的太湖和洪泽湖。内陆水面 266.7  $\text{hm}^2$ , 养殖面积 7 605 万  $\text{hm}^2$ 。

3 水生态系统可持续发展评价

3.1 数据来源

所需数据资料来自 2008—2014 年《江苏统计年鉴》《江苏省水资源公报》和《江苏省环境状况公报》。水资源消耗量、水资源总量来源于《江苏省水资源公报》,耗水量统计口径为农田灌溉用水、工业用水、居民生活用水、城镇环境用水和其他用水,水资源总量统计口径为地表水、地下水和重复部分;人口数、水产品消费量、GDP 来源于《江苏统计年鉴》;

有机物和 NH<sub>3</sub>-N 的排放量来源于《江苏省环境状况公报》,2008—2010 年只列出有机物和 NH<sub>3</sub>-N 的工业污水和生活污水排放,2011 年后增列了农业污水及垃圾和危险废物集中式治理设施排放。

3.2 水生态足迹和水生态承载力

由表 1、表 2、表 3、图 1、图 2 可知,2008—2014 年,江苏历年水产品生态足迹均大于水污染生态足迹,取水产品生态足迹为水质净化和水产养殖共同产生的生态足迹,因而水生态足迹的值为淡水资源生态足迹与水产品生态足迹之和。人均水生态足迹均值为 0.677 hm<sup>2</sup>,2008—2010 呈上升趋势,2011—2014 年呈下降趋势。人均淡水资源生态足迹是人均水生态足迹的主要组成部分,与水生态足迹的趋势一致,均值为 0.659 5 hm<sup>2</sup>,占比约 87.85%;其中,人均农田灌溉用水生态足迹与水生态足迹变化趋势一致,均值为 0.436 hm<sup>2</sup>,占比约为 64.31%;人均工业用水生态足迹年际波动,均值为 0.037 hm<sup>2</sup>,占比约为 5.48%;人均居民生活用水生态足迹逐年下降,均值为 0.029 hm<sup>2</sup>,占比约为 4.3%;人均城镇环境用水生态足迹年际波动,均值为 0.006 hm<sup>2</sup>,占比约为 0.91%。人均水产品生态足迹逐年上升,均值为 0.083 hm<sup>2</sup>,占比约为 12.19%。两种污染物的水污染生态足迹趋势一致,NH<sub>3</sub>-N 的水污染生态足迹较有机物的大,取 NH<sub>3</sub>-N 水污染生态足迹为最终水污染生态足迹;2005—2010 年和 2011—2014 年水污染生态足迹均逐年下降,人均有机物污染生态足迹均值为 0.012 hm<sup>2</sup>,占比约为 1.75%;人均 NH<sub>3</sub>-N 污染生态足迹均值为 0.026 hm<sup>2</sup>,占比约为 3.86%。

表 1 人均水生态足迹及其组成 hm<sup>2</sup>

| 年份   | 人均淡水资源生态足迹 | 人均水产品生态足迹 | 人均水污染生态足迹 | 人均水生态足迹 |
|------|------------|-----------|-----------|---------|
| 2008 | 0.597      | 0.075     | 0.016     | 0.672   |
| 2009 | 0.622      | 0.078     | 0.015     | 0.699   |
| 2010 | 0.642      | 0.080     | 0.015     | 0.722   |
| 2011 | 0.587      | 0.082     | 0.036     | 0.669   |
| 2012 | 0.578      | 0.085     | 0.035     | 0.663   |
| 2013 | 0.577      | 0.088     | 0.034     | 0.664   |
| 2014 | 0.562      | 0.090     | 0.032     | 0.652   |

