

# 基于 RAGA — PPPCA 模型的区域农业 水土资源承载力综合评价

任守德, 付强, 王凯, 姜秋香, 王子龙

(东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:**在全面分析影响农业水土资源复杂系统承载力变化诸多因素的基础上,初步提出了农业水土资源承载力的概念,选取 27 个与农业水土资源密切相关的承载力评价指标,为了解决评价指标过多引起的评价过程复杂性问题,将主成分分析法有效解决指标间多重相关性的特性和投影寻踪模型高效降维技术有效结合在一起,提出了投影寻踪主成分分析模型。将该模型应用于三江平原农垦建三江分局农业水土资源承载力综合评价中,取得了满意的结果,同时为农业水土资源承载力评价研究提供新的研究思路和研究方法。

**关键词:**农业水土资源承载力;投影寻踪主成分分析模型;综合评价;三江平原

中图分类号:F323.21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0116-05

## Comprehensive Evaluating Regional Agricultural Water and Soil Resources Carrying Capacity Based on RAGA-PPPCA Model

REN Shou-de, FU Qiang, WANG Kai, JIANG Qiu-xiang, WANG Zi-long

(College of Water Conservancy & Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** On the basis of giving an overall analysis of factors influencing the changes of the carrying capacity of agricultural water and soil resources complex system, in this paper, the concept of the agricultural soil and water resources carrying capacity are preliminarily proposed. 27 evaluation indexes of the carrying capacity are selected. They are all closely related to the agricultural soil and water resources. In order to solve the problem of the evaluation process complexity that caused by the excess evaluation indexes. This paper puts forward Projection Pursuit Principal Components Analysis model. This model effectively combines the characteristic of Principal Components Analysis, which can solve multi-correlation among indexes effectively, and the technology of the Projection Pursuit model, which can reduce dimension efficiently. This model has already been applied in comprehensive evaluation of the agricultural water and soil resources carrying capacity at Sanjiang plain Jiansanjiang region. It gained the satisfactory result. Moreover, it provides a new idea and approach for the study on the evaluation of the agricultural water and soil resources carrying capacity.

**Key words:** carrying capacity of agricultural water and soil resources; Projection Pursuit Principal Components Analysis model; comprehensive evaluation; Sanjiang plain

联合国粮农组织对土地资源承载力的研究始于 1977 年,1986 年由中国科学院自然资源综合考察委员会主持的“中国土地资源生产能力及人口承载量研究”,开创了国内有关土地资源承载力研究的先河<sup>[1]</sup>;我国从 20 世纪 80 年代末开始对城市和流域地区的

水资源承载力进行研究<sup>[2-5]</sup>,而对于以农业生产为主的垦区和灌区农业水资源承载力研究甚少。目前对于农业水土资源承载力的研究多是单独进行农业水资源承载力和耕地资源承载力研究,这种将农业水资源和耕地资源视为独立系统分别进行研究的思想阻

收稿日期:2010-08-06

修回日期:2010-09-10

资助项目:国家“十一五”科技支撑计划子课题(2009BADB3B0205);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20092325110014);黑龙江省普通高等新世纪优秀人才培养计划(1155-NCET-004)

作者简介:任守德(1985—),男,黑龙江伊春人,硕士,主要从事农业水土资源系统分析及高效可持续利用方面的研究。E-mail: rshmilydz@163.com

通信作者:付强(1973—),男,辽宁锦州人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。E-mail: fuqiang@neau.edu.cn

碍了区域农业水土资源系统整体效能的充分发挥,容易导致系统超负荷运行的弊端。农业水资源和耕地资源作为农业发展的最基本组成因子,水资源数量直接影响到耕地资源的生产效率;耕地资源的数量也直接制约着水资源的利用方式,二者相互联系、相互渗透、相互制约。因此,有必要将农业水土资源视为一个统一系统进行整体承载力评价,从而为提高区域农业水土资源利用效率,获得最优的粮食生产效益,加大农业生产对社会经济的支撑能力,确保农业的可持续发展和资源的可持续利用,提供坚实的理论基础和实际参考价值。所以,进行农业水土资源承载力综合评价研究势在必行。

