

陕北延河流域基于 GLP 模型的流域水土资源综合配置

王丽霞¹, 任志远², 任朝霞¹, 马超群¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘要: 该文基于延河流域近 50 a 的水、土、气等因素的动态资料, 在测评流域生态环境需水和社会经济用水的基础上, 运用灰色线性规划 (GLP) 方法, 构建水资源—土地资源耦合系统模型, 探讨多目标情景下“面向生态的”水土资源综合配置方案。结果表明, 随着供水能力的提高, 流域林果产业前景广阔, 城市化进程将不断加快。2020—2030 年, 预计流域在低配方案下有林地、灌丛林、园地的面积将分别由 1 201.51、412.87 km² 调整为 1 434.67 和 589.24 km², 建设用地面积将由 346.73 km² 调整为 575.38 km²。

关键词: 模型, 土壤, 试验, 延河流域, GLP 模型, 面向生态, 水土资源综合配置

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.009

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0048-06

王丽霞, 任志远, 任朝霞, 等. 陕北延河流域基于 GLP 模型的流域水土资源综合配置[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 48—53.

Wang Lixia, Ren Zhiyuan, Ren Zhaoxia, et al. Integrated allocation of water and land resources based on GLP model in Yanhe watershed [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 48—53. (in Chinese with English abstract)

0 引言

水土资源是人类生产、生活的基本资料。进入 20 世纪, 人类对水土资源的利用广度和深度在不断加强, 从而导致全球性的资源短缺和生态破坏, 很大程度上削弱了自然环境的承载能力。因此, 优化配置水土资源, 提高其综合利用率已经成为区域发展中亟待解决的重大课题之一^[1]。

目前, 一些学者已经从区域或流域生态系统的角度, 对水、土资源的合理配置和调控模式进行了探索。中国“九五”攻关项目“西北地区水资源合理配置和承载力研究”首次提出了面向生态经济建设的西北水资源合理配置模式^[2]。许新宜和王浩等提出了基于宏观经济的水资源合理配置理论与方法^[3]。王劲峰和刘昌明等针对中国水资源供需平衡在空间上的差异性, 提出了水资源在时间、部门和空间上的三维优化分配理论模型体系^[4]。冯耀龙等系统分析了面向可持续发展的区域水土资源优化配置的内涵与原则, 建立了优化配置模型, 提出了实用可行的求解方法^[5]。刘建林等建立了南水北调东线工程联合调水仿真模型, 提出了调度模型的计算过程以及调算的水文系列和计算时段^[6]。孙自永等以水资源与生态环境的耦合研究为基础, 提出了中国西北地区内陆河流域面向生态环境的水资源开发模式^[7]。左其亭等提出了面向可持续发展的水资源管理量化模型, 包括水量—水质—生态耦合系统模型和社会经济系统模型, 并对博斯腾湖进行了可

持续水资源管理应用研究^[8]。

然而, 由于不同区域间的复杂性和特殊性以及研究方法的多样性, 目前仍存在一些问题, 例如, 对水资源和土地资源作为专题研究的较多, 而对水土资源耦合系统进行综合性研究的较少^[9]; 对以追求经济效益最大化为目标确定水土资源利用方向研究的较多, 而对基于生态环境需水测评的“面向生态的”综合配置研究的较少等。

鉴于此, 本文基于延河流域近 50 年的水、土、气等因素的动态资料, 以 RS 和 GIS 空间分析为技术支持, 分别采用水文模型法和 BP 神经网络模型法测评流域生态环境需水量和社会经济用水量; 在此基础上, 运用灰色线性规划 (GLP) 方法, 构建水资源—土地资源耦合系统模型, 提出“面向生态的”水土资源多目标情景综合配置方案。

1 书研究区概况

延河发源于靖边县天赐湾乡周山, 由西北向东南流经志丹、安塞、宝塔、延长四县、区, 最终汇入黄河, 全长 286.9 km, 流域面积 7 680 km², 属于黄河一级支流 (图 1)。延河流域 (36°27'~37°58'N, 108°41'~110°29'E) 是黄河中游水土流失最严重的区域之一 (2005 年水土流失面积占流域总面积的 78.9%), 其地势西北高而东南低, 平均海拔高度 950 m, 年均降水量 500 mm, 年均水面蒸发量 1 000 mm, 年均气温 9.2℃。以安塞县的化子坪和宝塔区的甘谷驿为界, 可以将流域划分成上、中、下游河区。上游为梁峁丘陵沟壑区, 地形陡峭, 河谷狭窄, 植被稀少, 侵蚀剧烈; 中游为峁状丘陵沟壑区, 河谷明显展宽, 阶地发育; 下游多为破碎塬区, 冲沟发育。流域多年平均径流总量为 2.89 亿 m³, 径流年内分配很不均匀, 年际变化大, 夏季径流量占全年径流总量的 50% 以上。