表 2 人均淡水资源生态足迹及其组成 hm<sup>2</sup>

| 年份   | 人均农田灌溉用水生态足迹 | 人均工业用水生态足迹 | 人均居民生活用水生态足迹 | 人均城镇环境用水生态足迹 | 人均其他用水生态足迹 | 人均淡水资源生态足迹 |
|------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|
| 2008 | 0.439        | 0.038      | 0.03         | 0.006        | 0.084      | 0.597      |
| 2009 | 0.462        | 0.035      | 0.03         | 0.006        | 0.088      | 0.622      |
| 2010 | 0.468        | 0.05       | 0.029        | 0.007        | 0.088      | 0.642      |
| 2011 | 0.432        | 0.034      | 0.029        | 0.006        | 0.085      | 0.587      |
| 2012 | 0.421        | 0.032      | 0.029        | 0.007        | 0.089      | 0.578      |
| 2013 | 0.416        | 0.039      | 0.029        | 0.006        | 0.088      | 0.577      |
| 2014 | 0.411        | 0.032      | 0.028        | 0.005        | 0.09       | 0.562      |

表 3 人均水污染生态足迹及其组成 hm<sup>2</sup>

| 年份   | 人均有机物水污染生态足迹 | 人均 NH <sub>3</sub> -N 水污染生态足迹 | 人均水污染生态足迹 |
|------|--------------|-------------------------------|-----------|
| 2008 | 0.01         | 0.016                         | 0.016     |
| 2009 | 0.01         | 0.015                         | 0.015     |
| 2010 | 0.009        | 0.015                         | 0.015     |
| 2011 | 0.014        | 0.036                         | 0.036     |
| 2012 | 0.014        | 0.035                         | 0.035     |
| 2013 | 0.013        | 0.034                         | 0.034     |
| 2014 | 0.013        | 0.032                         | 0.032     |

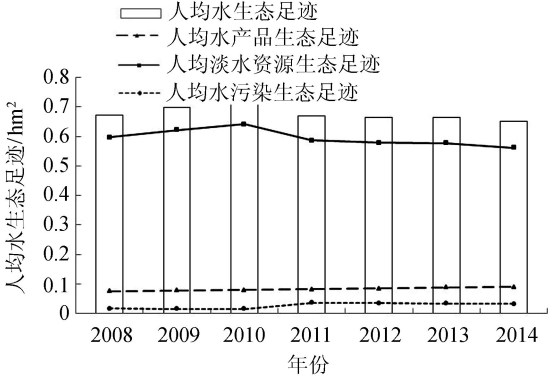


图 1 人均水生态足迹及其组成

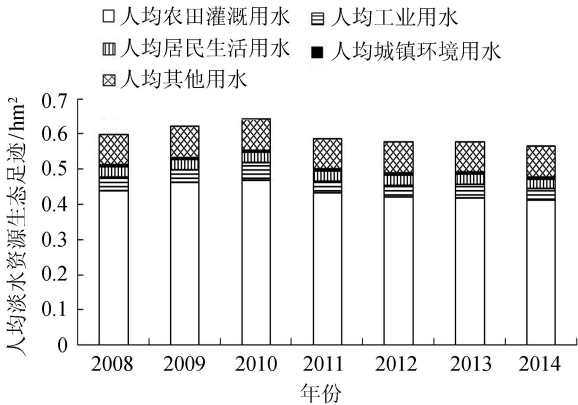


图 2 人均淡水资源生态足迹及其组成

江苏近年来实行最严格水资源管理制度,推进节水型社会和水生态文明建设,有效控制了水资源消耗和水污染的排放,居民生活用水生态足迹、城镇环境用水生态足迹和水污染足迹均逐年下降;水产品消费量逐年提高导致水产品生态足迹逐年上升;NH<sub>3</sub>-N 水污染足迹较有机物的大,须更加注重 NH<sub>3</sub>-N 的排放和治理。

水生态承载力为地表水生态承载力和地下水生态承载力之和扣除地表水与地下水的重复部分。

由表 4、图 3 可知,2008—2014 年,人均水生态承载力年际波动,均值为 0.334 hm<sup>2</sup>;人均地表水生态承载力变化趋势与人均水生态承载力一致,均值为 0.251 hm<sup>2</sup>,占比约为 75.34%;人均地下水生态承载力较稳定,均值为 0.095 hm<sup>2</sup>,占比约为 28.33%。

