

# 新疆水资源生态足迹核算与预测

雷亚君<sup>1,2</sup>, 张永福<sup>1,2</sup>, 张敏惠<sup>1,2</sup>, 梁雪梅<sup>1,2</sup>, 邵新娟<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 根据水资源生态足迹的基本原理和计算模型, 引入水资源负载指数, 对新疆 2005—2014 年水资源生态足迹、水资源生态承载力进行计算, 并运用灰色预测模型 GM(1,1) 对 2015—2025 年的生态赤字/盈余趋势进行预测。结果表明: ① 新疆历年水资源生态足迹大于水资源承载力, 处于生态赤字状态, 从 2005 年的  $-7.83 \times 10^7 \text{ hm}^2$  下降至 2013 年的  $-9.06 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 水资源开发率很低; ② 2005—2014 年新疆水资源生态足迹和承载力均呈上升趋势, 人均生态足迹和人均承载力呈上下波动状态, 生产用水生态足迹在三个水资源账户中比例最大, 远远超出其它两部分, 占总水资源足迹的 95.86%; ③ 水资源负载指数总体呈上升趋势, 表明水资源的利用程度逐渐加强, 2005—2012 年负载指数在 2~5 之间, 表明新疆水资源利用程度中等; 2013—2014 年负载指数在 5~10 之间, 表明新疆水资源利用程度高, 开发条件困难; ④ 新疆水资源存在分布不均匀的状态, 南疆、北疆、东疆差异较大, 南疆、北疆水资源生态足迹、水资源承载力均大于东疆, 而南、北疆万元 GDP 水资源生态足迹则小于东疆; ⑤ 对 2015—2025 年水资源进行预测, 新疆水资源一直处于生态赤字状态, 而且水资源生态赤字呈逐年减小的趋势, 水资源生态赤字越来越严重, 今后的形势越来越严峻, 在利用中提高节水意识。

**关键词:** 生态足迹; 水资源负载指数; 水资源生态赤字; GM(1,1) 模型

**中图分类号:** TV213.9      **文献标志码:** A

## Calculation and prediction of water resource ecological footprint in Xinjiang

LEI Ya-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-fu<sup>1,2</sup>, ZHANG Min-hui<sup>1,2</sup>, LIANG Xue-mei<sup>1,2</sup>, SHAO Xin-juan<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Key laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

**Abstract:** According to the basic principle and calculation model of water resources ecological footprint, the water resources load index is introduced to calculate the ecological footprint of water resources and the ecological carrying capacity of water resources in Xinjiang from 2005 to 2014, and the gray forecasting model GM (1,1) is used to predict the ecological deficit/surplus trends from 2015 to 2025. The results show that: ① The ecological footprint of water resources in Xinjiang is larger than the ecological capacity of water resources, and it is in ecological deficit, which decreases from  $-7.83 \times 10^7 \text{ hm}^2$  in 2005 to  $-9.06 \times 10^7 \text{ hm}^2$  in 2013, and the development rate of water resources is low; ② The ecological footprint and carrying capacity of water resources in Xinjiang increased from 2005 to 2014, the per capita ecological footprint and the per capita carrying capacity fluctuated, and the ecological footprint of the production water was the largest among the three water resources account, far exceeding the other two parts, accounted for 95.86% of the total water footprint; ③ The water resources load index showed an upward trend, indicating that the utilization of water resources was gradually strengthened. The load index was between 2~5 from 2004 to 2012, indicated moderate degree of utilization of water resources in Xinjiang; and the load index was between 5~10, the results show that Xinjiang's water resources utilization is high and the development conditions are difficult; ④ The distribution of water resources in Xinjiang is not uniform. The distribution of water resources in Southern Xinjiang, Northern Xinjiang and Eastern Xinjiang is quite different. The water footprint and ecological carrying capacity of Southern and Northern Xinjiang are greater than that of Eastern Xinjiang, and the Million Yuan GDP water ecological footprint of Southern and Northern Xinjiang are less than

收稿日期: 2016-05-27

修回日期: 2016-07-12

作者简介: 雷亚君(1991—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 研究方向为国土资源信息科技。E-mail: leiyajun1991@sina.com。

通信作者: 张永福(1975—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士生导师, 主要从事国土资源评价方向的研究。E-mail: 2812164105@qq.com。

that of Eastern Xinjiang; ⑤ the water resources ecological deficit from 2015 to 2025 had been predicted, it showed that Xinjiang's water resources has been in the state of ecological deficit, which led to a decrease of water resources year by year. and the situation is worse which will be even severe in the future, so the use of water conservation awareness must be enhanced.

**Keywords:** ecological footprint; load index of water resources; water resources ecological deficit; GM(1,1) model

水是人类生存的重要源泉,社会经济发展离不开水资源的持续充足供给,水资源生态足迹是评价社会经济环境可持续发展的有效指标之一<sup>[1]</sup>,20世纪90年代,加拿大学者 William Rees 和 Mathis Wackernagel 等<sup>[2-4]</sup>提出了生态足迹模型(EF),是一种以土地为度量单位的可持续评估方法。该模型提出后得到了各国学者和机构的广泛应用<sup>[5-7]</sup>,1999年被徐中民等学者引入国内以来,成为研究热点<sup>[8-11]</sup>。王新华采用自下而上的水足迹核算方法,分析计算了2000年中国各省的人均水足迹<sup>[12]</sup>。邓晓军等采用自上而下的方法计算分析了四川省2004年的水足迹及其相关评价指标<sup>[13]</sup>。黄晶等运用水足迹理论,采用自上而下的方法计算评价了1990—2005年北京水足迹及水资源利用的可持续性,在此基础上进一步分析了北京市农业用水结构的变化特征<sup>[14]</sup>。