收稿日期: 2010-12-02 修订日期: 2011-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41001374); 长安大学中央高校科研事业费资助项目 (CHD2010JC111); 高等学校学科创新引智计划项目 (B08039)
作者简介: 王丽霞 (1979—), 女, 山西大同人, 博士后, 主要从事水资源评价与 GIS 研究。Email: wlx333@sina.com.cn

多年平均输沙量为 0.82 亿 t，相应侵蚀模数为 1.12 万 t/km²。许多地区，由于赋存于天然水体中的水量达不到生态环境的需水标准，已引发了诸如植被退化、土地沙化、水土流失、河流季节化、河道萎缩、水质下降等一系列生态环境问题。因此，合理配置流域有限的水资源，对于实现区域水土资源的可持续利用，确保水土资源系统的生态安全具有重要意义。

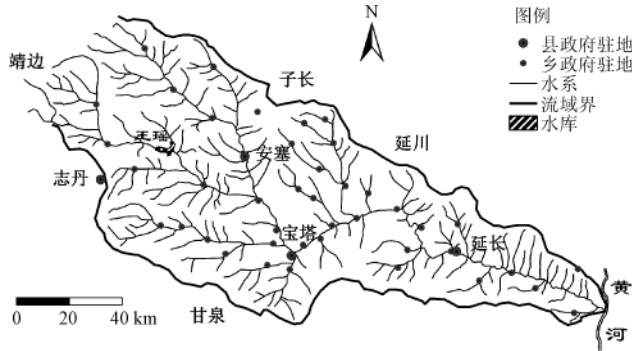


图 1 延河流域行政区划图
Fig.1 Administrative map of Yanhe watershed

2 数据来源及处理

2.1 数据资料来源

研究中选用的影像资料包括 2005 年 Landsat ETM+, 和延河流域 1:5 万 DEM 数据。专题数据包括 2000 年延河流域 1:10 万土地利用图、1989 年 1:10 万水系河谱分布图和 1996 年陕西省 1:50 万土壤类型图等。气象数据包括志丹、安塞、宝塔、延长等气象站点连续 30 a(1975—2004)的气象资料(台站经纬度、海拔高度、月平均降水量、月平均气温、月平均水汽压、月平均风速等)。水文数据包括枣园、甘谷驿、延安等水文站点近 50 a(1953—2000)的水文资料(径流量、输沙量、淤积量等)。社会经济数据包括延河流域 20 多年(1980—2005)的人口、GDP、居民生活用水、工业生产用水和农业生产用水等数据。以及相关的文献资料包括《延安统计年鉴》；历年《延安市水资源公报》；《延安市农田水利年报》；《延安地区实用水文手册》；《全国节水灌溉“十一五”计划及 2010 年发展规划》等。

2.2 数据资料处理

2.2.1 影像资料预处理

在 ArcView3.3 平台下，以 1:5 万 DEM 作为主要输入数据，运用 Hydrologic Functions 功能生成集水流域和水流网络数据，并对栅格 DEM 进行填洼处理，计算水流方向(Flow Direction)和流水累积量(Flow Accumulation)，生成 Watershed 数据(图 2)。

在 Erdas8.7 平台下，采用监督分类和非监督分类相结合的方法，对流域 2005 年的 ETM+遥感影像进行解译。根据研究需要，将用地类型划分为耕地、园地、有林地、灌丛林、牧草地、水域、建设用地和未利用地(图 3)。

