

# 基于水文响应单元的高标准农田水资源供需分析

——以黄骅市为例

程彦培<sup>1</sup>, 易 卿<sup>1</sup>, 张健康<sup>1</sup>, 李金鹿<sup>2</sup>, 张发旺<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 河北省国土资源利用规划院, 石家庄 050051; 3. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 高标准农田建设是提高农作物单产, 改善农用地质量, 提高农业生产十分必要的工作。河北省黄骅市地势平坦, 耕地广布, 土地利用潜力巨大, 是高标准农田建设的重点地区, 也是严重的缺水地区。开展基于高标准农田建设的水资源供需分析和评价, 探索新的土地整理技术措施, 可以科学合理利用水资源, 提高农用地利用效率。运用基于水文响应单元的水资源模型方法对研究区水资源供需量进行计算, 通过 ARCGIS 软件平台进行空间分析, 最终形成基于高标准农田建设的水资源供需分析评价。结果显示, 距离海岸较近的黄骅市东部水土资源属于极度充沛区和充沛区, 处于黄骅市南部以及西北部部分地区为平衡区, 而处于西部和中部的部分地区为缺水区和极度缺水地区。

**关键词:** 高标准农田; 水资源; 水文响应单元; 供水量; 需水量

**中图分类号:** S273   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0029-05

## Analysis of Water Resource Supply and Demand in High Standard Farmland Based on Hydrological Response Unit: A Case Study in Huanghua City

CHENG Yan pei<sup>1</sup>, YI Qing<sup>1</sup>, ZHANG Jian kang<sup>1</sup>, LI Jin lu<sup>2</sup>, ZHANG Fa wang<sup>3</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Land Use Planning Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China; 3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The construction of high standard farmland is very necessary to improve the farmland quality, increase crop yields, and raise agricultural productivity. Huanghua City of Hebei Province is situated in the Heilonggang River basin, which is a serious water shortage area, but it has flat topography and widely distributed farmland. The potential of land utilization is great so that Huanghua city is a key area for the construction of high standard farmland. The analysis and assessment of water resources supply and demand based on the construction of high standard farmland and the investigation of technical measures for land consolidation can ensure the reasonable utilization of water resources and increase the land utilization efficiency. In this paper, the quantities of water resources supply and demand were calculated using the water resources model based on the hydrological response unit and the spatial analysis using the ARCGIS, which provided the analysis and assessment results of water resources supply and demand for the construction of high standard farmland. The results showed that water and land resources are extremely abundant in the eastern part of the city near the coast, balanced in the southern and northwestern parts of city, and short or extremely short in the western and central parts of the city.

**Key words:** high standard farmland; water resources; hydrological response unit; water supply; water demand

农用地是农作物正常生长所需物质的供应者和调节者, 位置不同, 土地生产潜力有着较大差异<sup>[1]</sup>。因此, 根据生产土地质量的高低, 直接影响着农作物的产量。由于自然地理 潜力的大小和资源禀赋特征, 开展基于高标准农田建设的水

收稿日期: 2012-12-20   修回日期: 2013-01-06   网络出版时间: 2013-01-24  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1128.011.html>  
基金项目: 国土资源部公益性行业专项(200811072)  
作者简介: 程彦培(1965-), 男, 河南新乡人, 研究员, 主要从事地下水资源与地质环境研究。E-mail: yanpeicheng@tom.com

资源供需分析及评价,可以科学利用水资源,以此改善农用地质量,提高农用地利用效率,提高土地生产力<sup>[2]</sup>。

河北省黄骅市处于黑龙港流域,是严重的缺水地区,但地势平坦,耕地广布,属于水土耦合矛盾的典型地区,中低产田改造任务艰巨,土地利用潜力巨大,是耕地整理和高标准农田建设的重点地区<sup>[3-5]</sup>。随着经济发展,该地区对水土资源的需求越来越大,但是水资源约束成为经济发展的瓶颈因素。虽然有相关的土地整理规划,但缺乏可靠的水土资源依据,没有统一的标准,使得耕地整理和高标准农田建设在布局上存在一定的盲目性,不仅效益不高,而且还会破坏地下水系统结构。

