

# 区域农业水土资源复杂适应系统配置研究

——以三江平原为例

马吉巍, 郭翔宇, 付强, 王凯, 马效松

(东北农业大学, 哈尔滨 150030)

**摘 要:**针对三江平原农业用水、用地结构不合理,难以发挥系统最大效能问题,以农垦建三江分局 2011 年数据为基础,运用复杂适应系统的思想,构建了三江平原农业水土资源复杂适应性配置模型,并对不同地下水开采方案下的农业水土资源优化配置进行了演化分析。结果表明:随着地下水开采量的增加,农业产值和粮食产量都有所增加,生态面积在一定范围内有所减少。随着地下水开采量的减少,其高效利用的土地面积会随之减少,造成大量的土地不能有效得到利用,严重阻碍了区域水资源与土地资源的耦合与当地经济的发展,上述非线性关系以及各子系统对水量变化敏感程度的不同正是其适应性的表现。研究成果对于指导三江平原科学合理的开发利用农业水土资源,提高农业水土资源的利用效率具有重要的理论和实践意义。

**关键词:**三江平原; 农业水土资源; 复杂适应系统; 主体; 建三江分局

中图分类号: S273

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)03-0256-05

## Study on Complex Adaptive Allocation of Regional Agricultural Water and Soil Resources

—Taking Sanjiang Plain for Example

MA Ji-wei, GUO Xiang-yu, FU Qiang, WANG Kai, MA Xiao-song

(Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** With respect to the unreasonable agriculture water and land structure and difficult to bring into full playing the system effectiveness, taking Jiansanjiang branch 2011 data as an example, the complex adaptive allocation model of regional agricultural water and soil resources can be built by the complex adaptive system idea, and the agriculture water and soil resource optimization allocation can be evolutionarily analyzed. The results show that the agricultural output value and food production are increasing with the increase of groundwater resources, the ecological area reduces in a specific range. The efficient utilization land reduction due to the amount of groundwater mining is restricted, which leads to ineffective use of large land, seriously hindering the coupling of regional water and land resources and local economic development. It is the adaptive performance that the non-linear relationship and the sensitive degree of each subsystem for water amount change. It is of great theory and practice significance to guide scientific and reasonable development and utilization agricultural water and soil resources and improve the use efficiency of agricultural water and soil resources.

**Key words:** Sanjiang Plain; agricultural water and soil resources; complex adaptive system; Jiansanjiang branch

水土资源是农业生产的核心资源<sup>[1-2]</sup>,是人类赖以生存、发展的基本资料,对区域的可持续发展具有重要作用<sup>[3]</sup>。我国是水土资源严重不足的国家,随着人口的不断增加和经济的快速发展,对水土资源利用

收稿日期: 2013-12-16

修回日期: 2014-01-06

资助项目: 国家自然科学基金(51179032, 51279031); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301096); 黑龙江省高校长江学者后备支持计划项目; 黑龙江省普通高校新世纪优秀人才培养计划(1155-NCET-004); 教育部新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 马吉巍(1980—),男,哈尔滨人,讲师,博士生,主要从事农业水土资源管理方面的研究工作。E-mail: 297511232@qq.com

通信作者: 郭翔宇(1965—),男,山东昌邑人,教授,博士生导师,主要从事农业水管理等方面的研究工作。E-mail: guoxiangyu\_neau@163.com

的广度和强度不断增加,各部门、各行业之间争地争水的矛盾日益尖锐,而农业生产活动作为水土资源的消耗大户,其配置合理与否,不仅关系到社会经济的发展,而且影响着生态环境恢复与重建的进程。然而,以往区域资源优化配置研究中,往往是将农业水资源和农业土地资源视为独立系统分别进行研究<sup>[4-11]</sup>,且多偏重于农业水资源系统,缺乏与农业土地资源系统的有效耦合,阻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。为此,有必要将农业水、土资源视为一个统一系统进行整体优化配置,以提高区域农业水土资源利用效率,维持系统的相对平衡,并获得最优的生态经济效益,实现农业水土资源的可持续利用。因此,本文以三江平原农垦建三江分局为例,将农业水、土资源视为一个复杂适应系统,对其进行复杂适应性配置,从而提高区域农业水土资源利用效率,获得更高的粮食生产效益和实现农业水土资源的可持续利用提供重要参考。