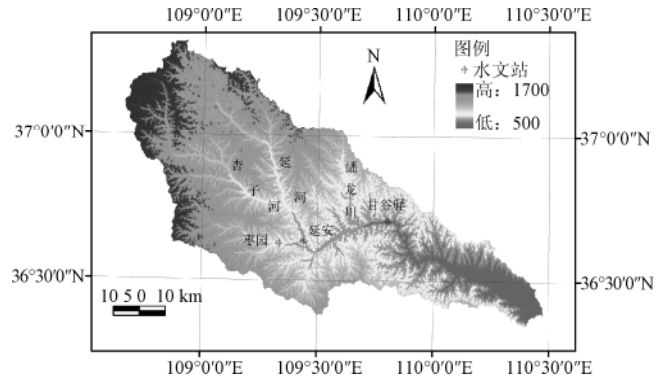


图 2 填洼 DEM 数据生成延河流域分布图
Fig.2 Sketch map of Yanhe watershed by filling sinks of DEM

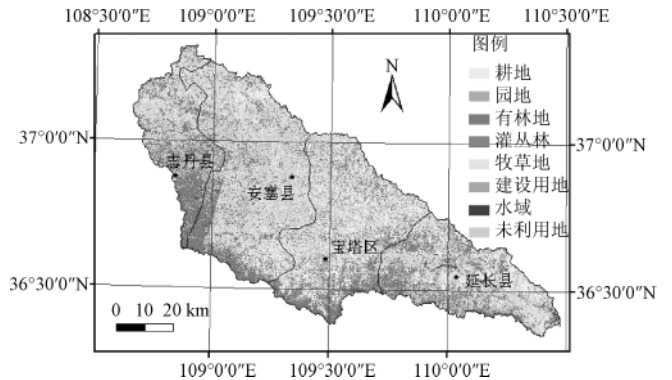


图 3 延河流域土地利用类型分布图
Fig.3 Spatial distribution of landuse types in Yanhe watershed

2.2.2 其他资料处理

水文和气象数据主要用于测算流域生态环境需水。根据流域生态环境需水分类体系^[10]，运用经验模型和水文模型法^[11-19]，计算了延河流域旱地系统(包括耕地、园地、有林地、灌丛林、牧草地等)的生态环境需水，测评项目包括植被需水和土壤需水，以及湿地系统(主要是河流系统)的生态环境需水，测评项目包括基本生态需水、输沙需水、自净需水、蒸散消耗需水和渗漏消耗需水等。

社会经济数据主要用于测算流域社会经济用水。运用 BP 神经网络模型法，以预测目标即居民生活、工业生产和农业生产用水为神经元的输出层，以城镇人口数、农村人口数、人均生活用水量、工业生产总产值、农田有效灌溉面积以及牲畜量等作为神经元的输入层，预测了延河流域 2020 年和 2030 年的社会经济用水。

3 水土资源优化配置

水土资源系统中有很多不确定因素，是一类典型的灰色系统，因此，灰色线性规划模型可以有效解决水土资源的综合配置问题。本文基于 GLP 方法构建水资源—土地资源耦合模型，基于多目标决策技术来构建生态—经济系统耦合模型，采用线性加权法，将多目标函数直接构造为新的单目标规划问题，模型表达为：

$$\max h(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x) + \sum_{j=1}^m \omega_j f_j(x) \quad (1)$$

式中, ω_i 和 ω_j 分别表示目标函数 $f_i(x)$ 和目标函数 $f_j(x)$ 在整个系统中的权重, 并且满足 $0 \leq \omega_{ij} \leq 1$, $\sum_i \omega_i + \sum_j \omega_j = 1$,

其取值可根据各目标的重要程度进行确定。由于本文是遵循生态和经济的协调可持续发展原则, 因此将生态保护目标 and 经济发展目标的权重均取值为 0.5。具体的配置过程主要包括目标函数和决策变量的确定以及约束条件的制定。

3.1 目标函数

以实现流域水土资源系统生态服务价值和经济效益之和最大化为目标, 构建函数, 模型表达为:

$$F(x) = 0.5 \sum_{i=1}^8 m_i X_i + 0.5 \sum_{i=1}^8 n_i X_i \quad (2)$$

式中, $F(x)$ 代表水土资源综合配置目标, m_i 和 n_i 分别为各类土地资源单位面积的生态服务价值和经济效益 (表 1), 其中 m_i 主要参考中国陆地生态系统生态资产^[20], n_i 来源于延河流域世行贷款一期项目监测报告。

表 1 延河流域土地资源生态价值与经济效益

Table 1 Ecosystem service value and economic income of land resources in Yanhe watershed

