

基于 C- D 函数的地下水动态变化对不同 农作物产量和灌溉量的响应

——以新疆奇台县平原井灌区为例^{*}

陈西玫¹, 熊黑钢^{1,2}, 赵明燕¹

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学 应用文理学院, 北京 100083)

摘 要: 根据奇台县平原井灌区的地下水埋深观测数据、野外调查数据、社会经济数据和农业气象资料, 借助柯尔-道格拉斯生产函数, 建立了根据不同农作物产量变化的地下水埋深变化生产函数模型。模拟结果显示: 粮食作物产量对地下水埋深的影响最大, 蔬菜瓜果次之, 经济作物影响最小。它们每增加 1%, 引起的地下水位埋深平均增加的幅度分别是 0.639%, 0.120% 和 0.205%。模型通过了精度检验 ($r = 0.987, P < 0.0001$), 模拟结果与实测埋深值拟合较好, 模拟精度的相对误差都小于 5%。同时, 由反映农作物灌溉耗水量与地下水埋深变化之间关系的公式得知: 灌溉粮食作物引起的地下水下降幅度最大, 占总下降幅度的 70.4%, 每年可使地下水位下降 0.339 2 m/a。灌溉蔬菜瓜果引起的地下水位下降的比重和速率(14.8%, 0.071 5 m/a)略高于灌溉经济作物产生的变化(14.7%; 0.0709 m/a)。

关键词: 奇台县; 农作物; 地下水埋深; 生产函数; 地下水下降幅度

中图分类号: F303.4; TV211.12

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0137-05

Response of the Groundwater Dynamic Change Based on C. W. Cobb-P. H. Douglas

Function Model to the Different Crop Yield and Irrigation Amount

—A Case Study of Well-based Irrigation Area in Qitai County in Xinjing

CHEN Xi-mei^{1,3}, XIONG Hei-gang^{2,3}, ZHAO Ming-yan^{1,3}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. College of Arts and Sciences, Beijing Union University, Beijing 100083, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China)

Abstract: According to data on groundwater depth, field survey, and agrometeorological data, the groundwater depth dynamic change model based on the Cobb-Douglas Production Function was simulated. It had been passed the accuracy test. According to the elastic coefficients to the model, the influences were grain crop yield (0.639) > vegetable and melon yield (0.205) > human factor (0.143) > economic crop yield (0.120) > annual mean temperature (0.063) > annual precipitation (0.024) in turn. And the major role causing the decline of groundwater level was calculated on the basis of the above simulations. The results showed that the major role among the crops, grain crop yield was the first, being 0.356 m/a, while cash crop yield is the least, being 0.073 m/a. On the other hand, the calculation of decline of groundwater caused by irrigation displayed that grain crop also occupies the first position, being 0.339 m/a. While cash crop is still the least, being 0.071 m/a. The errors between the two results above were all less than 5%. With the decline of groundwater level, a series ecological and environmental problems had been caused which had become the key factors restricting the socio-economic sustainable development of Qitai. Therefore, it is the key time to adjust planting structure in order to achieve sustainable use of the groundwater in

^{*} 收稿日期: 2008-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(40771194); 北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR200906125); 教育部绿洲重点实验室(XJDX0208-2004-07)

作者简介: 陈西玫(1979-)女, 四川人, 硕士, 主要从事区域经济与可持续发展研究。E-mail: chenximexm@163.com

通信作者: 熊黑钢(1956-)男, 博士, 教授, 主要从事干旱区资源环境研究。E-mail: heigang@ygi.edu.cn

the Qitai.