新疆地处干旱半干旱区,有典型的山地—绿洲—荒漠生态系统,水资源的合理利用是维持新疆生态环境及本区域可持续发展的基础。目前生态足迹应用研究多集中在区域经济社会发展的生态足迹分析评价领域,有关单项资源的生态足迹研究较少。因此,本文对2005—2014年间新疆维吾尔自治区的水资源生态足迹和生态承载力进行计算分析,并对2015—2025年水资源生态赤字/盈余进行预测,以期对正确认识新疆水资源利用现状,实现区域水资源可持续利用提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处亚欧大陆腹地的中纬地区,地跨北纬34°25′~49°11′,东经73°40′~96°18′。是生态环境的脆弱区与敏感区,干旱的气候是形成新疆脆弱生态环境基本特征直接的主导因素,地形复杂,高山与平原、盆地相间,沙漠与绿洲共存加剧了这种脆弱。天山以南为南疆,天山以北为北疆,哈密地区和吐鲁番地区为东疆,新疆的最低点艾丁湖低于海平面155 m,最高点乔戈里峰为8 611 m。

新疆三大山脉的积雪、冰川孕育汇集为500多条河流,分布于天山南北的盆地,其中较大的有塔里木河、伊犁河、额尔齐斯河、玛纳斯河、乌伦古河、开

都河等20多条,新疆境内形成了独具特色的大冰川,共计1.86万余条,总面积2.4万多km<sup>2</sup>,占全国冰川面积的42%,冰储量2.58亿m<sup>3</sup>,是新疆的天然“固体水库”。新疆的水资源极为丰富,人均占有量居全国前列。大沙漠占全国沙漠面积的2/3,其中塔里木盆地中的塔克拉玛干沙漠的面积为33.67万km<sup>2</sup>,是中国最大的沙漠,为世界第二大流动沙漠,仅次于阿拉伯半岛上的鲁卜哈利沙漠。准噶尔盆地的古尔班通古特沙漠,面积4.8万km<sup>2</sup>,为中国第二大沙漠。2014年,全疆水资源总量726.93亿m<sup>3</sup>,地表水资源总量686.55亿m<sup>3</sup>,地下水资源总量443.93亿m<sup>3</sup>,人均水资源为3 130 m<sup>3</sup>,其中乌鲁木齐市、克拉玛依市、石河子市等区域人均水资源远低于1 000 m<sup>3</sup>,仅为410、226、17 m<sup>3</sup>。水资源分配极不均衡,与人口、土地和经济布局不相匹配。

### 1.2 数据来源与处理

本文水资源数据主要来源于《2005—2014年新疆维吾尔自治区水资源公报》<sup>[15]</sup>;人口、GDP等经济数据主要来源于《2005—2014年新疆维吾尔自治区统计年鉴》<sup>[16]</sup>和各地州市的政府工作报告。数据处理软件采用Excel 2010, DPS 7.05 和 ArcGIS 9.3。

## 2 研究方法

### 2.1 灰色预测模型

灰色预测GM(1,1)模型是灰色系统理论的核心内容,通过部分已知的数据,将系统信息抽象的概念量化,量化的概念模型化,最后进行模型优化来预测部分未知的数据。如果所要预测的某项指标的原始数据波动性太大,其发展趋势无规律可循时,则无法用回归预测法对其进行预测。鉴于此,新疆生态足迹更适合用灰色预测法进行预测<sup>[17-18]</sup>。

具体计算方法如下<sup>[19]</sup>:

首先,设原始数据 $X^{(0)}$ 有 $n$ 个值,即 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ ,灰色预测模型GM(1,1)相应的微分方程为: $\frac{dX(1)}{dt} + \alpha X^1 = \mu$ ,通过累加生成新序列 $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$ 。 $\alpha$ 和 $\mu$ 可利用最小二乘法求解。解得:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \mu \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_m$$
,求解微分方程,便可以得到预

测模型:  $X^{(1)}(t+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{\alpha} \right] e^{\alpha t} + \frac{\mu}{\alpha}$ ,  $t = 1, 2, 3, \dots, n$ , 根据模型即可得到一组预测系列。

模型精度检验:对 GM(1,1)模型进行残差检验和后验差检验。如果残差检验和后验差检验都能通过,则说明模型精度较高,可以作为预测模型,否则,需进行残差修正,建立残差 GM(1,1)模型,并把残差 GM(1,1)的预测值加到原预测值中,以提高预测精度。

残差检验:残差检验即模型精度按点的检验。 $P > 90\%$  才能满足模型的精度要求。

$$(1) \text{ 计算残差: } \Delta_{(i)}^{(0)} = x_{(i)}^{(0)} - \bar{x}_{(i)}^{(0)} \quad (1)$$

$$(2) \text{ 求相对误差: } \varepsilon_{(i)} = \frac{\Delta_{(i)}^{(0)}}{x_{(i)}^{(0)}} \times 100\% \quad (2)$$

$$(3) \text{ 求平均相对误差: } \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |\varepsilon_{(i)}| \quad (3)$$

$$(4) \text{ 求建模精度: } P^0 = (1 - \bar{\varepsilon}) \times 100\% \quad (4)$$

后验差检验即残差概率检验。

$$(1) \text{ 求标准差: } S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{(i)}^{(0)} - \bar{x}_{(i)}^{(0)})^2 \quad (5)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{(i)}^{(0)} - \bar{\varepsilon})^2 \quad (6)$$

$$(2) \text{ 计算方差比: } C = S_1/S_2 \quad (7)$$

(3) 计算小误差概率:

$$P = \{ |\Delta_{(i)}^{(0)} - \bar{\varepsilon}| < 0.6745 S_1 \} \quad (8)$$

$C$  值越小  $P$  值越大模型精度越高,一般要求  $C < 0.35$ , 最大不超过 0.65;  $P > 0.95$ , 不得小于 0.7。模型精度等级划分<sup>[16]</sup>(表 1)。

表 1 灰色预测精度检验等级

Table 1 The grades of grey prediction accuracy test

| 等级<br>Grade     | 检验标准 Inspection standard |                      |
|-----------------|--------------------------|----------------------|
|                 | $P$                      | $C$                  |
| 好 Good          | $P > 0.95$               | $C < 0.35$           |
| 合格 Qualified    | $0.80 < P \leq 0.95$     | $0.35 \leq C < 0.50$ |
| 勉强 Reluctant    | $0.70 < P \leq 0.80$     | $0.50 \leq C < 0.65$ |
| 不合格 Substandard | $P \leq 0.70$            | $C \geq 0.65$        |