生态经济价值	耕地	园地	有林地	灌丛林	牧草地	建设用地	水域	未利用地
单位面积土地资源生态服务价值/ [万元/(akm ²)]	1.08	1.76	2.37	1.73	1.39	0.55	0.72	0.04
单位面积土地资源经济收益/ [万元/(akm ²)]	27.09	48.89	43.31	24.05	33.68	250.72	1.79	0.68

3.2 决策变量

根据遥感影像的地面分辨率, 结合流域土地资源特点及研究需要, 设置耕地、园地、有林地、灌丛林、牧草地、建设用地、水域及未利用地作为决策变量, 分别用 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ 表示。

3.3 约束条件

根据延河流域水土资源利用现状及存在的问题, 按照“面向生态的”原则, 以满足土地系统生态环境需水为前提, 综合考虑水土资源的发展目标, 构建约束方程。模型表达为:

(1) 土地资源数量约束

$$\otimes(a_1) \cdot g_1 \cdot X_1 \geq b_1 \quad (3)$$

式中, g_1 为规划年的粮食单产, b_1 为规划年的粮食总产, 可以用 GM (1,1) 模型预测得到。

$$\otimes(a_2) \cdot X_1 \leq b_2 \quad (4)$$

式中, b_2 为土地利用现状中坡度 $\leq 25^\circ$ 的耕地面积。根据《水土保持法》的相关规定, 坡度 $> 25^\circ$ 的耕地, 应退耕还林 (草)。运用 DEM 数据生成坡度图, 与土地利用现状图进行叠加生成耕地坡度图, 可以统计出 $\leq 25^\circ$ 的耕地面

积。

$$\otimes(a_3) \cdot X_2 \geq b_3 \quad (5)$$

式中, b_3 为流域园地限制面积。目前安塞县的仁用杏、宝塔区的苹果和延长县的酥梨等产业已形成一定规模, 可以适当发展其面积。

$$\otimes(a_4) \cdot X_3 \leq b_4 \quad (6)$$

式中, b_4 为流域水土流失治理目标下有林地的规划发展面积。在干旱半干旱地区, 有林地蒸腾作用会加剧缺水程度, 有必要限制其面积。

$$\otimes(a_5) \cdot X_4 \geq b_5 \quad (7)$$

式中, b_5 为流域灌丛林限制面积。灌丛林具有明显的改良土壤和涵养水源的生态功能, 有必要发展其面积。

$$\otimes(a_6) \cdot X_5 \geq b_6 \quad (8)$$

式中, b_6 为流域牧草地限制面积。牧草地具有防风抗旱等生态功能, 可以适当发展其面积。

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = b_7 \quad (9)$$

式中, b_7 为流域总面积。各项用地类型的面积之和应等于流域总面积。

(2) 水资源数量约束

$$\otimes(a_7) \cdot g_2 \cdot X_1 \leq b_8 \quad (10)$$

式中, g_2 为耕地单位面积生态环境需水, b_8 为规划年的耕地生态环境供水量。

$$\otimes(a_8) \cdot g_3 \cdot X_2 \leq b_9 \quad (11)$$

式中, g_3 为园地单位面积生态环境需水, b_9 为规划年的园地生态环境供水量。

$$\otimes(a_9) \cdot g_4 \cdot X_3 \leq b_{10} \quad (12)$$

式中, g_4 为有林地单位面积生态环境需水, b_{10} 为规划年的有林地生态环境供水量。

$$\otimes(a_{10}) \cdot g_5 \cdot X_4 \leq b_{11} \quad (13)$$

式中, g_5 为灌丛林单位面积生态环境需水, b_{11} 为规划年的灌丛林生态环境供水量。

$$\otimes(a_{11}) \cdot g_6 \cdot X_5 \leq b_{12} \quad (14)$$

式中, g_6 为牧草地单位面积生态环境需水, b_{12} 为规划年的牧草地生态环境供水量。

$$\otimes(a_{12}) \cdot g_7 \cdot X_6 \leq b_{13} \quad (15)$$

式中, g_7 为河流单位面积生态环境需水, b_{13} 为规划年的河流生态环境供水量。

$$b_8 + b_9 + b_{10} + b_{11} + b_{12} + b_{13} \leq b_{15} - b_{14} \quad (16)$$