## 1 研究区概况

建三江分局位于祖国北部边陲的三江平原腹地,与同江、富锦、抚远、饶河两市两县相邻,系黑龙江、松花江、乌苏里江汇流的河间地带,是我国的主要粮食产区<sup>[12]</sup>。土地面积 1.24 万 km<sup>2</sup>,拥有 15 个大中型农场,耕地 40 万 hm<sup>2</sup>。开发建设以来,全分局累计生产粮食 500 亿 kg,为国家提供优质商品粮 450 亿 kg。目前,全局农业综合机械化率达到 97%,人均年生产粮食 2.5 万 kg,农业人均劳动生产率 58 080 元。虽然建三江分局农业水土资源丰富,但却存在着严重的资源利用问题,其开发利用资源的各种功能都比较滞后。尤其是近年来,随着农业经济的发展,在高强度的农业开发下,建三江分局农业水土资源面临着严峻的考验。由于长期的种植结构单一,而农业灌溉用水 80%来自地下水,导致地下水面临严重压力,加之,耕地“只垦不治”,土壤质量严重退化,导致中低产田比例加大。因此,科学合理的配置建三江分局的农业水土资源,实现农业水土资源的可持续利用对于建三江分局具有重要的意义。

## 2 复杂适应性配置模型构建

### 2.1 主体分类及适应性描述

对于区域农业水土资源系统,涉及多个具有不同目标的利益实体,因此本着协调发展及概化原则,主体分类按照资源用户类型进行。有一个区域级政府主体;两个部门级主体,分别是农业部门主体和生态

部门主体;农业部门中分为:水稻主体、玉米主体、大豆主体、小麦主体、油料主体,生态部门分为:森林主体、草原主体、水域主体。

复杂适应系统中主体的学习能力是接收外部环境的刺激,根据规则强度选取反应规则,再对环境产生作用。通过不断修改规则强度来达到“学习”和“积累经验”的目的。复杂适应系统的适应过程在本质上是一个优化过程,本文采用一定约束和边界条件下的目标优化模式来描述主体的学习能力。每个主体都有自己特定的目标,主体根据输入的边界条件的变化选取不同的行为参数,以达到自身目标最大化,适应环境的改变。也可以说,每个主体适应性的描述都是一个局部优化模型<sup>[13]</sup>。

2.1.1 政府主体 区域级政府是整个区域的调控者,其最终优化目标不是单一的,即:政府主体的适应性表现为一个多目标问题的描述。本模型中提出的政府主体适应性表现为区域综合效益最大,本模型的综合效益就是农业效益目标和生态效益目标,经过多目标分析方法采用效用函数处理后的单一目标,可以用来综合评价系统的状态。而农业效益目标是由粮食产量目标和农业收益目标均衡的结果。具体是将两个无量纲化的效用函数形成政府的综合效益指标:

$$ECOS = \frac{ECO A - ECO A MIN}{ECO A MAX - ECO A MIN} \quad (1)$$

$$Y = \frac{YS - YS MIN}{YS MAX - YS MIN} \quad (2)$$

$$M = \frac{MS - MS MIN}{MS MAX - MS MIN} \quad (3)$$

$$AWEL = f(YS, MS) \quad (4)$$

$$SWEL = f(AWEL, ECOS) \quad (5)$$

式中:ECO A——标准生态面积(hm<sup>2</sup>);ECOS——无量纲化后的标准生态面积;Y——粮食产量(t);YS——无量纲化后的粮食产量;M——农业产值(元);MS——无量纲化后的农业产值;ECO A MAX——最大标准生态面积阈值(hm<sup>2</sup>);ECO A MIN——最小标准生态面积阈值(hm<sup>2</sup>);YS MAX——最大粮食产量(t);YS MIN——最小粮食产量(t);MS MAX——最大粮食产值(元);MS MIN——最小粮食产值(元);AWEL——农业效益;SWEL——综合效益;f——效用函数。