表 4 人均水生态承载力及其组成  $\text{hm}^2$

| 年份   | 人均地表水生态承载力 | 人均地下水生态承载力 | 人均重复部分水生态承载力 | 人均水生态承载力 |
|------|------------|------------|--------------|----------|
| 2008 | 0.244      | 0.097      | 0.012        | 0.328    |
| 2009 | 0.264      | 0.096      | 0.014        | 0.346    |
| 2010 | 0.25       | 0.093      | 0.014        | 0.329    |
| 2011 | 0.341      | 0.098      | 0.019        | 0.420    |
| 2012 | 0.238      | 0.094      | 0.014        | 0.318    |
| 2013 | 0.172      | 0.083      | 0.014        | 0.241    |
| 2014 | 0.251      | 0.101      | 0.014        | 0.354    |

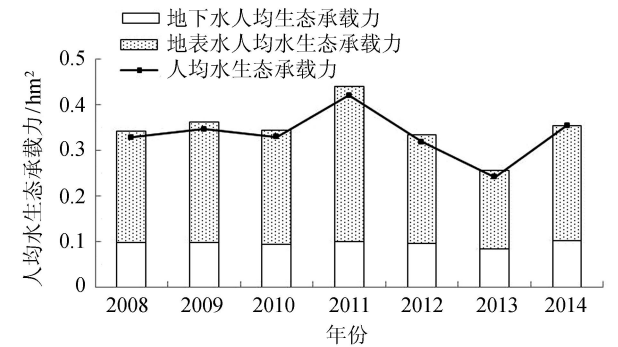


图 3 人均水生态承载力及其组成

3.3 水生态系统可持续发展分析

由表 5、图 4 可知,2008—2014 年,江苏水生态承载力容量不足以支撑水生态足迹负荷,水生态赤字和压力指数均较大。人均水生态赤字和水生态压力指数的均值分别为 $-0.344 \text{ hm}^2$  和 2.07;水生态容量不能满足社会、经济、生态和环境的良性循环的需要。

表 5 可持续发展评价指标

| 年份   | 人均水生态盈亏/ $(10^{-3} \text{ hm}^2)$ | 水生态压力指数 |
|------|-----------------------------------|---------|
| 2008 | -0.344                            | 2.05    |
| 2009 | -0.354                            | 2.02    |
| 2010 | -0.393                            | 2.20    |
| 2011 | -0.249                            | 1.59    |
| 2012 | -0.345                            | 2.08    |
| 2013 | -0.424                            | 2.76    |
| 2014 | -0.298                            | 1.84    |

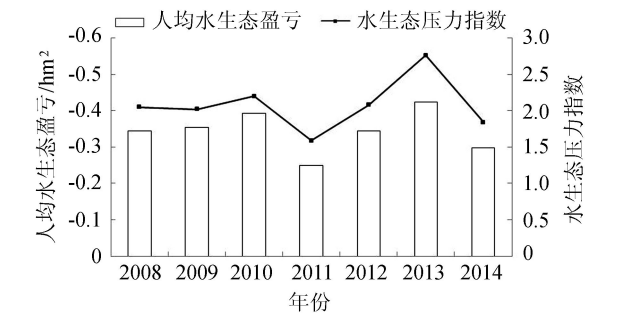


图 4 可持续发展评价指标

由表 6、图 5 可知,2008—2014 年,江苏万元 GDP 水生态足迹逐年下降,水资源利用率逐年提高。2010 年前,水生态足迹降低率小于阈值,科学技术进步带来的正效应不足以抵消社会经济发展带