随着地理信息系统(GIS)技术的发展和应用领域的拓展,能够全面反映下垫面、气候条件差异对流域降雨-径流过程影响的分布式水文模型,已成为当前明确区域水资源数量空间分布特征的重要研究方法<sup>[6-10]</sup>。分布式水文模型的研究思路是按照水循环机制,在 GIS 及相关空间分析软件的支持下,根据 DEM 数据,结合地形特点,将研究区划分为若干个具有水力联系的集水区<sup>[11-16]</sup>。通过分布式水文模型得出的集水区图与土地利用类型图、土壤类型图进行叠加后,提取水系特征,得到水文响应单元<sup>[17-20]</sup>。最终,运用基于水文单元的水资源供需平衡研究方法,进行高标准农田建设的水资源供需分析评价,为在水资源约束下的高标准农田建设规划调整提供依据。

本文以黄骅市旧城镇为例,运用基于水文响应单元的水资源模型对研究区水资源供需量进行模拟计算,利用 ARCGIS 软件平台进行空间分析,从而进行水资源供需平衡的分析和评价,为高标准农田建设和规划提供依据。

## 1 基于水文响应单元的水资源模型计算方法

### 1.1 水文响应单元的划分

水文响应单元(Hydrologic Research Unit)是指一个子流域内具有相同的土地利用类型和土壤类型的区域。本研究通过将集水区图、土地利用类型图和土壤类型图进行叠加,进一步细分为下垫面相对均匀的水文单元。同时考虑研究区人工与自然水系交错和地势平坦的特点,通过自动与手工相结合的方法,进行水系特征提取,对照当地水系的实际情况加以修正。从而得到水文响应单元。

(1) 集水区划分。利用 ARCGIS 的水文分析(Hydrology)工具对 DEM 数据进行集水区划分。要得到流域分区结果需要经过无洼地 DEM 生成,水流方向计算,汇流累积量计算,提取河网和集水区划分五个步骤。图 1 为水资源现状分析及空间分布模型流程图。

(2) 土地利用类型划分。以《土地利用现状分类》国家标准为依据,并根据实际情况进行选择与改进。国家标准采用一级、二级两个层次的分类体系,共分 12 个一级类、57 个二级类。本次研究对于典型示范区采用建设用地区、农用地区和其它土地区三类用地区。

(3) 土壤类型取舍。土壤类型图采取全国第二次土壤普查成果。以水文特性相近为原则,可以进行归并,以减少单元数量。黑龙港地区主要为潮土、盐土和沼泽土。

(4) 水文响应单元划分。将流域分区图、土地利用类型

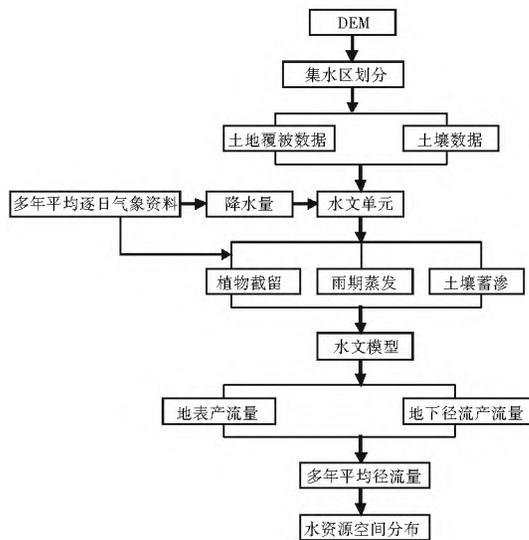


图 1 水资源现状分析及空间分布模型框图

Fig. 1 The model framework of analysis and spatial distribution of water resources