Key words: Qitai county; crop; groundwater depth; production function; decline of groundwater level

地下水资源是水资源的重要组成部分。特别是在干旱、半干旱地区,地下水资源是主要的利用对象,是社会经济发展的重要制约因素。随着社会生产的扩大,对水资源的需求增多,对地下水的利用程度也渐渐加强,开采范围不断扩大,地下水位逐年下降。对此,学者进行了大量的研究,在地下水环境演化、动态变化趋势、水位对 LUCC 变化的响应和地下水埋深模拟预测等方面成果显著^[1-11]。在地下水埋深估计模型的研究中,目前主要运用两类方法,一是随机性方法^[9],基于地下水埋深序列本身的特性进行拟合和预报^[9-10],二是通过分析地下水埋深和预测因子(如降水量、蒸发量、人为活动等)的相关性来建立预报模型^[11-12]。通过定量分析奇台县平原井灌区各类农作物的产量、灌溉耗水量与地下水埋深之间的关系,建立埋深变化模型。从而为其农业生产结构的优化和区域水土资源的可持续发展提供科学依据,推进经济、生态和社会的和谐发展。

1 研究区概况

奇台县位于新疆维吾尔自治区东北部准噶尔盆地东南缘,东经 $89^{\circ}13' - 91^{\circ}22'$,北纬 $43^{\circ}25' - 45^{\circ}29'$,总面积 $1.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其地处中温带大陆性干旱半干旱气候区,平原地区的多年平均降水量为 211.9 mm,而多年平均蒸发量却达到 1 735.7 mm,蒸降比约为 8:1。县域南部为山地、丘陵,中部属于冲积平原,北部为戈壁沙漠区。地下水自山区、平原戈壁、细土平原至沙漠区,从补给、径流、排泄构成了一个完整的水文地质单元。水土资源配合较好的中部冲积平原区为主要农耕区。该县是以典型的绿洲灌溉农业为主要模式的农业大县,生产特点是农业投入大、粮食作物播种面积大、单位面积产量高、第一产业产值比重大。2006 年,奇台县粮食作物播种面积为 5.573 万 hm^2 ,单位面积产量达到 5 870.97 kg/hm^2 ,第一产业产值在国民经济总产值中占的比例达 73%,农业生产集约化程度较高。

农业生产所取得的成就与水资源的开发利用密不可分。该县可利用的水资源主要有地表河水和地下水,其中 95% 用于农业生产灌溉。研究选取的井灌区主要分布于冲积平原北部的细土平原地带。区内河道已经干涸,地表水缺乏,因此农业生产完全依靠地下水资源。多年来一直采用机井和电井抽取地下水进行灌溉,井灌面积和比例逐年扩大。

2 数据来源及研究方法

2005–2007 年间多次赴实地进行野外考察,对 26 口长期(1983–2007 年)观测井进行了定位,测定和修正了地下水水位,对长期观测井周边的地形地貌和生态景观进行了调查,结合搜集的水文、气象数据及社会经济数据,整理得到了一批有价值的地下水、农业生产变化的数据。

2.1 影响因素的选取

地下水埋深的变化并非是单一因素影响的结果,而是多种因素共同作用造成的。其中主要因素包括各类农作物产量、井灌面积、蒸降比和年均温。在奇台县地下水位下降的同时,各农作物产量和井灌面积逐渐上升(图 1a,图 1b),蒸降比和气温对埋深的影响主要体现在极值上,地下水埋深下降大的年份,蒸降比和气温都高于多年平均值,位于波峰位置(图 1c)。

将以上各影响因素分别与地下水埋深变化做相关分析,结果显示(表 1):各种农作物产量和井灌面积与地下水埋深变化的相关性显著,而年均温和蒸降比则与地下水埋深变化呈弱相关。因为降水后,水分迅速被地表极为干旱的土壤吸收并蒸发,在干旱的绿洲平原区很难形成地下径流也很难补给地下水。鉴于此着重讨论对地下水埋深变化影响最显著的农作物产量和井灌面积与其之间的关系。

2.2 柯布–道格拉斯生产函数

柯布–道格拉斯(C–D)生产函数是美国经济学家 P. H. Douglas 与数学家柯布 C. W. Cobb 合作研究,得出的一种著名生产函数模型。他们研究了从 1899–1922 年美国的资本和劳动对生产的影响,认为在技术经济条件不变的情况下,产出 Q 与投入的劳动力 L 及资本 K 的关系可表示如式(1)。

$$Q = A \cdot K^{\rho} \cdot L^{\omega} \quad (1)$$

式中: ρ ——资本弹性,说明当生产资本增加 1% 时,产出平均增长 $\rho\%$; ω ——劳动力弹性,表明当投入生产的劳动力增加 1% 时,产出平均增长 $\omega\%$; A ——常数,也称效率系数,代表一定的生产技术水平。