## 2.2 水资源生态足迹模型

根据水资源生态足迹的内涵和用水特性,将水资源利用水分为生活用水、生产用水和生态环境用水三大类进行计算,具体计算步骤<sup>[20]</sup>如下:

水资源生态足迹:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times (W/P_w) \quad (9)$$

式中,  $EF_w$  为水资源总生态足迹( $\text{hm}^2$ );  $N$  为人口总数(人);  $ef_w$  为人均水资源生态足迹( $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ );  $\gamma_w$

为水资源的全球均衡因子,其取值为 5.19;  $W$  为人均消耗的水资源量( $\text{m}^3$ );  $P_w$  为世界水资源平均生产能力( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ),其取值为  $3\,140 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

为便于计算,本研究选择根据 WWF2002 确定的水资源均衡因子 5.19 作为计算值,水资源全球平均生产能力  $P_w$ : 采用水文学中的产水模数来描述水资源生产能力,根据学者研究结果,世界水资源平均生产能力为  $3\,140 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[6]</sup>。

## 2.3 水资源生态承载力

水资源生态承载力代表区域内水资源与各个用水账户之间存在的供需关系以及可持续程度,可将其定义为:某一区域在某一具体历史发展阶段,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。具体可表述为:某一区域在具体的发展阶段,考虑当前科技、文化、体制的影响,在当前的管理技术条件下,水资源对生态系统和经济系统良性发展的支撑能力<sup>[21]</sup>。因此,研究水资源生态承载力对于人类合理开发和利用水资源起到了相当重要的作用。

2.3.1 水资源生态承载力计算模型 水资源承载力<sup>[22]</sup>

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times B_w \times A_w \times (Q/P_w) \quad (10)$$

式中,  $EC_w$  为水资源承载力( $\text{hm}^2$ );  $ec_w$  为人均水资源承载力( $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ );  $B_w$  为计算区域水资源用地的产量因子;  $A_w$  为水资源全球均衡因子;  $Q$  为水资源总量( $\text{m}^3$ );  $P_w$  为世界水资源平均生产能力( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

参照前人的研究成果,一个国家和一个地区的水资源承载力中的 60% 用于维持生态环境,因此在水资源承载力的计算中要乘以系数 0.4<sup>[23]</sup>。水资源的产量因子采用该区域水资源平均生产能力与世界水资源平均生产能力的比值。2005—2014 年新疆水资源平均生产能力为  $6.91 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 世界水资源平均生产能力为  $31.40 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[6]</sup>。因此新疆水资源产量因子为 0.22。

2.3.2 水资源生态盈余和水资源生态赤字 水资源生态赤字和水资源生态盈余是将区域内水资源生态足迹和承载力相比较,就会得出水资源生态赤字或盈余,该指标可用来判断研究区域内水资源的可持续利用情况<sup>[6,24]</sup>。

$$\text{水资源生态赤字(盈余)} = EC_w - EF_w \quad (11)$$

当  $EC_w < EF_w$  时,为水资源生态赤字,表明水资源处于不可持续状态;当  $EC_w = EF_w$  时,为水资源生态平衡;当  $EC_w > EF_w$  时,为水资源生态盈余,

表明水资源可持续发展。

### 2.4 水资源负载指数

水资源负载指数表示某个地方水资源的开发利用前景,其物理意义是区域水资源量与人口和国内生产总值决定的水资源需求量的关系,反映了区域水资源的利用水平及今后水资源开发的难易程度,它与水资源的可利用程度呈负相关。同时还能反映出以后该地区水资源开发的难易程度,分为 5 个等级(表 2),孟丽红等<sup>[24]</sup>利用水资源负载指数反映了江西省 2007—2011 年的水资源利用、开发情况,结果与实际相符,说明引入水资源负载指数是正确的。其计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$C = k\sqrt{PG} / W \quad (12)$$

式中,  $C$  为水资源负载指数;  $P$  为人口(万人);  $G$  为国内生产总值(亿元);  $W$  为水资源总量(亿  $m^3$ );  $k$  为与降水有关的系数,  $R$  为年降水量(mm),其取值公式如下:

$$k = \begin{cases} 1 & R \leq 200 \\ 1.0 - 0.1(R - 200)/200 & 200 \leq R \leq 400 \\ 0.9 - 0.2(R - 200)/400 & 400 \leq R \leq 800 \\ 0.7 - 0.2(R - 200)/800 & 800 \leq R \leq 1600 \\ 0.5 & R \geq 1600 \end{cases} \quad (13)$$

表 2 水资源负载指数分级评价

Table 2 Evaluation classification for carrying index of water resource

| 级别<br>Level | C 值<br>C value | 水资源利用程度及开发潜力<br>The degree of utilization of water resources and development potential | 水资源进一步开发评价<br>Evaluation of water resources in the future to further develop       |
|-------------|----------------|--|--|
| I           | > 10           | 很高, 潜力很小<br>Very high, little potential  | 艰巨, 有条件时需要外流域调水<br>Difficult, when conditions require diversion from outside basin |
| II          | 5 ~ 10         | 高, 潜力小<br>High, small potential  | 很困难<br>Difficult   |
| III         | 2 ~ 5          | 中等, 潜力较大<br>Medium, greater potential  | 中等<br>Moderate   |
| IV          | 1 ~ 2          | 较低, 潜力大<br>Lower, great potential  | 较容易<br>Easier  |
| V           | < 1            | 低, 潜力很大<br>Low, great potential  | 兴修中小工程, 开发容易<br>Beefing small engineering, develop easily                          |

### 2.5 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹 ( $EF_{GDP}$ ), 是用来衡量水资源的利用率的指标, 指区域水资源生态足迹与地区生产总值(GDP)的比值<sup>[26]</sup>, 公式如下:

$$EF_{GDP} = EF_w / GDP \quad (14)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 新疆 2005—2014 年水资源生态足迹、生态承载力及生态赤字/盈余变化趋势

按照上述公式, 计算结果见表 3。新疆 2005—2014 年的水资源生态足迹总体呈上升趋势。生产用水生态足迹在三个水资源账户中比例最大, 远远超出其它两部分, 占总水资源足迹的 95.86%, 新疆用于生态环境方面的水资源最少, 投入生产的水资源比重几乎占据了所有水资源, 说明大部分的水资源都用于农业生产、工业生产, 对于环境改善和保护的水资源投入量很少。生活用水的生态足迹所占比重也很小, 但有逐渐增加的趋势, 主要是因为人口增长、居住和生活水平提高引起的。2014 年为最大值