式中, b_{15} 为流域的供水总量, b_{14} 为流域社会经济用水量, $b_{15} - b_{14}$ 为流域生态环境供水量。分别用流域丰水年、平水年和枯水年的流域供水总量, 减去丰水年、平水年和枯水年的社会经济用水量, 求得生态环境供水量的上、下限值。土地资源的生态环境需水包括最小、适宜及饱和三种阈值模式, 其值不应超过生态环境供水量。

基于 GLP 总量控制模型, 本文提出了多目标情景下的水土资源综合配置方案。首先在考虑水利工程配套措施完成时流域预计的供水能力, 设置 2020 年和 2030 年规划时间目标。根据流域 25%、50% 和 75% 保证率下的降水总量, 设置丰水年、平水年和枯水年情景目标。根

据满足土地资源系统的最小、适宜及饱和生态环境需水的三种阈值模式，设置低配、中配和高配目标。这样就可以得到 18 种配置方案，线性规划求解后得到的可行解有 9 个。分别对应于 2020 年 25%、50% 和 75% 保证率下的低配方案，2030 年 25%、50% 和 75% 保证率下的低配、中配方案。配置中的约束条件主要参考了历年《延安统计年鉴》，历年《延安市水资源公报》，以及水利部《全国节水灌溉“十五”计划及 2010 年发展规划》等。

4 综合配置结果与分析

限于文章的篇幅，本文重点讨论平水年即 50% 保证率下，流域在 2020 年和 2030 年的低配方案等可行解。

根据计算，延河流域 2020 年、2030 年 50% 保证率下供水总量的上限值分别为 39.12 和 39.36 亿 m^3 。按照水量平衡方程计算出生态环境供水量的上限值分别为 36.18 和 36.41 亿 m^3 。低配方案下，土地资源系统的生态环境用水量分别为 27.26 和 27.33 亿 m^3 ，并未达到生态环境供水量的极限，这表明流域水资源满足了土地资源系统的

最小生态环境需水，即维持了系统最基本的水循环平衡。但对于 2020 年的中配和高配方案，以及 2030 年的高配方案，流域土地资源系统的生态环境用水量均超过了生态环境供水量的上限值，说明 2020 年时，流域水资源无法满足土地资源系统的适宜及饱和生态环境需水，到 2030 年时，流域水资源可以满足土地资源系统的最小以及适宜生态环境需水，但仍无法满足饱和生态环境需水。

综合配置结果（表 2）表明：①随着流域水利设施的不断完善，水源供水能力将显著提高。2010—2030 年，预计流域 50% 保证率下的供水总量的上限值将由 38.84 亿 m^3 增加为 39.36 亿 m^3 。②林果业的发展前景广阔。2010—2030 年，预计流域在低配方案下有林地、灌丛林、园地的面积将分别由 1 264.49、1 201.51 和 412.87 km^2 调整为 1 504.32、1 434.67 和 589.24 km^2 。③城市化进程不断加快。2010—2030 年，预计流域建设用地面积将由 346.73 km^2 调整为 575.38 km^2 ，年均增长率达到 3.61%。

表 2 延河流域未来规划年 50% 保证率下满足不同生态环境需水等级的水土地资源配置方案
Table 2 Land and water resources allocation modes under different ecological water requirement grades at 50% assurance factor in Yanhe watershed in the future

配置方案	耕地/ km^2	园地/ km^2	有林地/ km^2	灌丛林/ km^2	牧草地/ km^2	建设用地/ km^2	水域/ km^2	未利用地/ km^2	生态环境 用水量/ 亿 m^3	生态系统 服务价值/ 亿元	土地系统 经济收益/ 亿元	
2020 年	低配	1312.53	489.56	1365.06	1296.31	2561.57	436.35	63.95	154.67	27.26	1.20	37.49
2030 年	低配	1097.56	589.24	1504.32	1434.67	2314.61	575.38	63.95	100.27	27.33	1.23	42.54
	中配	1097.56	589.24	1595.6	1464.37	2193.63	575.38	63.95	100.27	36.41	1.27	46.93