其主要的行为包括:① 水量分配管理:根据可利用水资源量确定水量分配等工作,由政府中的水利及相关部门完成。② 土地分配管理:分配各作物种植面积和不同生态类型的占地面积,由政府土地调度机构完成。③ 粮食管理:确定各粮食作物产量和产值指标,由政府粮食管理部门完成。④ 生态管理:确定

生态环境的发展规划制定发展目标等工作,由政府中的生态管理部门完成。⑤ 社会统计:粮食产量、粮食产值和生态面积实际发生量的统计和汇总工作,由政府中的统计部门完成。

2.1.2 农业生产主体 作为部门级主体,其适应性表现为农业部门的综合效益最大,包括对粮食产量和农业产值的追求,也是一个多目标问题。

粮食产量核算: $Y=y_j \cdot s_j$  (6)  
式中: $Y$ ——粮食总产量(t); $y_j$ ——第  $j$  种作物单位面积产量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $s_j$ ——第  $j$  种作物种植面积 ( $\text{hm}^2$ ), $j=1,\dots,6$  对应农业部门六种作物。

经济收益核算: $M=\sum_{j=1}^6 Y_j \cdot P_j$  (7)  
式中: $M$ ——农业收益(元); $Y_j$ ——第  $j$  种作物产量(t); $P_j$ ——第  $j$  种作物单价(元/t)。

其主要行为包括:① 具体分配农业部门水量。将政府分配给农业部门的水量在各作物中进行分配。② 具体分配农业部门土地。将政府分配给农业部门的土地面积在各作物中进行分配。

2.1.3 生态主体 作为部门级主体,其适应性表现为生态部门效益最大,本文采用标准生态面积来衡量生态部门的效益。采用生态足迹法<sup>[14]</sup>,将不同的生态类型通过“当量因子”转化成标准生态面积。本文将牧草地、林地和水域的均衡因子分别为 0.5,1.1,0.2,分别与实际面积相乘,转化为标准生态面积<sup>[15]</sup>。

标准生态面积: $S_{\text{ECO}}=\sum_{i=1}^3 \text{因子} \cdot a_i$  (8)  
式中: $S_{\text{ECO}}$ ——标准生态面积; $a_i$ ——第  $i$  类生态主体面积, $i=(1,\dots,3)$  对应三种生态类型。

其主要行为包括:① 具体分配生态部门水量。将政府分配给生态部门的水量在各生态类型中进行分配。② 具体分配生态部门土地。将政府分配给生态部门的土地在各生态类型中进行分配。

2.1.4 主体的约束关系 对于政府级主体涉及的约束关系主要是总用水量和总用地面积,具体如下:

$W_A(Y)+W_E(Y)+W_B \leq Q$  (9)  
式中: $W_A(Y)$ ——第  $Y$  年的农业生产用水量; $W_E(Y)$ ——第  $Y$  年的生态用水量; $W_B$ ——灌溉回归

水量; $Q$ ——区域可利用水资源总量(由于本文研究区域主要采用地下水灌溉,此处为地下水可开采量,与地下水开采率有关)。

$\sum_{i=1}^3 a(i,Y)+\sum_{j=1}^4 a(j,Y) \leq S$  (10)  
式中: $a(j,Y)$ ——第  $j$  种作物第  $Y$  年的种植面积; $a(i,Y)$ ——第  $i$  种生态类型第  $Y$  年的面积; $S$ ——区域总土地面积。

对于部门级主体涉及的约束关系主要是具体作物种植面积与水量,具体如下:  
 $a(j,Y) \leq TA(j,Y)$   $CIA(j,Y) \leq IA(Y)$   
 $a(i,Y) \leq ME(i,Y)$  (11)

式中: $TA(j,Y)$ ——第  $j$  种作物第  $Y$  年的允许最大种植面积; $CIA(j,Y)$ ——第  $j$  种作物第  $Y$  年的灌溉面积; $IA(Y)$ ——第  $Y$  年有效灌溉面积; $ME(i,Y)$ ——第  $i$  种生态类型第  $Y$  年允许的最大占地面积。