15.34 × 10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>, 比 2005 年的 8.88 × 10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup> 多了 6.46 × 10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>。生产用水先增加后减少, 从 2005 年的 7.96 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup> 增加至 2014 年的 9.47 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>, 之后减少至 9.38 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>。2005 年水资源生态足迹为 8.4 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>, 到 2014 年增加至 9.62 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>。万元 GDP 水资源生态足迹逐渐降低(图 4), 2013 年达到最大值, 为 9.25 × 10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>, 说明新疆水资源利用率有逐年提高的趋势, 但随着经济的发展, 水资源消费依然旺盛, 对水资源的需求量仍在逐渐增加。在空间分布上, 南北东疆差异较大, 南北疆水资源生态足迹是东疆水资源生态足迹的 10 倍左右, 而南北疆万元 GDP 水资源生态足迹均小于东疆。

从图 2 可以看出, 新疆人均水资源生态足迹保持在 3.255 ~ 4.765 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>之间, 呈先上升后下降的趋势, 在 2006 年达到最大值 4.765 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>; 南疆保持在 1.963 ~ 2.754 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>之间, 在 2006 年达到最大值 2.754 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>; 北疆保持在 1.125 ~ 1.805 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>之间, 大体呈先上升后下降的趋势; 东疆则保持在 0.152 ~ 0.207 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>之间, 气候较

干燥,降水量少,人均水资源就比南北疆低得多。

新疆水资源承载力年间差异不大(图 1),在  $0.571 \times 10^7 \sim 0.654 \times 10^7 \text{ hm}^2$  之间,南北疆水资源承载力远远大于东疆。新疆水资源承载力与降水量之间的相关性系数为 0.51,说明水资源承载力与降水量呈正相关。

全疆和北疆的人均水资源承载力最高值出现在 2006 年,最低值出现在 2011 年;南疆人均水资源承载力保持在  $0.133 \sim 0.187 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$  之间,最高值出现在 2006 年,最低值出现在 2013 年;东疆人均水资源承载力保持在  $0.002 \sim 0.005 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$  之间,北疆人均水资源承载力最高可达东疆的 8 倍,南疆的人

均水资源承载力最高可达东疆的 13 倍。在一定程度上水资源承载力受限于水文、气象、植被等自然资源因素。

从表 3、图 1 和图 2 可以看出,新疆水资源处于生态赤字状态。整体来看,2005—2014 年水资源生态赤字呈波动下降趋势,从 2005 年的  $-7.83 \times 10^7 \text{ hm}^2$  下降至 2013 年的  $-9.06 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,由于当时人们不注意水资源合理利用,缺乏生态保护意识,耗水量大,造成水资源浪费,生态赤字严重,2014 年又上升到  $-8.96 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,说明新疆水资源利用情况正趋于合理。

表 3 新疆 2005—2014 年水足迹和水资源承载能力

Table 3 Ecological footprint of water resources and water resources carrying capacity in Xinjiang from 2005 to 2014

| 区域<br>Area              | 项目<br>Item | 2005   | 2006   | 2007   | 2008   | 2009   | 2010   | 2011   | 2012   | 2013   | 2014   |
|-------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 南疆<br>South<br>Xinjiang | P          | 4.804  | 4.711  | 4.828  | 5.069  | 4.943  | 5.127  | 5.042  | 5.662  | 5.836  | 5.588  |
|                         | L          | 3.091  | 3.620  | 3.884  | 4.297  | 5.107  | 3.950  | 7.256  | 4.165  | 6.248  | 5.686  |
|                         | E          | 1.600  | 1.597  | 1.238  | 0.998  | 0.964  | 0.626  | 1.045  | 0.607  | 0.319  | 0.278  |
|                         | T          | 4.995  | 4.907  | 4.983  | 5.211  | 5.091  | 5.230  | 5.218  | 5.764  | 5.930  | 5.671  |
|                         | C          | 0.340  | 0.334  | 0.339  | 0.354  | 0.346  | 0.356  | 0.355  | 0.392  | 0.403  | 0.386  |
|                         | S          | -4.660 | -4.570 | -4.650 | -4.860 | -4.750 | -4.870 | -4.860 | -5.370 | -5.530 | -5.290 |
| 北疆<br>North<br>Xinjiang | P          | 2.788  | 2.929  | 2.920  | 2.836  | 3.031  | 2.946  | 2.913  | 3.096  | 3.207  | 3.397  |
|                         | L          | 5.289  | 5.537  | 6.132  | 6.992  | 7.653  | 6.959  | 4.496  | 5.488  | 8.000  | 8.744  |
|                         | E          | 1.917  | 2.317  | 2.002  | 2.202  | 1.613  | 2.074  | 0.331  | 0.514  | 0.583  | 0.524  |
|                         | T          | 3.033  | 3.216  | 3.189  | 3.126  | 3.269  | 3.223  | 2.991  | 3.203  | 3.345  | 3.537  |
|                         | C          | 0.206  | 0.219  | 0.217  | 0.213  | 0.222  | 0.219  | 0.203  | 0.218  | 0.227  | 0.241  |
|                         | S          | -2.830 | -3.000 | -2.970 | -2.910 | -3.050 | -3.000 | -2.790 | -2.990 | -3.120 | -3.300 |
| 东疆<br>East<br>Xinjiang  | P          | 0.363  | 0.354  | 0.365  | 0.374  | 0.392  | 0.368  | 0.429  | 0.407  | 0.429  | 0.392  |
|                         | L          | 0.496  | 0.545  | 0.628  | 0.727  | 0.909  | 0.661  | 0.859  | 0.826  | 0.859  | 0.909  |
|                         | E          | 0.074  | 0.086  | 0.140  | 0.122  | 0.154  | 0.174  | 0.061  | 0.074  | 0.061  | 0.068  |
|                         | T          | 0.375  | 0.368  | 0.385  | 0.394  | 0.417  | 0.392  | 0.444  | 0.422  | 0.444  | 0.408  |
|                         | C          | 0.026  | 0.025  | 0.026  | 0.027  | 0.028  | 0.027  | 0.030  | 0.029  | 0.030  | 0.028  |
|                         | S          | -0.350 | -0.340 | -0.360 | -0.370 | -0.390 | -0.370 | -0.410 | -0.390 | -0.410 | -0.380 |
| 全疆<br>Xinjiang          | P          | 7.955  | 7.994  | 8.113  | 8.278  | 8.365  | 8.441  | 8.383  | 9.165  | 9.472  | 9.376  |
|                         | L          | 8.876  | 9.702  | 10.644 | 12.020 | 13.670 | 11.570 | 12.610 | 10.480 | 15.110 | 15.340 |
|                         | E          | 3.592  | 4.000  | 3.380  | 3.322  | 2.731  | 2.874  | 1.436  | 1.195  | 0.964  | 0.869  |
|                         | T          | 8.403  | 8.491  | 8.558  | 8.731  | 8.775  | 8.844  | 8.653  | 9.389  | 9.720  | 9.617  |
|                         | C          | 0.571  | 0.577  | 0.582  | 0.594  | 0.597  | 0.601  | 0.588  | 0.638  | 0.661  | 0.654  |
|                         | S          | -7.830 | -7.910 | -7.980 | -8.130 | -8.180 | -8.240 | -8.070 | -8.750 | -9.060 | -8.960 |
|                         | W          | 3.468  | 3.026  | 2.561  | 2.222  | 1.715  | 1.691  | 1.324  | 1.171  | 0.925  | 0.832  |