图与土壤类型图进行叠加,对研究区内的集水区进行水文响应单元的划分。黄骅市的示范研究,在 52 个集水区上共划分为 828 个水文响应单元(图 2)。

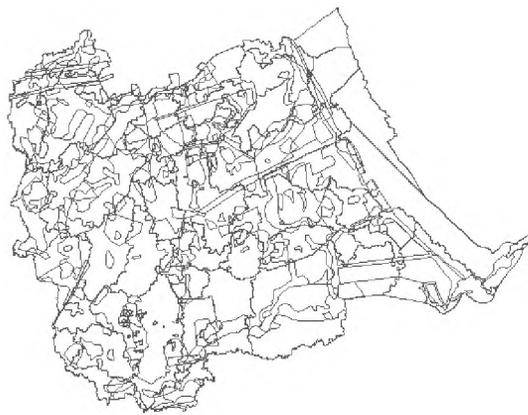


图 2 黄骅市水文响应单元

Fig. 2 The hydrological response unit of Huanghua City

### 1.2 基于水文单元的水资源供给量计算

#### 1.2.1 水文单元水量平衡方程

水文单元是研究区中具土地利用状况和土壤特性的趋同化集总单元,其空间划分可反应区域不同植被覆盖和土壤性质的下垫面条件。水资源量的计算沿河道方向从每一水文单元开始,通过模拟水量平衡物理过程,加以演算可得流域总径流量,即水资源量。研究区流域的水文模拟,主要围绕水文循环过程,根据平衡方程及相关的经验公式进行计算。

$$W_t = W_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - R_{si} - E_i - W_s - R_{gi}) \quad (1)$$

式中:  $W_t$  为土壤时段末含水量(mm);  $W_0$  为土壤降水前期含水量(mm);  $t$  为时间步长;  $P_i$  为第  $i$  天降水量(mm);  $R_{si}$  为第  $i$  天地表径流量(mm);  $E_i$  为第  $i$  天蒸发量(mm);  $W_s$  为土壤蓄渗量及壤中流量(mm);  $R_{gi}$  为第  $i$  天地下径流量(mm)。

#### 1.2.2 各平衡要素的确定方法

(1) 地表径流  $R_{si}$ 。地表径流是以水文单元作为基本空间单位进行演算。地表径流计算采用小流域降雨径流估算

模型 SCS 曲线方法。该模型根据径流下垫面的土壤、植被、土地利用方式的差异建立。

(2) 蒸散发量  $E_i$ 。区域蒸散发过程是一复杂的物理过程,包括土壤蒸发、水面蒸发和植物散发。因实际蒸散发是随时间及空间变化的水文过程,其定量往往采用经验和物理原理相结合的方法计算。

(3) 土壤水。雨前土壤初始含水量是影响水文计算的重要参量,其计算的准确性在很大程度上影响水资源计算结果的准确性。土壤初始含水量受土壤物理性质及气象条件的影响,在实际应用中常用经验公式来推求。因土壤含水量测定数据为一般点数据,因此,往往用前期影响雨量  $P_a$  间接代表土壤含水量。

(4) 地下径流。地下水根据其储水层的特点,分为浅层和深层地下水,饱和层水分运动的特点为由水势高的地方向水势低的地方运动。一般来说,粗粒储水介质导水率高,细粒储水介质导水率低,导水率低的介质限制水分的运动速率。

(5) 城镇建成区径流。城区用地的不透水面积所占比例很大,从而水分下渗大量减少。随着近年城乡建设的发展,区域空间产流模式发生了变化,尤其是城区排水管道系统的大量铺设提高了雨水收集效率,导致排水流量和流速大为增加;另外城市还修建了许多供市民休憩的公园、绿地,使雨水可直接渗入土壤。因此,城市建成区的径流可分为透水性的下垫面及与排水系统有水力联系的不透水性下垫面的产流。

### 1.3 基于水文单元的水资源需求量计算

不同土地利用方式耗水量的确定,是水资源优化配置及可持续利用的基础。不同的土地利用方式因用水性质、用水量存在一定区别<sup>[21]</sup>,所以其耗水模型构建机制有着显著的差异。

#### 1.3.1 水文单元耕地作物耗水模型

农作物耗水量受多种因素的影响,在空间上因土壤、小气候条件等不同,导致不同水文单元内的需水量存在一定差异。农作物耗水量是指在适宜的水肥力条件下,经正常生长发育,获得平均产量时的作物蒸腾与棵间蒸发以及植株体内的水量和。因植物体内水量与蒸发量相比很小,故忽略不计。

$$W_{p,z} = \frac{E_i}{-\exp(-\beta_w)} [1 - \exp(-\beta_w \cdot \frac{z}{z_n})] \quad (2)$$