## 1 区域农业水土资源承载力的内涵

目前对于水土资源承载力的概念,国内外还没有一个统一的定义。本文根据水资源承载力<sup>[6]</sup>和耕地资源承载力<sup>[7]</sup>相关内涵,初步定义区域农业水土资源承载力概念为:区域农业水土资源承载力是指某一地区的农业水土资源,在一定社会历史和科学技术发展阶段,在不破坏社会和生态系统时,最大可生产的粮食产量或承载最大人口数量的能力,是一个随着社会、经济、科学技术发展而不断变化的综合目标。

## 2 基于实码加速遗传算法的投影寻踪主成分分析模型

对农业水土资源承载力进行合理评价的前提是评价指标的正确选取,农业系统是一个非线性的复杂巨系统,为了保证评价结果的客观性和准确性,需要选取大量与农业水土资源密切相关的评价指标。评价指标可以看成是指标变量,每一变量都不同程度地反映了该类指标的信息,变量之间难免存在重叠、相关的关系。在用现代多元统计方法研究多变量问题时,变量太多会增大计算量和增加问题的复杂性,人们自然希望在进行定量分析的过程中涉及的变量应尽可能少,而信息量尽可能多。投影寻踪主成分分析模型(Projection Pursuit Principal Components Analysis,简称 PPPCA)是解决这一问题的理想工具<sup>[8]</sup>。

投影寻踪主成分分析模型的基本思想是,如果投影指标函数值的大于零的部分归因于前  $d(d \leq p)$  个成分,那么这些成分就可以“取代”原来的  $p$  个特征,而且信息完全利用。

步骤 1:指标的无量纲处理分为两步:

①对原始指标进行归一化处理,对于越大越优的指标:

$$x'(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} (i=1 \sim n, j=1 \sim p) \quad (1)$$

对于越小越优的指标:

$$x'(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} (i=1 \sim n, j=1 \sim p) \quad (2)$$

式中:  $x_{\max}(j), x_{\min}(j)$ ——第  $j$  个指标值的最大值和最小值;  $x^*(i, j)$ ——指标特征值;  $x'(i, j)$ ——指标特征值归一化的序列。

②将  $x'(i, j)$  进行标准化处理,即

$$x(i, j) = \frac{x'(i, j) - \bar{x}(j)}{S_{x(j)}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{x}(j)$ ——第  $j$  个指标值的均值;  $S_{x(j)}$ ——第  $j$  个指标值的标准差。

步骤 2: 设样本  $\{x(i, j) \mid i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p\}$  是  $p$  维观测数据,投影寻踪所要研究的是通过研究这些数据的一维投影来研究分析数据的结构和特征。设  $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$  是  $p$  维单位向量,数据在  $a$  方向上的一维投影值  $Z(i)$ :

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i, j) \quad (i=1 \sim n) \quad (4)$$

步骤 3: 投影指标就是  $z(i)$  的函数,记作  $Q(a)$ 。指标值越大越好,投影寻踪就是要求一个单位向量  $a_1$ ,使得

$$Q(a_1) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - Ez]^2 / (n-1), \left[ \sum_{j=1}^p a_1^2(j) = 1 \right] \right\} \quad (5)$$

这是一个以  $\{a(j) \mid j=1, 2, \dots, p\}$  为优化变量的复杂非线性优化问题,用传统的优化方法处理较难。因此,本文应用模拟生物优胜劣汰与群体内部染色体信息交换机制的基于实数编码的加速遗传算法(RAGA)来解决其高维全局寻优问题。

式(5)中,  $\|a_1\| = 1$  是  $a_1$  向量的长度。如果原数据确有某种结构或特征,指标又选得恰当,那么在所找到的这个方向上  $a_1$  一定含有数据的结构或特征,实现了有效特征的提取。