注:P表示生产用水( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ );L表示生活用水( $\times 10^5 \text{ hm}^2$ );E表示生态环境用水( $\times 10^6 \text{ hm}^2$ );T表示总用水量( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ );C表示水资源承载力( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ );W表示万元GDP水足迹( $\times 10^8 \text{ hm}^2$ );S表示生态赤字( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ )。

Note:P stands for production of water( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ ); L stands for life water Consumption( $\times 10^5 \text{ hm}^2$ ); E stands for ecological environment water( $\times 10^6 \text{ hm}^2$ ); T stands for total water resources( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ ); C stands for water resources carrying capacity( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ ); W stands for water resources ecological footprint per  $10^4$  yuan GDP( $\times 10^8 \text{ hm}^2$ ); S stands for Ecological deficit( $\times 10^7 \text{ hm}^2$ ).

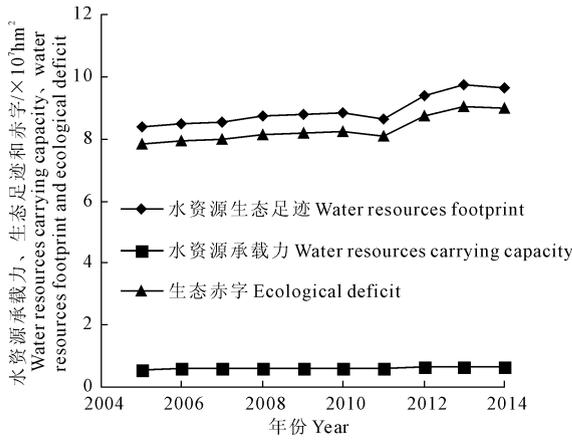


图1 新疆2005—2014年水资源生态足迹、水资源承载力和生态赤字

Fig.1 Water resources footprint, water resources carrying capacity and ecological deficit in Xinjiang from 2005 to 2014

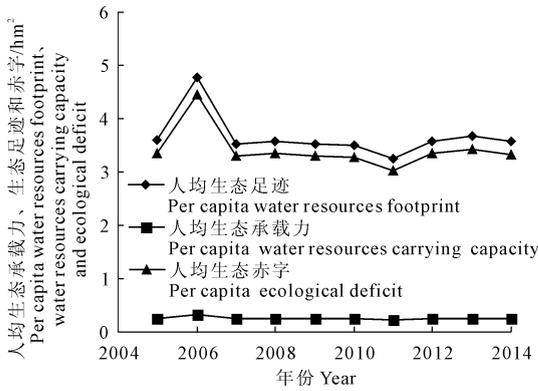


图2 新疆2005—2014年水资源人均生态足迹、人均水资源承载力和人均生态赤字

Fig.2 Per capita water resources footprint, water resources carrying capacity and ecological deficit in Xinjiang from 2005 to 2014

### 3.2 新疆2005—2014年水资源负载指数

从表4可以看出新疆的水资源负载指数呈上升

表4 新疆2005—2014年水资源负载指数分级

Table 4 Classification of load index of water resources in Xinjiang during 2005—2014

| 年份<br>Year | 水资源负载指数<br>Load index of water resources | 级别<br>Level | 水资源利用程度<br>The degree of utilization of water resources | 开发评价<br>Evaluation of development               |
|------------|--|-------------|---|---|
| 2005       | 2.34                                     | Ⅲ           | 中等, 潜力较大<br>Medium, great potential                     | 开发条件中等<br>Development conditions are moderate   |
| 2006       | 2.18                                     |             |   |   |
| 2007       | 2.52                                     |             |   |   |
| 2008       | 2.93                                     |             |   |   |
| 2009       | 3.36                                     |             |   |   |
| 2010       | 3.39                                     |             |   |   |
| 2011       | 3.98                                     | Ⅱ           | 高, 潜力小<br>High, small potential                         | 开发条件很困难<br>Development conditions are difficult |
| 2012       | 4.03                                     |             |   |   |
| 2013       | 5.48                                     |             |   |   |
| 2014       | 5.79                                     |             |   |   |

### 3.3 新疆2012—2014年各地州(市)水资源生态足迹与生态承载力

本研究对2012—2014年新疆15个地州(市)的

趋势,表明水资源的利用程度逐渐加强,2005—2012年负载指数在2~5之间,表明新疆水资源利用程度中等;到了2013年以后新疆水资源开发利用已具有相当规模,水资源供给对国民经济发展有一定的保障,进一步开发潜力较小,必须采取一系列行之有效的节水、用水措施才能满足新疆可持续发展的要求。