生产函数表示的是在一定的技术水平下,各种生产要素投入量的某一组合同它所能产出的最大可能产出量之间的关系。可用其解决多种生产要素配合生产的最适合投入量及其最佳配合问题^[13-15]。而作物产量的形成是光合作用和蒸腾作用共同作用的

结果^[17], 一般情况下, 作物产量与需水量成正比, 即产量越高, 需水量越大。在奇台县, 降水主要集中在山区, 平原降水少蒸发强, 地表径流干涸, 农业生产

用水完全依赖地下水资源进行。所以可借助 C- D 函数来准确体现地下水埋深对不同农作物产量变化的响应, 其生产函数表达式如式(2)^[16-17]。

表 1 地下水埋深与各影响因素的相关系数

	粮食产量	经济作物产量	果蔬产量	井灌面积	年均温	蒸降比
相关系数 r	0.96	0.87	0.89	0.89	0.24	- 0.47
显著性检验	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.05$	$p < 0.05$

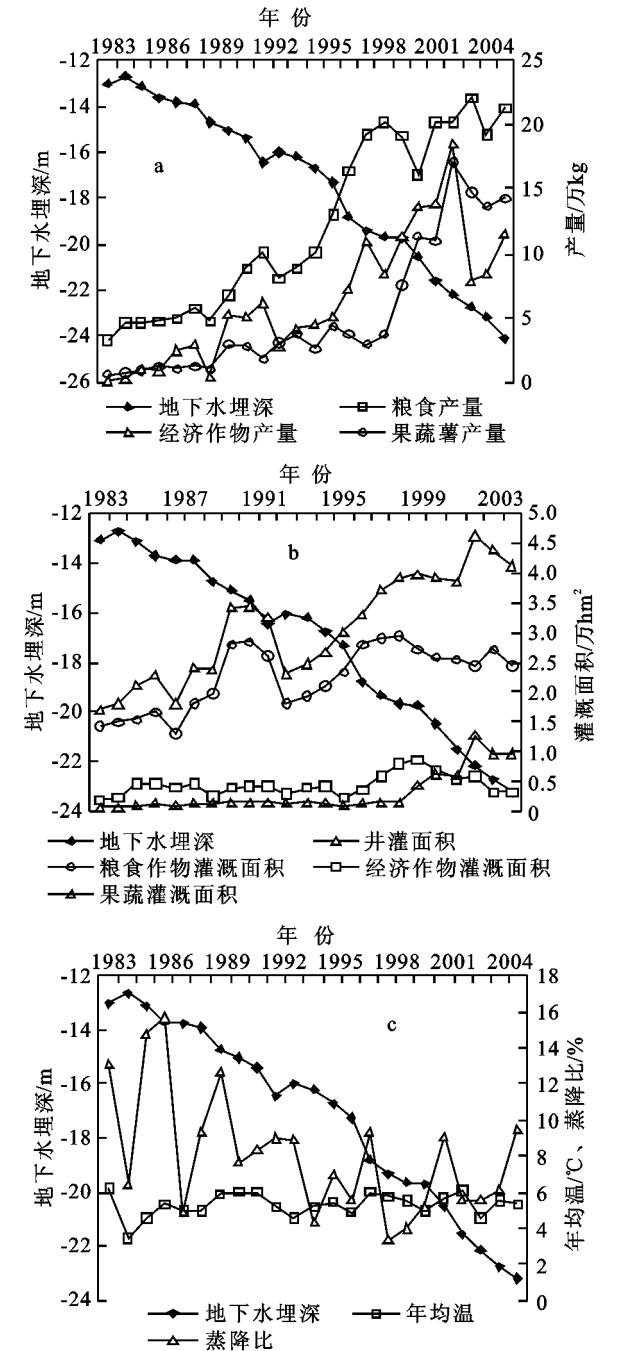


图 1 多年地下水埋深、农作物产量、井灌面积、蒸降比和年均温变化

$$H = A G^{\alpha} E^{\beta} V^{\lambda} T^{\theta} R^{\nu} e^{\mu t} \quad (2)$$