5 结论与讨论

5.1 讨论

文章主要突出了以下几个观点：

1) 实践基于水资源—土地资源耦合系统的综合配置研究

水资源与土地资源是相互影响、相互制约的两个基本要素，水土资源的协调开发与利用是实现可持续发展的关键。本文利用 GLP 模型的总量控制法，以水资源作为约束条件，限制和协调土地资源的数量和发展方向，从而实现流域水土资源的综合高效利用。

2) 提出“面向生态的”水土资源综合配置研究思路

“面向生态的”水土资源综合配置研究，要突出生态先行的原则。本文通过运用 GLP 模型，以约束条件的方式，体现出水资源的分配过程中需要以满足生态环境需水为前提；以构建目标函数的方式，体现出配置的结果要以实现流域生态、经济的协调发展为最终的目标。研究思路和方法，充分体现出“面向生态的”基本原则。由于研究涉及的数据和内容比较多，因此存在一些有待完善之处。例如，在水土资源配置的过程中，由于规划前景不同，约束条件的参数制定也有所不同。本文仅仅是根据 GM(1,1) 模型或是规划目标确定相应的参数，而在实际中，参数的变化要受到很多因素的影响，因此如何利用数学模型预测参数的合理值，还需要大量细致

的工作。此外，如何通过地理信息系统软件，实现水土资源的数量配比与空间分布的有机结合也是有待深入研究的难点问题。

5.2 结论

文章基于延河流域近 50 年的水、土、气等因素的动态资料，在测评流域生态环境需水和社会经济用水的基础上，运用灰色线性规划（GLP）模型，探讨了以满足土地系统生态环境需水为前提，以实现土地系统生态服务价值与经济收益之和最大化为目标的“面向生态的”水土资源综合配置方案的多样性和或然性。

结果表明，预计 2020 年时，流域水资源仅可以满足土地资源系统的最小生态环境需水，2030 年时，流域水资源可以满足土地资源系统的最小和适宜生态环境需水，但仍无法满足饱和和生态环境需水。随着供水能力的提高，流域林果产业前景广阔，城市化进程将不断加快。2010—2030 年，预计流域在低配方案下有林地、灌丛林、园地的面积将分别由 1 264.49、1 201.51 和 412.87 km^2 调整为 1 504.32、1 434.67 和 589.24 km^2 ，建设用地面积将由 346.73 km^2 调整为 575.38 km^2 。

[参 考 文 献]

- [1] 姚华荣, 郑度, 吴绍洪. 首都圈防沙治沙典型区水土资源优化配置——以河北省怀来县为例[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 531—542.