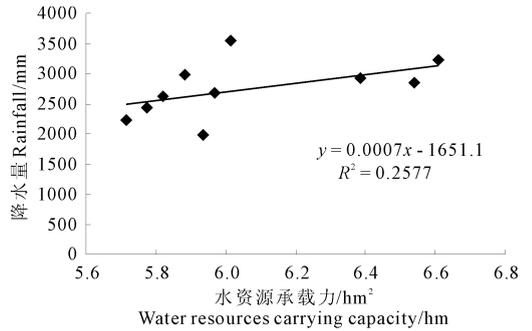


图3 水资源承载力与降水量之间的相关性

Fig.3 The correlation between water resources carrying capacity and rainfall

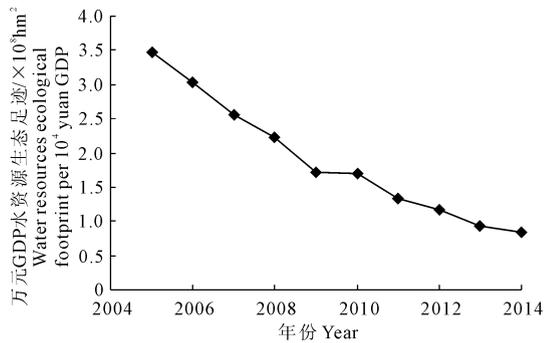


图4 新疆2005—2014年万元GDP生态足迹

Fig.4 Water resources ecological footprint per 10<sup>4</sup> yuan GDP of Xinjiang from 2005 to 2014

水资源生态足迹和水资源承载力进行了分析。从图5中可以看出,巴州、阿克苏地区、阿勒泰地区、塔城地区人均水资源生态足迹较高,均在5 hm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>以

上。这些地区人口密度小,人均水资源占有量大,导致人均水资源生态足迹大;人均水资源生态足迹较低的地区位于天山以北的乌鲁木齐市、石河子市、伊犁州、克拉玛依市、克州等地区。人均水资源生态足迹受人口密度、经济结构、节水水平、气候条件和水资源条件等多种因素影响。

从万元 GDP 水资源生态足迹来看(图 6),经济最发达的乌鲁木齐市最低,说明乌鲁木齐市比较注重水资源的利用,工业生产设备完善,技术先进,能够有效提高水资源利用效率;较高的区域分布在巴州、塔城、阿勒泰地区、阿克苏地区和昌吉州。主要

与这些地区的产业结构有关,而且水资源丰富,导致万元 GDP 水资源生态足迹较高,说明水资源利用效率低。2012—2014 年,大部分地州(市)万元 GDP 水资源生态足迹呈逐渐递减趋势。但是,塔城地区、阿克苏地区和阿勒泰地区的万元 GDP 水资源生态足迹呈逐渐递增趋势。

新疆水资源全部处于生态赤字状态,主要是由于经济高速发展下的人口和产业需水量激增,以及水污染、浪费和利用率低导致的。生态赤字较大的地区阿勒泰地区,高达  $9.944 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ,其次是阿克苏地区、巴州,高达  $5 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 。