$\sum_{j=1}^4 W_A(j,Y) \leq W_A(Y)$   $\sum_{i=1}^3 W_E(i,Y) \leq W_E(Y)$  (12)  
式中: $W_A(j,Y)$ ——第  $j$  种作物第  $Y$  年的农业生产用水量; $W_E(i,Y)$ ——第  $i$  类生态类型第  $Y$  年的生态用水量。

## 2.2 模型框架

模型整体上分为三层,上层是区域政府,其行为包括粮食产量、产值和生态面积的控制、水土资源部门间配置及调度。决策目标是区域综合效益最大。中层为部门级主体,具有各自的行为和优化的目标,用特定函数描述它们相互之间的连接,实现层次内部“流”的交互,最底层为用户级主体,通过各自适应性行为达到部门级效益最大,如图 1 所示。

## 3 模型求解

### 3.1 边界条件率定

原始数据来自 2012 年《建三江统计年鉴》及《黑龙江省水利建设统计资料》。黑龙江省农垦总局建三江分局 2011 年农业部门相关数据见表 1,生态部门相关数据见表 2<sup>[16]</sup>,模型约束条件由各年数据按一定百分比计算得到,见表 3。依据如下数据对模型进行初始化,设定相关边界条件和约束。

表 1 农业部门相关数据

项目	水稻	小麦	玉米	豆类	油料
播种面积/万 $\text{hm}^2$	63.42	0.0013	6.96	3.29	0.36
单位面积产量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	9.23	5.31	9.23	2.47	1.03
单位面积产值/(元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ )	21143.57	10616	20209.32	8147.70	8129.10
产量/万 t	585.56	0.007	64.19	8.12	0.37
产值/亿元	134.09	0.0014	14.06	2.68	0.29
灌溉定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	5000	1280	1360	1330	1370