- Yao Huarong, Zheng Du, Wu Shaohong. Optimum allocation of land and water in the typical sand regions around Beijing: a case study in Huailai County[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(5): 531—542. (in Chinese with English abstract)
- [2] 中国水利水电科学研究院. 面向生态经济建设的西北水资源合理配置模式[J]. *中国水利*, 2000, (4): 17—19. China water resources and hydropower research. Northwest water resources allocation model for ecological and economic development[J]. *China Water Power*, 2000, (4): 17—19. (in Chinese with English abstract)
- [3] 许新宜, 王浩, 甘泓. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [4] 王劲峰, 刘昌明, 于静洁, 等. 区际调水时空优化配置理论模型探讨[J]. *水利学报*, 2001, (4): 7—14. Wang Jinfeng, Liu Changming, Yu Jingjie, et al. Theoretical models for space and temporal distribution of water resources[J]. *Acta of Water Power*, 2001, (4): 7—14. (in Chinese with English abstract)
- [5] 冯耀龙, 韩文秀. 面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2003, (2): 133—138. Feng Yaolong, Han Wenxiu. Study on the sustainable development oriented optimal allocation to region water resources[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2003, (2): 133—138. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘建林, 马斌. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 75—79. Liu Jianlin, Ma Bin. Simulation model of multi-reservoir and multi-consumer and multi-work for water unite regulation of cross-drainage basin-for example of the east route of the south-to-north water transfer project[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙自永, 马瑞, 周爱国. 中国西北地区内陆河流域面向生态环境的水资源开发模式研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(1): 28—31. Sun Ziyong, Ma Rui, Zhou Aiguo et al. Study on water resources exploitation pattern orientated ecological environment in inland river basin, NW China[J]. *Journal of Arid land Resources and Environment*, 2003, 17(1): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [8] 左其亨, 陈嘻. 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 耿艳辉, 闵庆文, 成升魁. 流域水土资源优化配置的几种方法比较[J]. *资源科学*, 2007, 29(2): 188—193. Geng Yanhui, Min Qingwen, Cheng Shengkui. Discussion on optimum allocation methods of water and land resources at the watershed scale[J]. *Resource Science*, 2007, 29(2): 188—193. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨志峰, 刘静玲, 孙淘, 等. 流域生态环境需水规律[M]. 科学出版社, 2006.
- [11] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 496—500. Li Lijuan, Zheng Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 496—500. (in Chinese with English abstract)
- [12] 唐克旺, 王浩, 刘畅. 陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 304—309. Tang Kewang, Wang Hao, Liu Chang. Preliminary study of Hongjiannao Lake's variation and ecological water demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(3): 304—309. (in Chinese with English abstract)
- [13] 何永涛, 李文华, 李贵才, 等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(3): 35—39. He Yongtao, Li Wenhua, Li Guicai et al. Ecological water requirement of forests in Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [14] Sagehashi M. A predictive model of long-term stability after biomanipulation of shallow lakes. *Water Research*, 2000, 34(16): 4014—4028.
- [15] Ross M S, Reed D L, Sah J P et al. Vegetation: environment relationships and water management in Shark Slough, Everglades National Park. *Wetlands Ecology and Management*, 2003(11): 291—303.
- [16] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需分析: 生态水利研究[J]. *中国水利*, 1999, (10): 18—20. Liu Changming. Analysis of water resources supply and requirements in the 21st century of China: study of ecological water resources[J]. *China Water Resource*, 1999, (10): 18—20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈锐, 邓祥征, 战金艳, 等. 流域尺度生态需水的估算模型与应用——以克里雅河流域为例[J]. *地理研究*, 2005, 24(5): 725—731. Chen Rui, Deng Xiangzheng, Zhan Jinyan et al. Estimation model and application of the amount of eco-water demand: a case study on Keriya river basin[J]. *Geographical research*, 2005, 24(5): 725—731. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋进喜, 李怀恩. 渭河生态环境需水量研究[M]. 中国水利水电出版社, 2004.
- [19] 李青山, 周林飞, 王教河, 等. 霍林河流域生态环境需水量研究[J]. *水文*, 2006, 26(4): 27—31. Li Qingshan, Zhou Linfei, Wang Jiaohe et al. Study on eco-Environmental water demand in Huolin river basin[J]. *Journal of China hydrology*, 2006, 26(4): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱文泉, 张锦水, 潘耀忠, 等. 中国陆地生态系统生态资产测量及其动态变化分析[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 586—594. Zhu Wenquan, Zhang Jinshui, Pan Yaozhong et al. Measurement and dynamic analysis of ecological capital of terrestrial ecosystem in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 586—594. (in Chinese with English abstract)

Integrated allocation of water and land resources based on GLP model in Yanhe watershed

Wang Lixia¹, Ren Zhiyuan², Ren Zhaoxia¹, Ma Chaoqun¹

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Many researches on optimal allocation of water or land resource have been done at present, but few attention was paid to the combination of these two factors based on ecosystem. In this research, based on continuous 30-year weather condition report data, 10-year soil water content data and nearly 50-year hydrographic data in Yanhe watershed, and with remote sensing and GIS spatial analysis, the minimum, moderate and maximum ecological water requirement for land resource system were investigated. Additionally, with GLP (Gray Linear Programming) model, the allocation modes of water and land resources were put forward based on ecosystem which aimed at satisfying the ecological water requirement for land resource system and maximizing the ecosystem service value. The purpose of all above efforts was to offer a method for using water and land resources in effect, protecting ecosystem as well as developing social economy. By using GLP model, the constraints equations were established for satisfying ecological water requirement and the objective functions for realizing the coordinate and sustainable development in ecology and economic. The results showed that with the increase of water resources supply, the fruit industry was developing well, and the urbanization process was accelerating. It can be expected that from 2010 to 2030, the forests, shrubs and garden land will increase from 1 264.49, 1 201.51, 412.87 km² to 1 504.32, 1 434.67, 589.24 km², and the construction land will increase from 346.73 to 575.38 km², when satisfying the minimal ecological water requirement.

Key words: models soils experiment yanhe watershed, gray linear programming model, ecology-oriented, water-land resource integrated allocation