式中:  $W_{p,z}$  为从土壤表层到给定深度  $z$  的耗水量(mm);  $E_i$  为作物最大蒸散发量(mm);  $\beta_w$  为水利用分配参数(土壤表层取 0.5,越往下层递减);  $z$  为距土表的深度(mm);  $z_n$  为根系下扎深度(mm)。

#### 1.3.2 水文单元湿地耗水模型

滨海平原湿地较多。湿地地形一般为洼地和低平地区,植被以湿生植物群落为主,是陆地和海洋生态系统过渡区。

湿地土壤一般情况下均处于饱和状态,其耗水量等于潜在蒸发量,湿地持续供水条件下所耗水量可用下式表示:

$$W_h = E_i - P_i + F_b \quad (3)$$

式中:  $W_h$  为水文单元内湿地所耗水量(mm);  $E_i$  为水文单元内某时段湿地蒸发量(mm);  $P_i$  为水文单元内某时段降水量(mm);  $F_b$  为水文单元内某时段渗漏补给地下水水量(mm)。

#### 1.3.3 水文单元林地耗水模型

林地生态需水量是林地生态系统为维持自身生长、发挥

生态功能所需要消耗和占用的水资源量,包括林地蒸散量和土壤含水量两部分。其中,土壤含水量是林地生态需水的非消耗量,林地蒸散量是消耗量。林地蒸散量计算公式为:

$$W_e = \sum_{i=1}^n E_i \cdot S \quad (4)$$

式中:  $W_e$  为林地蒸散量;  $W_i$  为第  $i$  月的林地蒸散定额;  $S$  为林地面积。

#### 1.3.4 水面生态耗水模型

河流水面分为汛期和非汛期,根据多年平均流量百分比和河道内生态环境状况的对应关系,可直接计算维持河道一定功能生态环境需水量,计算公式为:

$$W_r = 24 \times 3600 \times \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m D_{ji} \cdot Q_{ji} \cdot P_{ji} \quad (5)$$

式中:  $W_r$  为水面耗水量;  $D_{ji}$  为第  $j$  个水文响应单元内第  $i$  月的天数;  $Q_{ji}$  为第  $j$  个水文响应单元内第  $i$  月的多年平均流量;  $P_{ji}$  为第  $j$  个水文响应单元内第  $i$  月水面需水百分比。

#### 1.3.5 水文单元工业耗水模型

工业需水量与工业生产规模、工业结构、用水工艺和管理水平密切相关。由于资料条件限制,目前尚不能按行业分类和产品细目给出用水指标,只能以万元产值综合用水定额进行工业需水的估算,计算公式如下:

$$W_m = \sum_{i=1}^n V_{iw} \quad (6)$$

式中:  $W_m$  为研究区工业需水总量;  $V_i$  为第  $i$  个水文响应单元的工业产值;  $w$  为工业用水定额。

#### 1.3.6 水文单元生活耗水模型

居民生活需水量受到生活水平的影响,城镇居民生活需水量高,农村居民生活需水量低,因此在对生活需水进行计算时要充分考虑居民生活水平的差异。综上所述,居民生活用水计算公式为:

$$W_l = 365 \sum_{i=1}^n (P_{ci} w_c + P_{ci} w_t) \quad (7)$$

式中:  $W_l$  为研究区生活需水总量;  $P_{ci}$ 、 $P_{ti}$  为第  $i$  个水文响应单元的农村居民数量和城镇居民数量;  $w_c$ 、 $w_t$  为农村居民生活需水定额和城镇居民需水定额。

## 2 基于水文响应单元的水资源空间分布

一般情况下,假设其他条件保持不变,某一地区的降水量增大就会使得该地区的水资源量相应增大,反之水资源量相应的减少;在其它条件不变的情况下,某一地区的土地利用方式的变化也会在一定程度上影响水资源量的多少。对于同一个地区,如果耕地、草地、林地或者其他不同的土地利用方式在该地区所占的面积不同,那么在其它条件保持不变的情况下,该地区的水资源量也会随着土地利用方式的变化而发生变化。