显然,这里的  $Q(a)$  就是主成分分析中的协方差矩阵的最大特征值,  $a_1$  就是主成分分析中的协方差矩阵最大特征值所对应的特征向量。如果继续做投影,在与  $a_1$  垂直的空间里求单位向量  $a_2$ ,使得

$$Q(a_2) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - Ez]^2 / (n-1), \left[ \sum_{j=1}^p a_2^2(j) = 1; a_2 \perp a_1 \right] \right\} \quad (6)$$

用线性代数方法可以证明  $a_2$  就是主成分分析中第二大特征向量,如此类推:

$$Q(a_3) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - Ez]^2 / (n-1), \right.$$

$$\begin{aligned} & \left[ \sum_{j=1}^p a_3^2(j) = 1; a_3 \perp a_1, a_2 \right] \\ Q(a_4) = & \max \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - Ez]^2 \right\} / (n-1), \\ & \left[ \sum_{j=1}^p a_4^2(j) = 1; a_4 \perp a_1, a_2, a_3 \right] \\ & \vdots \\ Q(a_d) = & \max \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - Ez]^2 \right\} / (n-1), \\ & \left[ \sum_{j=1}^p a_d^2(j) = 1; a_d \perp a_1, a_2, a_3, \dots, a_{d-1} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

就可以求出第三、第四主成分等,共提取投影指标函数值的大于零的  $d(d \leq p)$  个成分。可以看出主成分分析是投影寻踪主成分分析的特例。

步骤 4: 计算各个主成分,主成分为  $F_{i'i} = \sum_{j=1}^p \alpha_{i'j} \cdot x'_{(i,j)}, (i=1,2,\dots,n,i'=1,2,\dots,d,d \leq p)$ 。构造各个评价样本的综合评价函数  $F_i$ :

$$F_i = \sum_{i'=1}^d \alpha_{i'} F_{i'i}, (i=1,2,\dots,n,i'=1,2,\dots,d,d \leq p) \quad (8)$$

其中,系数  $a_1, a_2, \dots, a_d$  分别为第一、第二主成分, ..., 第  $d$  主成分的贡献率。

所以,投影寻踪主成分分析模型是探索性数据分析

方法,它是根据实际问题需要,寻找对数据分类最有效的投影方向,是一种数值方法求极大解的优化方法<sup>[8]</sup>。

3 实例研究

3.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省东北部,土地面积达10.89万 km<sup>2</sup>,耕地面积 383.24 万 hm<sup>2</sup>,占三江平原总面积的 35.08%,年产粮食 129 亿 kg,是我国重要的商品粮基地。该地区地下水资源较为丰富,然而随着井灌水稻面积的逐年增加和城镇化进程的加快,一些地区地下水资源严重超采,已经出现漏斗现象,农业水资源出现严重危机;三江平原土壤类型主要以草甸土和沼泽土为主,土壤结构主要为黑土层和黄土层,土壤特点为贮水能力强、供水能力弱。近年来,由于施肥不合理、管理不善、土壤侵蚀等人为和自然原因,导致土壤肥力水平下降,农田土壤退化较为严重,致使三江平原农业水土资源存在着严重的不合理利用问题,因此合理评价该地区农业水土资源承载力现状是十分必要的。本文以三江平原腹地的农垦建三江分局为例,分析其下属 15 个国有农场 2008 年农业水土资源相关资料,系统评价该地区农业水土资源承载力状况。