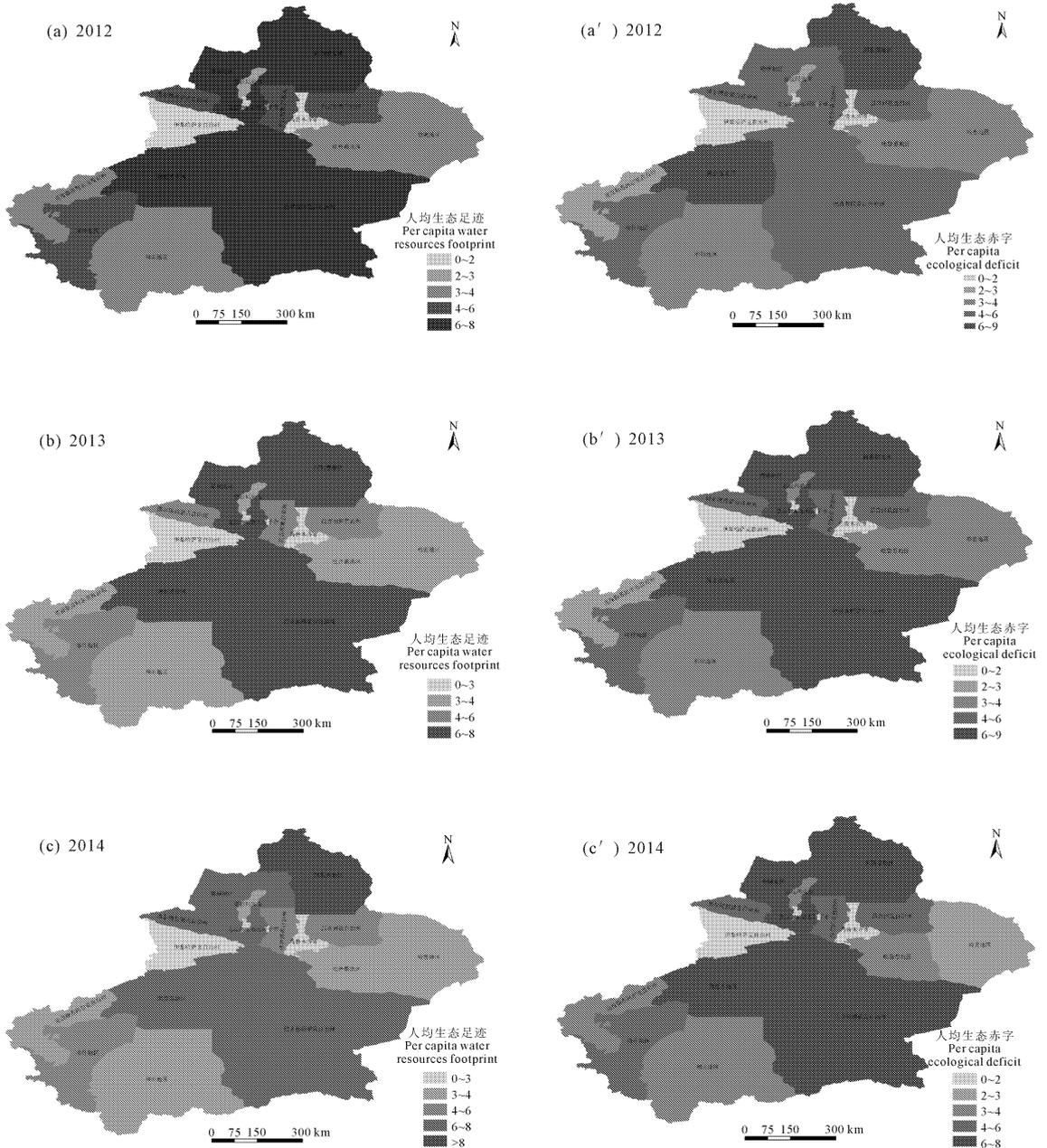


图 5 新疆 15 个地(州、市)2012—2014 年人均水资源生态足迹与生态赤字空间分布

Fig.5 Distribution map of water resources ecological footprint per capita and ecological deficit in 15 cities of Xinjiang from 2012 to 2014

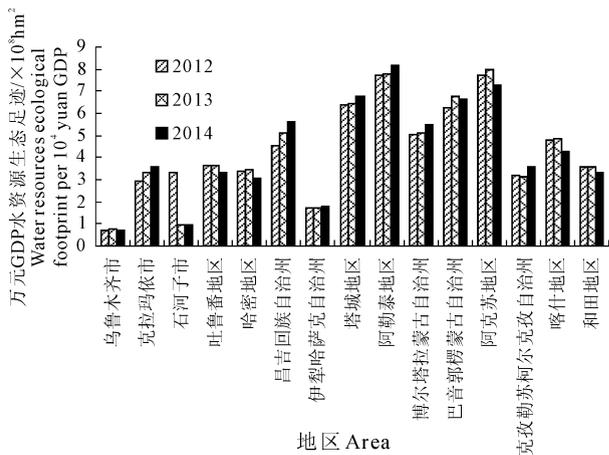


图 6 新疆 15 个地州(市)2012—2014 年万元 GDP 水资源生态足迹

Fig.6 Water Resources ecological footprint per 10<sup>4</sup> yuan GDP in 15 cities of Xinjiang from 2012 to 2014

### 3.4 新疆水资源生态赤字/盈余的预测

3.4.1 预测模型 通过 GM(1,1)模型,对新疆 2015—2025 年间的水资源生态赤字/盈余情况进行预测分析。通过公式计算求得: $\alpha = -0.0052$ ,  $\mu = -3.4044$ 。将值代入公式中得到预测模型:

$$X^{(1)}(t+1) = -66.0031e^{0.0052t} + 65.4692 \quad (15)$$

3.4.2 模型检验 从表 5 中可以看出,新疆水资源生态赤字/盈余原始值与拟合值的误差较小。通过残差检验和后验差检验对模型进行精度检验,根据残差检验的各项公式计算出 90.61%,满足精度要求。通过后验差检验计算得到原始数据方差  $S_1$  为 0.3566,残差方差  $S_2$  为 0.6839,求得后验差比值  $C$  为 0.52,小误差频率  $P$  为 0.75,可以看出该模型有足够的精度,可以作为预测模型。

表 5 2005—2014 年新疆水资源生态赤字/盈余原始值与拟合值对比

Table 5 The comparison table between original value and fitting value of water resources ecological footprint per capita and ecological deficit/surplus in Xinjiang from 2005 to 2014

| 年份<br>Year | 原始值<br>Original value | 拟合值<br>Fitted value | 残差<br>Residual |
|------------|-----------------------|---------------------|----------------|
| 2005       | -3.3470               | -3.347              | 0.0000         |
| 2006       | -4.4410               | -3.431              | 1.0100         |
| 2007       | -3.2944               | -4.554              | -1.2596        |
| 2008       | -3.3376               | -2.307              | 1.0306         |
| 2009       | -3.2965               | -3.529              | -0.2325        |
| 2010       | -3.2670               | -3.461              | -0.1940        |
| 2011       | -3.0341               | -3.490              | -0.4559        |
| 2012       | -3.3424               | -3.297              | 0.0454         |
| 2013       | -3.4249               | -3.878              | -0.4531        |
| 2014       | -3.3269               | -3.663              | -0.3361        |

3.4.3 预测结果 预测结果显示,新疆 2015—2025 年十年间水资源仍然处于赤字状态,2015 年为  $-3.492 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ,逐年减少至  $-7.7679 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 。随着经济的发展,水资源持续开发利用情况越来越不好,水资源生态足迹呈上升趋势,水资源承载力呈下降趋势,水资源生态赤字越来越严重。由于新疆经济发展迅速,工业发展不完善,水资源利用率低,农业用水逐步从粗放式利用转向集约化利用,人们环保意识薄弱。因此,今后的形势越来越严峻,在利用中提高节水意识。

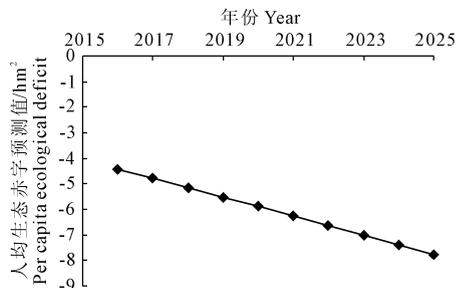


图 7 新疆 2015—2025 年水资源人均生态赤字/盈余预测  
Fig.7 Per capita ecological deficit/surplus in Xinjiang from 2015 to 2025

## 4 讨论与结论

通过水资源生态足迹模型和生态承载力模型,计算得到新疆水资源生态足迹和水资源承载力,通过 GM(1,1)模型预测,分析新疆水资源综合利用的发展趋势。结果显示:

1) 2005—2014 年新疆水资源生态足迹和承载力均呈上升趋势;人均生态足迹和人均承载力呈上下波动状态。生产用水生态足迹在三个水资源账户中比例最大,远远超出其它两部分,占总水资源足迹的 95.86%。