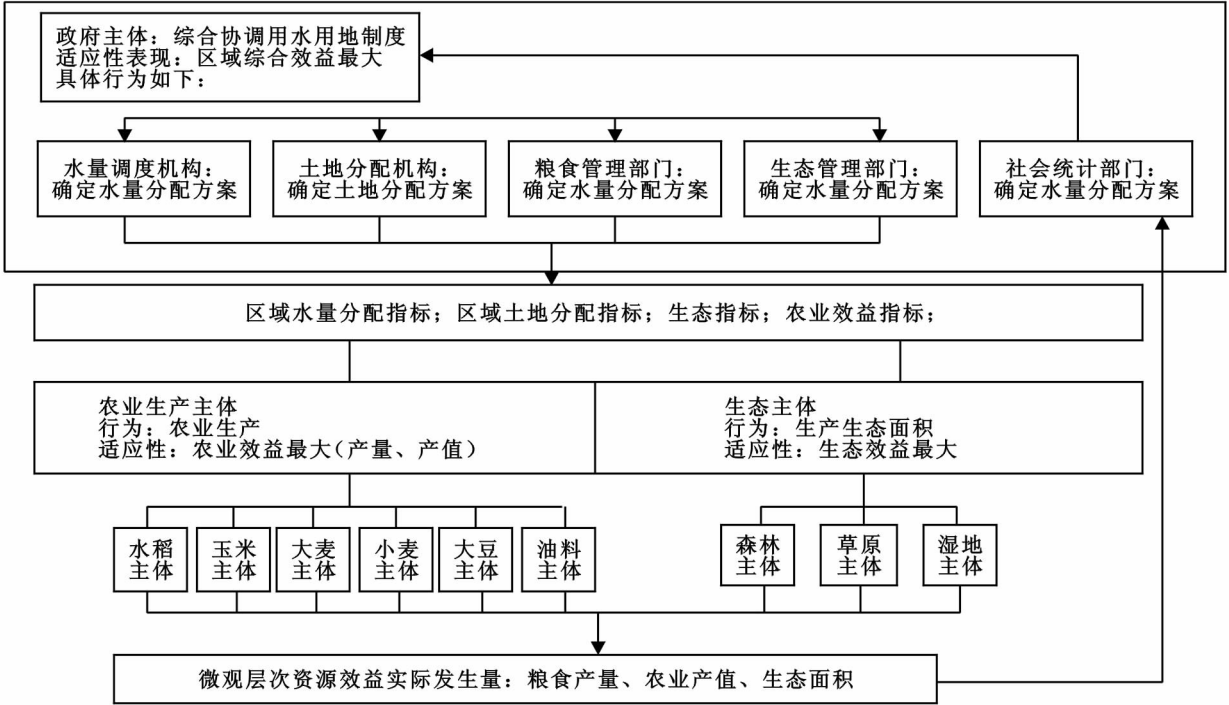


图 1 农业水土资源系统整体模型的框架结构

表 2 生态部门相关数据

项目	林地	牧草地	水域
占地面积/万 hm <sup>2</sup>	13.07	4.67	5.07
灌溉定额/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	150	3000	0
均衡因子	1.1	0.5	0.2

3.2 模型运行

运用基于实数编码的多目标嵌套加速遗传算法对所构建的模型<sup>[17-18]</sup>进行求解，主要包括以下几个部分：

(1) 政府级主体对部门级主体分配初始水量和土地使用面积。部门级主体根据分配到的水量和土地面积对部门内部的生产主体进行资源再次分配，资

源用户使用分配的资源进行生产活动以追求各自目标效用最大化。

(2) 底层的用户级主体将各自的生产实践成果如粮食产量和产值等反馈给上一层的部门级主体，部门级主体进行该部门微观实际发生量统计并根据其内部目标进行资源重新分配，用户级主体进行新一轮生产实践。如此反复，直至达到部门内部目标效用最大。

(3) 部门级主体将部门内部的最优化结果反馈给政府级主体，政府级主体将各部门反馈的信息进行汇总，再根据区域综合效益最大化为目标，对各部门进行资源的重新分配，直至到达区域综合效益最大化。

表 3 边界和约束

约束名称	农作物播种面积阈值	生态占地面积阈值	地下水开采量/亿 m <sup>3</sup>	可垦荒地/万 hm <sup>2</sup>	年降水量/mm
取值	实际面积 50%~150%	实际面积 50%~150%	23.93	7.45	405.9

4 结果与分析

建三江分局 2011 年农业和生态可利用土地面积约 80 万 hm<sup>2</sup>，水资源可利用量为 25.76 亿 m<sup>3</sup>，地下水资源可开采量为 23.93 亿 m<sup>3</sup>，由于该地区主要采用地

下水进行灌溉，即农业用水主要来自地下水，不考虑地表水，同时灌溉回归水量系数根据建三江分局的土壤条件，选择为 0.3，对该地区不同地下水开采方案下的农业水土资源优化配置进行演化分析，方案编号见表 4，具体水量分配方案、种植结构调整方案见表 5—6。

表 4 不同地下水开采量方案

方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
地下水开采量/亿 m <sup>3</sup>	23.80	23.50	23.00	22.47	21.64	21.19	20.94	20.36	19.90	19.47

表 5 水资源配置方案

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
农业/亿 m <sup>3</sup>	23.71	23.67	22.94	22.09	21.26	21.08	20.34	20.27	19.33	19.21
生态/亿 m <sup>3</sup>	0.81	0.77	0.89	0.80	0.78	0.76	0.81	0.81	0.82	0.68

表 6 种植结构调整方案

万 hm<sup>2</sup>

方案	水稻	小麦	玉米	豆类	油料	林地	牧草	水域
1	64.80	0.0013	5.68	3.70	0.30	12.84	5.09	4.36
2	64.50	0.0014	5.78	2.89	0.23	12.61	5.32	4.28
3	63.13	0.0013	5.69	3.87	0.39	11.00	5.30	4.03
4	62.22	0.0013	5.78	3.60	0.28	9.80	4.85	3.52
5	60.61	0.0014	6.06	3.29	0.30	10.80	4.86	3.91
6	59.71	0.0013	6.18	3.88	0.34	10.42	5.44	3.98
7	59.58	0.0012	6.27	3.31	0.26	9.94	5.49	4.06
8	58.28	0.0013	6.24	3.79	0.49	9.55	4.77	3.91
9	56.63	0.0012	6.34	3.69	0.24	7.90	5.40	3.84
10	56.22	0.0013	6.35	3.76	0.37	7.13	4.61	3.54