表 1 区域农业水土资源承载力评价指标体系

评价指标	计算公式	指标作用
第一产业比例 $C_1/\%$	第一产业增加值	反映区域产业结构状况
人均 GDPC <sub>2</sub> (万元/人)	GDP/总人口	反映区域整体经济水平
人口密度 $C_3/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	总人口/土地总面积	反映人口压力
农业水土资源匹配系数 $C_4/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	农业水资源量/耕地面积	反映农业水资源与耕地资源匹配状况
农业水资源利用率 $C_5/\%$	农业水资源使用量/区域水资源使用总量	反映农业水资源使用比例
人均耕地面积 $C_6(\text{hm}^2/\text{人})$	耕地面积/总人口	可持续耕地保障程度
农作物受灾面积比例 $C_7/\%$	农作物受灾面积/耕地面积	反映生态环境与农业生产协调状况
农机化程度 $C_8/(\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2})$	农机总动力/耕地面积	反映农业现代化程度
有效灌溉面积比例 $C_9/\%$	有效灌溉面积/耕地面积	反映农业水资源使用状况
人口自然增长率 $C_{10}/\%$	年净增人数/年平均人口数	反映人口对区域水土资源的动态压力
森林覆盖率 $C_{11}/\%$	年末森林面积/土地总面积	反映区域生态环境状况
单位耕地面积农药使用量 $C_{12}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	农药使用量/耕地面积	反映农业生产对生态环境影响程度
本年度水利工程投资比例 $C_{13}/\%$	本年水利工程总投资/水利工程累计总投资	反映农业水利发展程度
可垦荒地比例 $C_{14}/\%$	可垦荒地面积/土地总面积	反映区域土地可开采程度
种植业产值比例 $C_{15}/\%$	种植业产值/农业总产值	反映第一产业结构状况
耕地资源比例 $C_{16}/\%$	耕地面积/土地总面积	反映区域耕地保障情况
高耗水作物种植面积比例 $C_{17}/\%$	水稻播种面积/总播种面积	反映农业水土资源使用情况
农业总产值占工农业总产值比例 $C_{18}/\%$	农业总产值/工农业总产值	反映农业在社会生产中的比重
粮豆作物单位面积产量 $C_{19}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	粮豆作物年产量/粮豆作物播种面积	反映粮食作物平均产量情况
主要粮食作物单位面积产量 $C_{20}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	水稻年产量/水稻播种面积	反映主要粮食作物产量情况
年人均粮豆作物交售量 $C_{21}(\text{t}/\text{人})$	年粮豆作物交售量/总人口	反映区域粮食交售情况
GDP 增长率 $C_{22}/\%$	GDP 增长值/上一年 GDP	反映区域整体发展能力
农业用水定额 $C_{23}(\text{m}^3/\text{万元})$	农业用水量/农业总产值	反映农业水资源效率
单位面积耕地用电量 $C_{24}/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2})$	农业用电量/耕地面积	反映农业耗能水平
年内增加耕地面积比例 $C_{25}/\%$	年内增加耕地面积/年初耕地面积	反映耕地变化情况
施化肥耕地面积比例 $C_{26}/\%$	施化肥耕地面积/耕地总面积	反映人类对农业发展促进程度
人均纯收入 $C_{27}/\text{万元}$	人均总收入-一人均年内总支出	反映区域居民生活水平

3.2 三江平原农业水土资源承载力评价指标体系

水土资源承载力评价指标体系作为区域水土资源承载力研究的核心内容,如何制定适合研究区水土资源特点的承载力评价指标体系一直是水土资源承载力研究的重点和难点问题。本文全面分析了与建三江分局 2008 年农业发展密切相关的各种影响因素,根据《2008 年建三江农垦统计年鉴》中提供的农业水土资源相关资料,选择 27 个评价指标组成了三江平原农业水土资源承载力评价指标体系,各指标的

计算公式及作用见表 1。

3.3 RAGA—PPPCA 模型计算过程及结果分析

本文将三江平原农业水土资源承载力划分为三个等级:一级为良好,表示农业水土资源承载力水平较高,仍有较大的开发潜力;二级表示农业水土资源开发利用水平已达到很高规模,仍有一定开发潜力,农业水土资源的供给水平能够满足三江平原农业发展需求;三级表示农业水土资源承载力已接近临界值,进一步开发的潜力很小(表 2)。

表 2 三江平原农业水土资源承载力分级标准

分级标准	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>
一级	>85	>6	<10	2500~4000	100	>8	<30	>2.5	>80
二级	75~85	3~6	10~15	4000~8000 或 500~2500	99~100	3~8	30~60	1.5~2.5	50~80
三级	<75	<3	>15	<500 或 >8000	<99	<3	>60	<1.5	<50