根据水资源计算模型分别对水文响应单元内的水资源量进行计算,得出黄骅市水资源空间分布图(图3)。

图3中表达出水资源数量高值区和低值区。在水域面积较大,土壤蓄水量减少,大部分降雨直接转化为水资源量的区域,出现高值区;城市建筑较为密集,土壤入渗率降低,甚至降雨到达地面后可以直接产流的区域,水资源量较丰富。对比土地利用方式以及土壤类型图可知,水资源量高

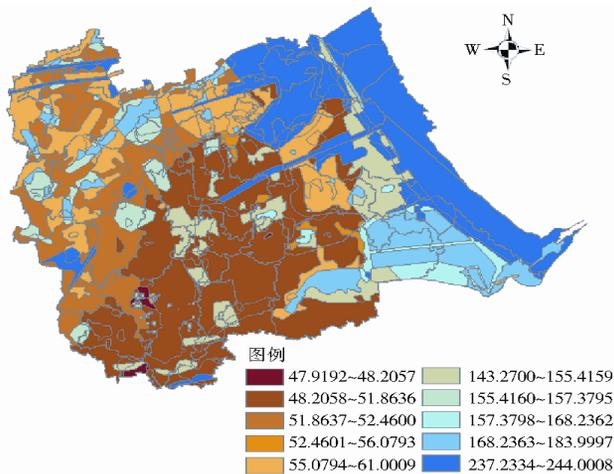


图 3 黄骅市水资源空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of water resources in Huanghua City

值区均分布于地面硬度较大,土壤入渗程度低和下垫面以水域为主的地区;地面硬度小,土壤入渗程度高的地区水资源量均较少,可见水资源量的分布直接受到下垫面性质的制约。

### 3 基于水文响应单元的水资源需求量空间分布

根据水资源计算模型对水文响应单元水资源需求量进行计算,得出黄骅市水资源需求量空间分布图(图 4)。

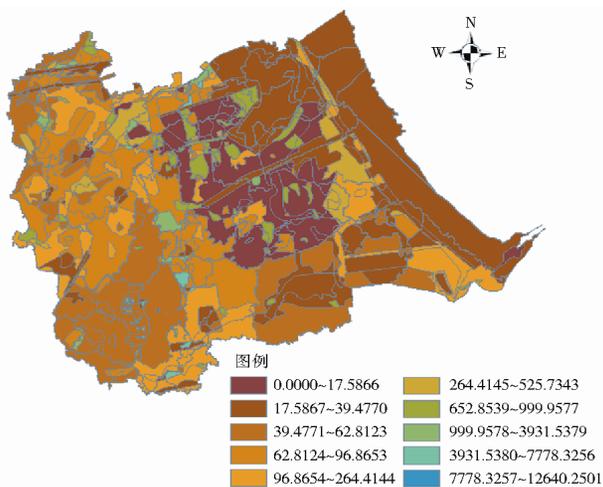


图 4 黄骅市水资源需求量空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of water resources demand in Huanghua City

不同土地利用方式耗水量的确定,是水资源优化配置及可持续利用的基础。不同的土地利用方式因用水性质、用水量存在一定区别。从图 4 中可知,对比土地利用方式分布,需水量高值区均分布于工业类型密集和人口较为集中的地区;次高值区主要分布于农业发展较为发达的地区;低值区主要分布于人口较少、经济欠发达和农业发展程度较低的地区。可见水资源需求量的分布主要与经济发展水平和人口分布密度有关。

## 4 基于水文单元的水土资源耦合平衡空间分析

水资源的有限性要求在区域土地利用过程中应充分考虑农业、工业、城乡等的空间布局,同时还要考虑水土资源之间的耦合关系。水土资源耦合需在可持续发展原则前提下,依据其水资源分布及不同土地利用方式分布的空间异质性,通过建立耦合平衡模型,定量研究水资源与土地资源不同空间单元上的系统耦合效应,以维持水土资源平衡,并为在水资源约束下的高标准农田建设提供依据。

根据上述研究中对黄骅市集水区的划分,在 GIS 及水资源分析模型的支持下,明确水文单元和所属乡镇、村庄的空间拓扑关系,为建立各水文单元水资源量与各土地利用类型耗水的空间耦合计量做准备。不同土地利用方式耗水量空间分配模型如下:

$$L_{ij} = A_{ij} / S_i \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

式中:  $L_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型水资源分配系数(%);  $A_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型的面积( $m^2$ );  $S_i$  为第  $i$  个水文单元面积( $m^2$ )。

$$P_{ij} = \frac{A_{ij} q_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_{ij} q_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