来的负效应;2011 年后,水生态足迹降低率大于阈值,科学技术进步的正效应超过社会经济发展的负效应。

表 6 环境压力控制模型指标

| 年份   | 万元 GDP 水生态足迹/ $\text{hm}^2$ | 阈值/%  | 万元 GDP 水生态足迹年降低率/% |
|------|-----------------------------|-------|--------------------|
| 2008 | 168.40                      | 16.02 | 1.25               |
| 2009 | 158.53                      | 10.09 | 6.23               |
| 2010 | 137.14                      | 16.82 | 15.60              |
| 2011 | 107.59                      | 15.65 | 27.47              |
| 2012 | 97.08                       | 9.15  | 10.82              |
| 2013 | 89.16                       | 8.63  | 8.89               |
| 2014 | 79.77                       | 9.11  | 11.77              |

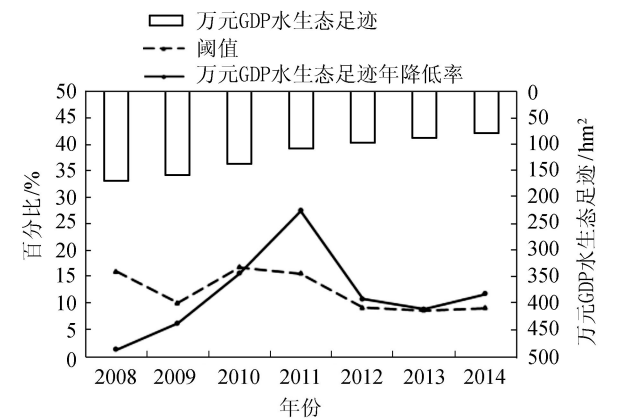


图 5 环境压力控制模型指标

江苏的水生态足迹与经济、人口、科技关系密切,应用先进的科学技术,调整经济结构和产业结构,改善经济增长方式,在一定程度上减少了水资源消耗,水资源利用方式逐步由粗放型、消耗型转为集约型、节约型,水生态系统向可持续发展状态靠拢。但是,水资源利用不受水环境容量的制约,水生态和经济增长依旧存在较大矛盾,实现协调可持续发展仍需一定时间。

4 结 论

a. 研究期间,江苏水生态足迹先升后降,淡水资源生态足迹贡献率最大;水产品生态足迹占比低,逐年上升;水污染生态足迹占比最低,逐年下降;水生态承载力年际波动;水生态足迹与承载力之间不协调,存在水生态赤字和压力指数偏大的情况;万元 GDP 水生态足迹逐年下降,水资源利用率逐步提高,科学技术进步对水生态足迹的正效应从 2010 年开始大于社会经济发展的负效应,水资源利用方式转为集约型和节约型的前景良好。

b. 建议根据实际情况调整种植结构和节水灌溉模式,减少农业用水量;通过调整产业结构、限制高耗水产品的生产,以及在不降低当前生活水平的条件下引导居民的消费结构和 (下转第 162 页)

表 6 赤水河河流生态完整性评估

| 准则层           | 指标<br>权重 | 评估河段 1<br>(98.67 km) | 评估河段 2<br>(148.33 km) | 评估河段 3<br>(72.00 km) | 河流综合<br>(319.00 km) |
|---------------|----------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| 水文水资源综合       | 0.2      | 90.52                | 79.48                 | 81.40                | 83.33               |
| 物理结构综合        | 0.2      | 90.548               | 67.344                | 69.578               | 75.03               |
| 水质综合          | 0.3      | 99.55                | 94.88                 | 93.89                | 96.10               |
| 生物综合          | 0.3      | 100                  | 100                   | 100                  | 100                 |
| 河流完整性<br>综合评估 |          | 96.08                | 87.83                 | 88.36                | 90.50               |

4.4 河流健康评估

考虑到河流的社会服务功能,综合评价赤水河的健康状况可知,社会服务功能得分 81.81 分,综合之后赤水河河流健康得分 87.89 分,为健康状态(表 7)。

表 7 赤水河河流健康评估

| 分 类                     |           | 权重  | 赤水河健康评分 |
|-------------------------|-----------|-----|---------|
| 社会<br>服务<br>功能<br>(0.3) | 河流完整性综合评估 | 0.7 | 90.50   |
|                         | 水功能区达标指标  | 0.2 | 100     |
|                         | 水资源开发利用指标 | 0.2 | 86.63   |
|                         | 水土流失指标    | 0.2 | 58.41   |
|                         | 公众满意度指标   | 0.2 | 77.8    |
|                         | 特色服务功能指标  | 0.2 | 86.22   |
|                         | 社会服务功能综合  |     | 81.81   |
| 河流健康综合评估                |           |     | 87.89   |