分级标准	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>	C <sub>19</sub>
一级	<0	>15	<3	>10	>10	>90	>60	>90	>95	>600
二级	0~3	10~15	3~5	5~10	0~10	85~90	30~60	10~90	80~95	400~600
三级	>3	<10	>5	<5	<0	<85	<30	<10	<80	<400

分级标准	C <sub>20</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>26</sub>	C <sub>27</sub>
一级	>600	>50	>20	<2000	>280	>10	100	>2
二级	500~600	15~50	5~20	2000~4000	50~280	0~10	80~100	1~2
三级	<500	<15	<5	>4000	<50	<0	<80	<1

采用 Matlab 7.0 对投影寻踪主成分分析模型进行编程,在 RAGA 寻优过程中,选定父代初始种群规模  $n=400$ ,交叉概率  $p_c=0.80$ ,变异概率  $p_m=0.80$ ,优秀个体数目选定为 20 个,  $a=0.05$ ,加速次数为 20。最终共提取了 7 个主成分,7 个投影指标函数值分别为: $Q(a_1)=13.9151$ , $Q(a_2)=6.2323$ , $Q(a_3)=3.7508$ , $Q(a_4)=2.0537$ , $Q(a_5)=1.0639$ , $Q(a_6)=0.6730$ , $Q(a_7)=0.2878$ ,各主成分的贡献率: $\alpha_1=$

$49.74\%$ , $\alpha_2=22.27\%$ , $\alpha_3=13.41\%$ , $\alpha_4=7.34\%$ , $\alpha_5=3.80\%$ , $\alpha_6=2.41\%$ , $\alpha_7=1.03\%$ 。最后通过步骤 4 求得各个评价样本的综合评价函数值及承载力相对等级,见表 3。

分别采用主成分分析法(PCA),投影寻踪模型(PPC)对上述建三江分局各农场农业水土资源承载力进行综合评价,将其结果与投影寻踪主成分分析模型结果对比,见表 3。

表 3 各模型综合评价函数值结果及相对等级对比

序号	农场名	PPC 函数值	等级	PCA 函数值	等级	PPPCA 函数值	等级
1	八五九	1.9746	三级	-0.6623	三级	-1.2610	三级
2	胜利	1.9850	三级	-0.1995	三级	-0.8864	三级
3	七星	2.1550	二级	-0.2016	三级	-0.4939	三级
4	勤得利	1.9702	三级	-3.0104	三级	-4.2167	三级
5	大兴	2.5068	二级	-0.0128	二级	0.1704	二级
6	青龙山	1.9876	二级	0.3824	一级	0.1800	二级
7	前进	2.1839	二级	-0.0106	二级	-0.3038	二级
8	创业	3.1095	一级	0.3797	一级	0.5958	一级
9	红卫	2.9186	二级	0.1731	二级	0.4201	二级
10	前哨	1.9069	三级	-0.2065	三级	-0.4251	三级
11	前锋	2.9206	二级	-0.9147	三级	-0.7561	三级
12	洪河	3.1009	一级	0.9978	一级	1.7900	一级
13	鸭绿江	2.9232	一级	0.8272	一级	1.1123	一级
14	二道河	3.3106	一级	1.5024	一级	2.5228	一级
15	浓江	3.1036	一级	1.2909	一级	2.0087	一级

从表 3 中得知,PPPCA 计算结果与其他两个模型的计算结果基本一致。浓江、二道河、鸭绿江、红河等农场农业水土资源承载力处于相对较高的一级水平,因为这些农场人口相对较少,人均粮食产量和人均耕地面积较高,可见人口是制约承载力水平的关键因素;而八五九、胜利、七星、勤得利等农场农业水土资源承载力则处于相对较低的三级水平,因为建三江分局整体地形为盆地,周边地区地下水储量较低,而且建三江地区农业用水主要以开采地下水为主,故地下水资源数量对农业水土资源承载力影响较大。