式中:  $P_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型耗水配置系数(%);  $A_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型的面积( $m^2$ );  $q_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型单位耗水量( $m^3/m^2, m^3/人, m^3/万元产值$ )。

$$X_{ij} = L_{ij} / P_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

式中:  $X_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型水资源适配度指数(%);  $L_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型水资源分配系数(%);  $P_{ij}$  为第  $i$  个水文单元第  $j$  种土地利用类型耗水配置系数(%)。

根据水资源空间分布和水资源需求量空间分布,运用上述模型对每个水文响应单元内的每种土地利用类型水资源适配度指数进行平衡关系表达,并按照表 1 对其进行分类,得出基于水文单元的黄骅市水土资源耦合平衡分析图(图 5)。

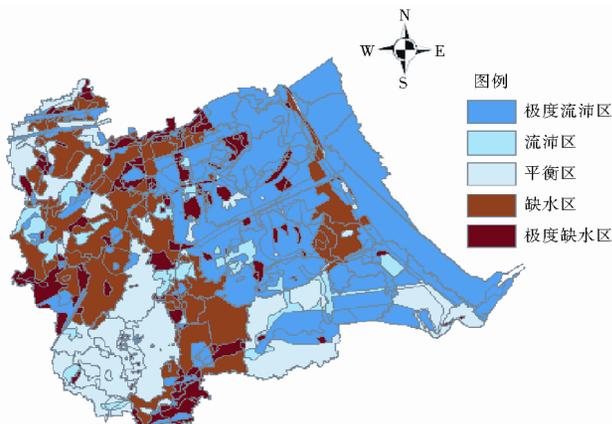


图 5 黄骅市水土资源耦合平衡分析

Fig. 5 The coupling balance analysis of water and land resources in Huanghua city

表 1 黄骅市水土资源耦合平衡分类

Table 1 The coupling balance classification of water and land resources in Huanghua City

分类	极度充沛区	充沛区	平衡区	缺水區	极度缺水區
适配度指数	$\leq 0.455$	4.55~ 0.800	0.800~ 1.200	1.200~ 2.193	$\geq 2.193$

表1中所列的适配度指数是指区域内的相对概念,并不能代表其在全国的普遍意义。仅就分类的相对指标,图5清晰地表达了区域内部水量平衡的空间分布特点:距离海岸较近的黄骅市东部水土资源属于极度充沛区和充沛区,处于黄骅市南部以及西北部部分地区为平衡区,而处于西部和中部的部分地区为缺水区和极度缺水区。

## 5 结论

(1) 本文将黄骅市划分为52个集水区以及828个水文响应单元,每个水文响应单元内均只有单一的土地利用类型和土壤类型。这种组合类型为分布式水文模型提供每个“点”上的输入参数,尝试在较小的空间尺度上研究景观格局变化引起的水文响应,有利于揭示黄骅市较为复杂的水文特性,建立符合当地条件的分布式水文模型。为克服集水面积阈值的变化对水文产汇流过程产生影响,本文利用适配度指数法逼近合理的阈值,避免了依靠经验获取阈值带来的主观性和随意性,更加客观和可靠。

(2) 处于黑龙江流域的黄骅市,其景观格局和水文环境相对较复杂,土地利用类型的变化速度很快,而土壤类型是一个相对不变的数据。因此,在实际应用中,可用不同时期的土地利用数据和土壤数据划分多组水文响应单元,从水文响应单元尺度上研究不同的土地利用类型、占用面积对水文特征指标的载荷,以及土地利用变化引起的水资源空间分布、水资源需求量空间分布的变化。

(3) 基于水文响应单元的水资源供需平衡分析结果为828个具有单一的土地利用类型和土壤类型的水文响应单元组成,研究区的资源依据更为精确,为耕地改造及高标准农田建设规划提供可靠的数据支持。基于水文响应单元的黄骅市水资源供需情况是包含土地利用类型和土壤类型的通用性分析,结果更具普遍性,但缺乏实际农田作物需水量的考虑。