由表 6 可以可知,随着地下水开采量的减少,耗水较多的水稻种植面积逐年减少,而耗水量相对较少的玉米呈现出增长的趋势,这主要是由于,一方面玉米耗水量相对较少,另一方面 2011 年玉米的价格相对较高导致的。小麦虽然经济效益和玉米存在较大差距,但用水量要小于玉米、且种植面积已经较少,故其种植面积波动较小。其它作物耗水较少,其种植面积也只是在一定范围内变化,整体播种面积降低幅度不大。

以 2011 年实际用水量为基准,其他约束条件不变,对各方案进行模拟演算,得到地下水开采量与农业产值、粮食产量、标准生态面积以及高效利用土地面积间的关系,如图 2—3 所示。

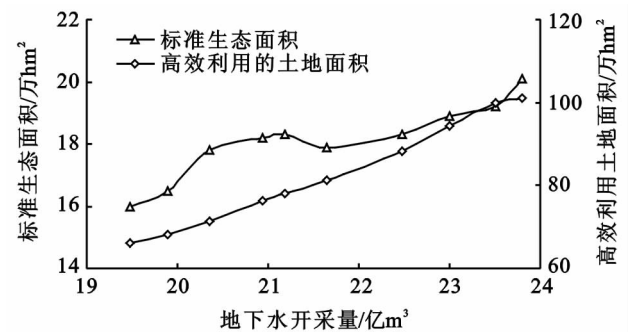


图 2 地下水开采量与粮食产量、农业产值关系

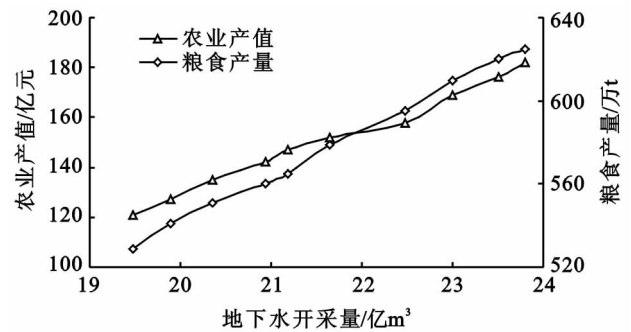


图 3 地下水开采量与标准生态面积、高效利用土地面积关系

由图 2 可知,农业产值和粮食产量随着地下水开采量的增加均呈增加趋势;而由图 3 可知,地下水开采量较少时,生态面积呈增加趋势,达到一定值后开

始减小,随后随着地下水开采量的增加又呈现增加的趋势。如果地下水开采量缩减,高效利用的土地面积迅速减少,会造成大量土地的浪费,严重阻碍了区域水资源与土地资源的耦合与当地经济的发展。上述非线性关系以及各子系统对水量变化敏感程度的不同正是其适应性的表现。

5 结论

(1) 在分析建三江分局农业水土资源特点的基础上,构建了一个区域级政府主体和两个部门级主体的农业水土资源复杂适应性配置模型,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优化配置研究提供理论参考。

(2) 采用基于实数编码的多目标嵌套加速遗传算法对建三江分局农业水土资源复杂适应性配置模型进行演化分析,演化结果准确反映了不同地下水开采方案下建三江分局农业水土资源的变化趋势,表明该模型具有较好的应用和推广价值。

(3) 水资源已经成为制约三江平原经济、社会、生态综合发展的瓶颈因素,必须结合各用水子系统对水量变化的敏感性和适应性,科学合理地配置地表水和地下水资源,才能实现三江平原农业水土资源的高效利用以及经济、社会、生态的协调可持续发展。

参考文献:

[1] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999,10(3):251-259.

[2] 姜秋香,付强,王子龙,等.三江平原水土资源空间匹配格局[J].自然资源学报,2011,26(2):270-277.

[3] 李天霄,付强,彭胜民.基于 DPSIR 模型的水土资源承载力评价[J].东北农业大学学报,2012,43(8):128-134.