所以,加强建三江周边农场引用挠力河、黑龙江、乌苏里江水源工程的建设,加强对地表水资源的合理利用,灌排结合,可以有效缓解地下水供给农业水资源的压力;控制人口数量的过快增长,提高人口质量,加大农业机械化进程,从而全面提高建三江分局农业水土资源承载力。

将各模型计算结果绘成曲线图,见图 1。从三条曲线的分布趋势及评价结果可知,PPPCA 模型计算结果的曲线构成与 PCA 模型基本相同,计算结果也十分一致,但是 PPPCA 模型较 PCA 法更有优势,PPPCA 模型计算出来的评价结果之间的差别变化大,结果之间的波动范围较大,便于进行承载力分级;而 PCA 方法的计算结果(如结果 2,3)之间变化很小,承载力分级比较困难。由于 PPC 模型本身具有的评价结果不确定性特点,可能会使 PPC 模型的计算结果与 PCA 和 PPPCA 模型的计算结果存在差异,但总体趋势是不会改变的。可见,PPPCA 模型不但评价结果稳定,而且结果之间的变化更大,便于进行分类。因此,投影寻踪主成分分析模型是将主成分分析法有效解决指标间多重相关性的特性和投影寻踪模型高效降维技术有效结合在一起,用主成分分析法解决投影寻踪模型评价结果不稳定的缺点,是对投影寻踪模型的进一步完善,为综合评价研究提供一种更加有效的分类评价模型。

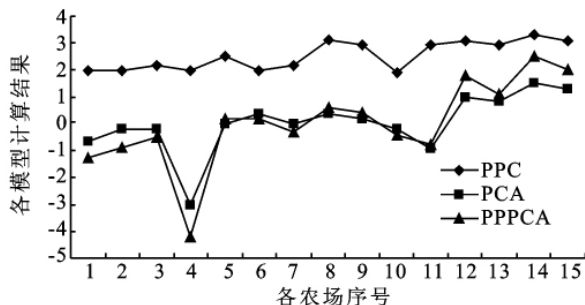


图 1 各模型计算结果比较图

## 4 结 论

(1)在分析水土资源承载力研究现状的基础上,结合我国农业生产地区农业水土资源特点,初步提出了农业水土资源承载力概念,为垦区、灌区和其他以农业生产为主的地区进行农业水土资源承载力研究提供理论参考。

(2)将主成分分析法和投影寻踪模型有效地结合在一起,提出投影寻踪主成分分析模型,并将其应用于农业水土资源承载力评价中,不但解决了由于评价指标过多引起的指标间多重相关性问题,而且较好地处理了由此带来的评价过程复杂性问题,同时避免了指标权重人为确定的弊端,具有很好的推广应用价值。

(3)在进行水土资源承载力综合评价研究中,指标评价等级标准的确定仍然是一个尚未解决的问题,现有的指标评价等级标准只是用来判别研究区内部各子研究区域之间的承载力相对等级,无法真正计算出研究区承载能力的真正大小。所以如何制定出适合不同区域不同时期的承载力评价指标等级标准,应该成为今后学者们重点研究的问题。

### 参考文献:

- [1] 封志明,杨艳昭,张晶. 中国基于人粮关系的土地资源承载力研究:从分县到全国[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5):865-875.
- [2] Sahrawat K L, Wani S P, Pathak P, et al. Managing natural resources of watersheds in the semi-arid tropics for improved soil and water quality: A review[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3):375-381.
- [3] 张永勇,夏军,王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨[J]. 地理科学进展, 2007, 26(2):126-132.
- [4] 赵小勇,付强. 投影寻踪模型的改进及其在城市水资源承载能力预测中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(7):76-81.
- [5] 赵建世,王忠静,秦韬,等. 海河流域水资源承载能力演变分析[J]. 水利学报, 2008, 39(6):647-658.
- [6] 段春青,刘昌明,陈晓楠. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 2010, 65(1):82-90.
- [7] 任守德,付强,王凯. 区域水土资源承载力研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(2):222-226.
- [8] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2006:111-115.