式中: H ——地下水埋深; G ——粮食作物产量; E ——经济作物产量; V ——蔬菜瓜果产量; T ——年平均温; R ——年降水量; $\alpha, \beta, \lambda, \theta, \nu$ 依次是粮食

产量、经济作物产量、蔬菜瓜果产量、年均温、降水量各自的弹性系数。它们的意义为: 当粮食作物产量、经济作物产量和蔬菜瓜果产量以及年均温和年降水量分别增长 1% 时, 相对应的地下水埋深平均增加 $\alpha\%$, $\beta\%$, $\lambda\%$, $\theta\%$ 和 $\nu\%$; A ——常数; μ ——人为因素; t ——时间变量。在函数(2) 模拟结果的基础上, 根据各类作物产量的年变化率, 可进一步得到种植各类作物引起的地下水埋深变化模拟值。

2.3 不同农作物的灌溉耗水量与地下水位动态变化

灌溉耗水量是指作物种植过程中实际灌溉的水量, 计算其值需要另引入农田灌溉需水量数据(农作物正常生长需要的最低水量)。前者用各种作物天然状态下的需水量乘以作物的灌溉面积, 累加就能得到^[18-21]。农田灌溉耗水是引起研究区地下水位下降的主要原因, 根据不同农作物的灌溉耗水量可得出其引起的地下水位下降幅度^[19] 如式(3)。

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta H_{ga}} = \frac{d_i \times A_i}{\sum d_i \times A_i} \quad (3)$$

式中: ΔH_i ——第 i 类农作物灌溉耗水引起的地下水位下降幅度; ΔH_{ga} ——农田灌溉引起的地下水位下降幅度; d_i ——第 i 类作物天然状态下的需水量; A_i ——第 i 类作物的有效灌溉面积。

3 结果分析

3.1 不同类型农作物的产量与地下水埋深

以地下水埋深和各种作物产量^[22] 及各年年均温和降水量数据, 运用 C- D 函数方法建立奇台井灌区地下潜水埋深的生产函数模型如式(4)。

$$H = 0.451 G^{0.639} E^{0.120} V^{0.205} T^{0.063} R^{-0.024} e^{0.143t} \quad (4)$$

对模拟结果进行误差统计(表 2), 除 1993 年(5.14%) 外, 模拟结果的相对误差都在 5% 以内, 拟合精度高。

对模型进行精度检验, 回归系数达到显著相关, $r = 0.987$ ($P < 0.0001$), 说明地下水埋深生产函数模型较好地反映了地下水埋深的变化趋势, 同时也表达了不同农作物产量对地下水埋深变化的影响。

由模型各系数显示出, 各项因素对地下水埋深影响从大到小的顺序为: 粮食作物> 蔬菜瓜果> 人为因素> 经济作物> 年均温> 年降水量。粮食产量

每增长 1%,地下水埋深平均增加 0.639%;经济作物产量每增长 1%,引起的地下水埋深平均增加 0.120%;蔬菜瓜果的影响仅次于粮食作物,其产量增长 1%,相应的地下水位平均下降 0.205%。

粮食生产是农业生产活动中最重要的部分。1983 年以来,粮食的单位面积产量从 1 987.5 kg/hm² 增加到 6 636 kg/hm²,2005 年粮食的总产量为

2.767×10⁸ kg,其种植面积占耕地面积的比重最大,总产量也最高,是地下水资源的主要消耗者。在粮食高产、稳产和增产的同时,地下水资源的消耗量也逐渐增加。蔬菜瓜果的单位面积产量是 3 种作物中最高的,且增长迅速。近年来其种植面积也大量增加,产量相应大幅度增长,因此对水资源的需求量增大,对地下水位的影响也逐步增强。