(4) 理论上说,基于水文响应单元尺度上的景观格局水文响应研究,比从流域尺度上模拟水文响应过程的精度要高很多。本文在研究中仅考虑了水文响应单元一个时期的土地利用和土壤类型数据,而实际上气候因素也是影响水文响应的重要因素,因此,可根据需要考虑水文响应单元上更多因子的组合,以提高水文模拟精度,为高标准农田建设项目的设计提供理论依据。

### 参考文献(References):

- [1] 李相玺,尹忠东,何长高.土地生产潜力研究综述[J].水土保持学报,2001,15(5):33-36. (LI Xiang-xi, YIN Zhong-dong, HE Chang-gao. Review on the Study of Land Potential Productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5): 33-36. (in Chinese))
- [2] 赵琦,陈曙光,叶新华.高标准农田建设的做法与思考[J].农业开发与研究,2009,(3):17-20. (ZHAO Qi, CHEN Shu-guang, YE Xin-hua. Practice and Reflection on High Standard Farmland Construction [J]. Research in Agriculture Development, 2009, (3): 17-20. (in Chinese))
- [3] 程彦培,高继平,王滨,等.基于单位象元尺度的黑龙江流域农
- 用地下水资源供需分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(4):121-126. (CHENG Yan-pei, GAO Ji-ping, WANG Bin, et al. Supply and Demand Analysis on Agricultural Groundwater Resources Based on Unit Pixel Scale in the Heilonggang River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 121-126. (in Chinese))
- [4] 孙淑珍.黄骅市水资源形式及开发利用分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):54-56. (SUN Shu-zhen. Study on the Water Resources Situation and Utilization in Huanghua City [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 54-56. (in Chinese))
- [5] 刘成林.新时期黑龙江地区水资源问题及对策[J].地理与地理信息科学,2007,23(3):109-112. (LIU Cheng-lin. Issues of Water Resource and Countermeasure for Heilonggang Region during New Period [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 109-112. (in Chinese))
- [6] 叶守泽,詹道江.工程水文学(第3版)[M].北京:中国水利水电出版社,2000. (YE Shou-ze, ZHAN Dao-jiang. Engineering Hydrology (The Third Edition) [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [7] 万民,熊立华,卫晓婧.数字高程模型预处理方法的进展[J].水文,2008,28(5):11-17. (WAN Min, XIONG Li-hua, WEI Xiao-jing. Review of the Preprocessing Methods of Digital Elevation Models [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 11-17. (in Chinese))
- [8] 刘健,张奇.一个新的分布式水文模型在鄱阳湖赣江流域的验证[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):19-26. (LIU Jian, ZHANG Qi. Verification of A New Distributed Hydrologic Model in Ganjiang River Catchment, Poyang Lake Watershed [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(1): 19-26. (in Chinese))
- [9] 张利平,陈小凤,张晓琳,等.VIC模型与SWAT模型在中小流域径流模拟中的对比研究[J].长江流域资源与环境,2009,18(8):745-752. (ZHANG Li-ping, CHEN Xiao-feng, ZHANG Xiao-lin, et al. A Compare Application Research of VIC Model and SWAT Model in The Mid-Small Valley Flow Simulation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(8): 745-752. (in Chinese))
- [10] 李崇巍,刘世荣,孙鹏森.岷江上游景观格局及生态水文特征分析[J].生态学报,2005,25(4):691-698. (LI Chong-wei, LIU Shi-rong, SUN Peng-sen. Analysis on Landscape Pattern and Ecohydrological Characteristics at the Upstream of Minjiang River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 691-698. (in Chinese))
- [11] Jenson S K. Application of Hydrologic Information Automatically Extracted from Digital Elevation models [J]. Hydrological Processes, 1991, (5): 31-44.
- [12] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez I I. On the Extraction of Channel Network from Digital Elevation Data [J]. Hydrological Processes, 1991, (5): 81-100.
- [13] Martz L W, Garbrecht T J. The Treatment of Flat Areas and Depressions in Automated Drainage Analysis of Raster Digital Elevation Models [J]. Hydrological Processes, 1998, 12: 843-855.