5 结 论

a. 赤水河中上游主要是农田开垦严重,导致水

(上接第 140 页)

消费数量,减少水资源和水产品的消耗,建立水资源节约型社会生产和消费体系;加快推进雨水、再生水等非常规水源利用,推广城镇中水回用技术,加强输配水工程的改造,提高水资源利用率;加强水污染控制,特别是非点源污染的治理,提高污水处理能力建设。

c. 从水生态足迹和环境压力控制模型的角度研究水生态系统的有关问题,可以定量地反映和衡量水生态、科学技术和经济发展的关系,使水生态系统可持续发展的分析评价指标体系和方法具有坚实的理论基础,进一步丰富和完善其理论体系。

参考文献:

[ 1 ] 王丹阳,李景保,叶亚亚,等. 基于不同接纳水体的湖南省农业灰水足迹分析[J]. 水资源保护,2016,32(4):49-54.

[ 2 ] 刘瑜洁,刘俊国,赵旭,等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报,2016(3):211-218.

[ 3 ] 吴全志,苏喜军,龙林玲. 基于生态足迹模型的贵州省水资源可持续利用分析[J]. 华北水利水电大学学报

土流失严重,如赤水河流域金沙县中下游社会经济发展,城镇化进程加快,对水土的需求及利用日益增加,一方面影响赤水河水源涵养程度,另一方面破坏赤水河的水土保持能力。

b. 赤水河流域捕鱼现象严重,生物多样性受到威胁,公众满意度也因此变差。

c. 赤水河中下游段的河岸带建设对河道干扰加大,不管是在建设过程中植被被破坏,还是建好后的河道渠化,都是在逐渐破坏河道的自然形态,应控制其累积效应,以免出现量变向质变转换,从而影响河流健康。

参考文献:

[ 1 ] MEYER J L. Stream health:incorporating the human dimension to advance stream ecology[ J]. Jonrnal of the North American Benthological Society,1997,16:439-47.

[ 2 ] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[ J]. 水利水电技术,2005,36(11):15-19.

[ 3 ] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[ J]. 水科学进展,2005,16(4):602-608.

[ 4 ] 李传哲,于福亮,秦大庸,等. 基于层次分析法的河流健康模糊综合评价[ J]. 水利水电科技进展,2005,25(1):24-26.

( 收稿日期:2016-10-29 编辑:徐 娟)

( 自然科学版),2016(3):36-40.

[ 4 ] 李俊,董锁成,杨义武. 基于 STIRPAT 和 Path 的宁夏碳排放影响因素分析[ J]. 干旱区资源与环境,2016(7):42-46.

[ 5 ] 韩莉. 基于改进 IPAT 脱钩模型的建设用地扩张与经济的关系研究[ D]. 长春:吉林大学,2016.

[ 6 ] 蔡文胜. 基于 IPAT 模型的青岛市资源节约型社会建设研究[ D]. 青岛:青岛大学,2009.

[ 7 ] 孙芳玲. 山东省水资源生态足迹研究[ D]. 济南:山东师范大学,2011.

[ 8 ] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[ J]. 生态学报,2008(3):1279-1286.

[ 9 ] 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(7):3559-3568.

[ 10 ] 赵先贵,马彩虹,高利峰,等. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价[ J]. 中国生态农业学报,2007(6):135-138.

[ 11 ] 崔冬梅. 基于环境压力控制模型的泰州市节水型社会建设研究[ J]. 治淮,2015(11):53-54.

[ 12 ] 封志明,刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力[ J]. 自然资源学报,2006(5):689-699.

( 收稿日期:2016-11-30 编辑:徐 娟)