表 2 地下水埋深实测值与 C-D 函数模拟值比较

年份	实测值/ m	模拟值/ m	相对误差/ %	年份	实测值/ m	模拟值/ m	相对误差/ %
1983	- 13.04	- 13.52	- 3.64	1995	- 16.73	- 16.07	3.93
1984	- 12.69	- 13.05	- 2.86	1996	- 17.28	- 17.11	0.99
1985	- 13.11	- 13.59	- 3.64	1997	- 18.79	- 18.75	0.23
1986	- 13.68	- 13.91	- 1.66	1998	- 19.36	- 19.56	- 1.06
1987	- 13.81	- 13.74	0.54	1999	- 19.61	- 19.72	- 0.56
1988	- 13.89	- 14.15	- 1.88	2000	- 19.73	- 20.08	- 1.75
1989	- 14.72	- 14.28	2.96	2001	- 20.49	- 20.18	1.47
1990	- 15.07	- 15.32	- 1.68	2002	- 21.53	- 21.56	- 0.16
1991	- 15.42	- 15.93	- 3.29	2003	- 22.17	- 22.48	- 1.39
1992	- 16.47	- 16.08	2.35	2004	- 22.73	- 22.71	0.09
1993	- 16.00	- 15.18	5.14	2005	- 23.16	- 23.13	0.14
1994	- 16.19	- 15.57	3.82				

3.2 不同农作物灌溉量引起地下水位下降

1983- 2005 年,灌溉粮食作物引起的地下水位下降幅度为 7.802 4 m,速率为 0.339 2 m/a,占地下水位总下降的 70.4%。由经济作物灌溉引起的下降幅度和速率分别是 1.629 5 m 和 0.070 9 m/a,所占比重为 14.7%。灌溉蔬菜瓜果引起的水位下降是 1.644 3 m,速率为 0.071 5 m/a,所占比重 14.8%(表 3)。

作物灌溉面积的扩增是引起灌溉量增大,消耗地下水资源量增加的重要原因。23 a 来粮食作物的灌溉面积以 458.7 hm²/a 的速度递增(图 1b),2005 年已占总井灌溉面积的 65.1%。虽然粮食作物的单位面积平均灌溉量最少,但由于其种植面积大,总的灌溉量多,引起地下水位下降的幅度仍然最大。多年来经济作物的井灌面积变化平缓,增长率为

57.8 hm²/a,年平均值为 4 495.2 hm²,对地下水的消耗趋于稳定。蔬菜瓜果的灌溉面积变化最明显:1999 年之前维持在较低水平,年平均灌溉面积仅为 1 307.2 hm²;1999 年之后大幅度上升,并在 2002 年超过了经济作物,年平均灌溉面积达 8 123.4 hm²。由此对地下水位的影响逐渐增强,引起的地下水位下降值略高于经济作物。

将不同农作物产量对地下水埋深的影响(以下称产量影响)和不同作物灌溉耗水对地下水埋深的影响(以下称灌溉影响)对比分析显示:研究时段内,种植粮食作物对地下水位埋深的影响显著,由其引起的地下水位下降幅度最大(产量影响比重 64.9%,灌溉影响比重 70.4%)蔬菜瓜果次之(21.8%,14.8%),经济作物最小(13.3%,14.7%)(表 3)。

表 3 1983- 2005 不同作物消耗的地下水量以及引起的地下水位变化幅度

作物类型	灌溉量/ (m ³ ·hm ⁻²)	总水位变化幅度			水位平均变化速率			比重/ %	
		灌溉	产量	相对	灌溉影响/	产量影响/	相对	灌溉影响	产量影响
		影响/ m	影响/ m	误差/ %	(m·a ⁻¹)	(m·a ⁻¹)	误差/ %		
粮食作物	6785	- 7.8024	- 7.8328	0.39	- 0.3392	- 0.3560	4.95	70.4	64.9
经济作物	7686	- 1.6295	- 1.6041	- 1.56	- 0.0709	- 0.0729	2.82	14.7	13.3
蔬菜瓜果	10509	- 1.6443	- 2.6291	59.8	- 0.0715	- 0.1195	67.1	14.8	21.8
总 计	24980	- 11.0762	- 12.066	8.94	- 0.4816	- 0.5484	13.87	100	100