(下转第43页)

- [8] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理\_结构及应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86. (WANG Zhong-gen, LIU Chang-ming, HUANG You-bo. The Theory of SWAT Model and Its Application in Heihe Basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese))
- [9] 王建平, 苏保林, 贾海峰, 等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1286-1291. (WANG Jian-ping, SU Bao-lin, JIA Hai-feng, et al. Integrated Model of Nutrients for the Miyun Reservoir and its Watershed [J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1286-1291. (in Chinese))
- [10] 张蕾, 卢文喜, 安永磊, 等. SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展 [J]. 生态环境学报, 2009, 6(18): 2387-2392. (ZHANG Lei, LU Wen-xi, AN Yong-lei, et al. Advances in Nonpoint Source Pollution Modelling with SWAT Model [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 6(18): 2387-2392. (in Chinese))
- [11] Zhang H, Huang G. Building Channel Networks for Flat Regions in Digital Elevation Model [J]. Hydrological Processes, 2009, (23): 2879-2887.
- [12] Bosch D D, Sheridan J M, Batten H L, et al. Evaluation of the SWAT Model on a Coastal Plain Agricultural Watershed [J]. Transactions of the ASABE, 2004, 5(47): 1493-1506.
- [13] 桑学锋, 周祖吴, 秦大庸, 等. 改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用 [J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1377-1389. (SANG Xue-feng, ZHOU Zu-wu, QIN Da-yong, et al. Application of Improved SWAT Model to Area with Strong Human Activities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1377-1389. (in Chinese))
- [14] 王加虎, 郝振纯, 李丽. 基于 DEM 和主干河网信息提取数字水系研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 2(33): 119-122. (WANG Jia-hu, HAO Zhen-chun, LI Li, et al. Extraction of Drainage Structure from Digital Elevation Model by Combination with Raster River Network [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 2(33): 119-122. (in Chinese))
- [15] Setegn S G, Srinivasan R, Melesse A M, et al. SWAT Model Application and Prediction Uncertainty Analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia [J]. Hydrological Processes, 2010, (24): 357-367.
- [16] 陈强, 苟思, 秦大庸, 等. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法 [J]. 水利学报, 2010, 41(1): 113-119. (CHEN Qiang, GOU Si, QIN Da-yong, et al. A High Efficiency Auto-calibration Method for SWAT Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 113-119. (in Chinese))

(上接第 33 页)

- [14] 舒栋才, 程根伟, 林三益. 基于 DEM 的岷江上游数字流域的离散化 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 6-11. (SHU Dong-cai, CHENG Gen-wei, LIN San-yi. Spatial Discretization of Digital Watershed Based on DEM for the Upper Reach of Minjiang River [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, 36(6): 6-11. (in Chinese))
- [15] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用 [J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 517-520. (XIONG Li-hua, GUO Sheng-lian, TIAN Xiang-rong. DEM-based Distributed Hydrological Model and Its Application [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese))
- [16] 龙海峰, 熊立华, 万民. 基于 DEM 的分布式水文模型在清江流域的应用 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(1): 71-78. (LONG Hai-feng, XIONG Li-hua, WAN Min. Application of DEM-based Distributed Hydrological Model in Qingjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(1): 71-78. (in Chinese))
- [17] Srinivasan R A, Mold J G. Integration of a Basin Scale Water Quality Model with GIS [J]. Water Resources Bulletin, 1994, 30(3): 452-460.
- [18] Martz L W, Garbrecht T J. An Outlet Reaching Algorithm for the Treatment of Closed Depressions in a Raster DEM [J]. Computers & Geosciences, 1999, 25: 835-844.
- [19] 张旭, 蒋卫国, 周廷刚. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分——以洞庭湖为例 [J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(4): 17-21. (ZHANG Xu, JIANG Wei-guo, ZHOU Ting-gang. Hydrological Response Unit Division for Dongting Lake Based on DEM and GIS [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(4): 17-21. (in Chinese))
- [20] 刘明, 王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应 [J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5970-5979. (LIU Ming, WANG Ke-lin. Analysis on Hydrological Responses to Changes of Landscape Patterns in the Middle and Upper Reaches of Dongting Lake Watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5970-5979. (in Chinese))
- [21] Beven K J. Distributed Hydrological Modeling: Application of the Topmodel Concept [C]. New York: John Wiley & Sons Limited, 1997.