[4] 沙金霞,刘彬,谢新民,等.基于粒子群算法的水资源优化配置研究[J].水电能源科学,2012,30(9):33-35,69.

- changes in the Loess Plateau of China[J]. PloS one, 2012, 7(2): e31782.
- [6] 李晓燕, 王宗明, 张树文. 吉林西部农牧互动及其引起的生态系统服务价值变化[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 497-502.
- [7] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [8] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 5-9.
- [9] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. Ecological Economics, 2001, 39(3): 333-346.
- [10] 常守志, 王宗明, 宋开山, 等. 1954—2005年三江平原生态系统服务价值损失评估[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(2): 240-247.
- [11] 闵捷, 高魏, 李晓云, 等. 武汉市土地利用与生态系统服务价值的时空变化分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 170-174.
- [12] 向悟生, 李先琨, 丁涛, 等. 土地利用变化对漓江流域生态服务价影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(12): 46-50.
- [13] 杜国明, 李昀, 于凤荣, 等. 基于遥感的 2000—2009 年三江平原北部耕地变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 225-229.
- [14] 郑北鹰. 保护湿地刻不容缓[N]. 光明日报, 2006-04-17(6).
- [15] 杜国明, 杜蕾, 杨厚祥, 等. 三江平原北部近 55 年来土地垦殖的时空格局研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 156-159.
- [16] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土地利用与生态系统服务价值的时空变化研究: 以渭干河—库车河三角洲绿洲为例[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 933-941.
- [17] 苏朝阳, 苗长虹开封市土地利用时空变化的生态系统服务价值评估[J]. 水土保持研究, 2008, 15(10): 116-119.
- [18] 李志勇, 徐颂军, 徐红宇, 等. 湛江湾生态系统服务功能与价值评估[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 567-571.
- [19] 顾康康, 刘景双, 郭春永, 等. 鞍山市生态系统服务价值时空变化研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(1): 12-15.
- [20] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲, 等. 基于 RS 和 GIS 的矿区土地利用变化对生态服务价值损益影响研究: 以徐州市九里矿区为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(10): 124-128.
- [21] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [22] 冉圣宏, 吕昌河, 贾克敬, 等. 基于生态服务价值的全国土地利用变化环境影响评价[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 2139-2144.
- [23] 师庆三, 王智, 吴友均, 等. 新疆生态系统服务价值测算与 NPP 的相关性分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(3): 427-432.
- [24] 王宗明, 国志兴, 宋开山. 2000—2005 年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 136-146.

(上接第 260 页)

- [5] 卢晓杰, 张克斌, 李瑞. 柴达木盆地香日德绿洲水资源优化配置研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 232-236.
- [6] 董品杰, 赖红松. 基于多目标遗传算法的土地利用空间结构优化配置[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(6): 52-55.
- [7] 付强. 农业水土资源系统分析与综合评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [8] 胡振琪, 赵淑芹. 中国东部丘陵矿区复垦土地利用结构优化研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 78-81.
- [9] Evers A J M, Elliott R L, Stevens E W. Integrated decision making for reservoir, irrigation, and crop management[J]. Agricultural Systems, 1998, 58(4): 529-554.
- [10] Sepaskhah A R, Azizian A, Tavakoli A R. Optimal applied water and nitrogen for winter wheat under variable seasonal rainfall and planning scenarios for consequent crops in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1): 113-122.
- [11] Sethi L N, Panda S N, Nayak M K. Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa, India [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(3): 209-220.
- [12] 赵菲菲, 刘东, 于苗, 等. 建三江分局用水结构演变及其驱动机制研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 244-247.
- [13] 李丽红, 李鲁华, 马松梅, 等. 基于灰色线性规划土地资源优化配置研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2007, 25(4): 440-444.
- [14] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 267-274.
- [15] 赵建世. 基于复杂适应理论的水资源优化配置整体模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [16] DB23/T727-2010, 黑龙江省地方用水定额[S].
- [17] 付强, 王凯, 任守德. 基于复杂系统演化优化的实码多目标嵌套加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(12): 2718-2723.
- [18] 王凯. 基于复杂适应系统理论的农业水土资源优化配置研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.