2) 2005—2014 年水资源呈生态赤字状态。整体来看呈波动下降趋势,从 2005 年的  $-7.83 \times 10^7 \text{ hm}^2$  下降至 2013 年的  $-9.06 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,由于当时人们不注意水资源合理利用,缺乏生态保护观念,耗水量大,造成水资源浪费,生态赤字严重,2015 年又上升到  $-8.96 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,由于科学技术水平的提高和人们节水意识增强,水资源利用与管理正在逐渐趋于合理。

3) 新疆的水资源负载指数呈上升趋势,表明水资源的利用程度逐渐加强,2005—2012 年负载指数在 2~5 之间,表明新疆水资源利用程度中等;到了 2013 年以后新疆水资源开发利用已具有相当规模,水资源供给对国民经济发展有一定的保障,进一步开发潜力较小,必须要采取一系列行之有效的节水、

用水措施才能满足新疆可持续发展的要求。

4) 生态赤字预测结果为:新疆从 2015—2025 年十年间水资源仍然处于赤字状态,生态赤字 2015 年为  $-3.492 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ,逐年减少至  $-7.7679 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 。说明今后的形势仍较严峻。

综上所述,新疆水资源利用情况一直处于不可持续状态,所以做好水资源合理利用与开发工作是未来新疆发展的重中之重。一方面优化水资源配置,防止水质污染,实行全面节水;另一方面增加水资源的重复利用率,完善相关的法律体系,建立合理的水资源管理制度。

#### 参考文献:

- [1] 马 静,汪宏献,来海亮,等.中国区域水足迹的估算[J].资源科学,2005,27(5):96-100.
- [2] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and urbanization, 1992,4(2):121-130.
- [3] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. Ecological economics, 1997,20(1):3-24.
- [4] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability[J]. Population and environment, 1996,17(3):195-215.
- [5] 马 晶,彭 建.水足迹研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5458-5466.
- [6] 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,2008,28(3):1279-1286.
- [7] 王文国,何明雄,潘 科,等.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.
- [8] 徐中民,张志强,等.甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J].地理学报,2000,55(5):608-616.
- [9] 韩照祥,吴丹丹,吴 珏,等.江苏沿海地区淡水资源水生态足迹的动态变化[J].淮海工学院学报,2012,21(2):34-38.
- [10] 李玉平,朱 琛,朱金亮,等.资源型城市邢台市生态足迹核算与预测研究[J].水土保持研究,2013,20(4):48.
- [11] 邱 微,樊庆铎,赵庆良,等.黑龙江省水资源生态承载力计算[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(6):1000-1003.
- [12] 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.
- [13] 卞 羽,洪 伟,陈 燕,等.福建水资源生态足迹分析[J].福建林学院学报,2010,30(1):1-5.
- [14] 黄 晶,宋振伟,陈 阜.北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J].生态学报,2010,30(23):6546-6554.
- [15] 新疆维吾尔自治区统计局.2005—2014 年新疆维吾尔自治区水资源公报 [DB/OL]. [http://www.xjtj.gov.cn/sjcx/tjgh\\_3414/](http://www.xjtj.gov.cn/sjcx/tjgh_3414/).html,2010-09-13/2010-11-13.
- [16] 新疆维吾尔自治区统计局.2005—2014 年新疆维吾尔自治区统计年鉴 [DB/OL]. [http://www.xjtj.gov.cn/sjcx/tjnj\\_3415/](http://www.xjtj.gov.cn/sjcx/tjnj_3415/).html,2010-09-13/2010-11-13.
- [17] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:37-69.
- [18] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [19] 王文欣,徐华君,王丹彤.阿克苏地区水资源生态足迹核算与预测研究[J].安徽农业科学,2015,43(1):227-229.
- [20] 赵国华,翟国静,何 平,等.廊坊市区域现状水资源承载力分析[J].水土保持研究,2009,16(1):245-249.
- [21] 王重玲,朱志玲,王梅梅,等.基于生态服务价值的宁夏隆德县生态补偿研究[J].水土保持研究,2014,21(1):208-212.
- [22] 杨 越,哈 斯,杜会石,等.基于 RS 和 GIS 的宁夏盐池县土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].水土保持研究,2014,21(5):100-105.
- [23] 杨艳昭,张伟科,刘登伟.内蒙古水土资源平衡及其水资源承载能力[J].干旱区地理,2008,31(3):436-441.
- [24] 孟丽红,叶志平,袁素芬,等.江西省 2007—2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J].水土保持通报,2015,35(1):256-261.
- [25] 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.
- [26] 李文华,张 彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.

(上接第 106 页)

- [9] 吴 娜,刘吉利,鲁 文.马铃薯/燕麦间作对根际土壤微生物数量的影响[J].西北农业学报,2015,24(5):163-167.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所微生物室.土壤微生物研究法[M].北京:科学出版社,1985:4.
- [11] 魏兰芳,董 艳,汤 利,等.小麦蚕豆间作条件下不同施氮量对作物根际微生物数量的影响[J].云南农业大学学报,2008,23(3):368-374.
- [12] 董 艳,董 坤,汤 利,等.小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系[J].生态学报,2013,33(23):7445-7454.
- [13] 董 艳,汤 利,郑 毅,等.小麦-蚕豆间作条件下氮肥施用量对根际微生物区系的影响[J].应用生态学报,2008,19(7):1559-1566.
- [14] 刘均霞,陆引罡,远红伟,等.玉米、大豆间作对根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J].贵州农业科学,2007,35(2):60-61,64.
- [15] 宋亚娜,MARSCHNER Petr,张福锁,等.小麦/蚕豆,玉米/蚕豆和小麦/玉米间作对根际细菌群落结构的影响[J].生态学报,2006,26(7):2268-2274.
- [16] 章家恩,高爱霞,徐华勤,等.玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1597-1602.
- [17] 蔡秋华,左进香,李忠环,等.抗性烤烟品种根际微生物数量及功能多样性差异[J].应用生态学报,2015,26(12):3766-3772.
- [18] 覃潇敏,郑 毅,汤 利,等.玉米与马铃薯间作对根际微生物群落结构和多样性的影响[J].作物学报,2015,41(6):919-928.
- [19] 安瞳昕,李彩虹,吴伯志,等.玉米不同间作方式对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持学报,2007,21(5):18-20.