除蔬菜瓜果的产量影响与灌溉影响之间差异较大以外,粮食作物和经济作物的产量影响与灌溉影响之间吻合较好,相对误差都低于 5%,表明以上研究结果较好的反映了地下水埋深变化对作物产量和灌溉量的响应。

4 结论

(1) 运用 C-D 生产函数,建立了基于农作物产量的地下水埋深变化生产函数模型。模型通过了精度检验,用其计算出的埋深模拟值与实测值拟合精度较高,连续 23 a 的模拟相对误差基本都小于 5%。因此,可用此模型预测地下水埋深的变化。同时,地下水埋深变化对不同农作物产量以及对灌溉耗水量的响应之间误差较小,二者从不同方面都较好表达了农作物种植对地下水埋深的影响。

(2) 粮食作物、经济作物和蔬菜瓜果的产量增加 1% 时,引起的地下水埋深平均下降分别为 0.639%、0.120% 和 0.205%。由粮食产量引起的地下水位下降幅度为 7.832 8 m,速率是 0.356 0 m/a;由蔬菜瓜果产量引起的下降幅度与速率是 2.629 1 m 和 0.119 5 m/a;由经济作物产量引起的水位下降幅度是 1.604 1 m,速率为 0.072 9 m/a。

粮食作物种植面积占总灌溉面积比重大,耗水总量多,每年引起的地下水位下降幅度与速率为 7.802 4 m 和 0.339 2 m/a。种植蔬菜瓜果引起的地下水位下降幅度有 1.644 3 m,速率为 0.071 5 m/a。经济作物影响最小,分别为 1.629 5 m 和 0.070 9 m/a。

(3) 奇台县是新疆的农业大县,该县在 1985 年被列入自治区商品粮生产基地,1993 年被国务院列为国家级粮食生产大县,1995 年被国家评为自治区唯一的全国粮食生产先进县。该县在粮食生产方面取得的巨大成就离不开稳定的农业用水供给。粮食种植对地下水的依赖是引起地下水埋深变化的主要原因。种植结构已对地下水资源可持续利用产生了巨大的压力。

参考文献:

[1] 王贵玲, 蔺文静, 张发旺. 太行山前平原地下水环境演化规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 74-77.

[2] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应的计算: 以河北省栾城县为例[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 204-209.

[3] 孙亚乔, 钱会, 张黎, 等. 银川地区地下水环境演化[J].

干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 54-55.

[4] 吴林娜. 山西省地下水动态特性与开发利用浅析[J]. 人民黄河, 2007(2): 50-51.

[5] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 黄河三角洲地区典型地块地下水特征的空间变异性研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1074-1075.

[6] 刘英, 包安明, 陈曦. 塔里木河下游地区地下水空间分布动态模拟[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 95-101.

[7] 闫金凤, 陈曦, 罗格平, 等. 干旱区绿洲地下水水位时空变异性对土地覆被变化的响应[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊 I): 42-48.

[8] 闫金凤, 陈曦, 罗格平, 等. 绿洲浅层地下水位与水质变化对人为驱动 LUCC 的响应: 以三工河流域为例[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 172-180.

[9] 向阳, 袁星, 谢正辉, 等. 传递函数-自回归模型在地下水埋深估计中的应用[J]. 水文, 2006, 26(4): 55-59.

[10] 沈冰, 刘敏, 黄领梅. 灰色自记忆模型及其在新疆和田地下水埋深预测中的应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 221-226.

[11] 李荣峰, 沈冰, 张金凯. 考虑周期性变化的地下水埋深预测自记忆模型[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 34-37.

[12] 孙海清. 降水量与地下水埋深的小波分析: 以广饶县井灌区为例[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 55-58.

[13] 简先民. 运用柯布-道格拉斯函数模型解决多种生产要素最佳配合方法的探析及其应用[J]. 韶关大学学报: 自然科学版, 1998, 19(3): 85-91.

[14] 张良, 窦春轶, 时书丽. Cobb-Douglas 生产函数的模糊分析[J]. 运筹与管理, 2006, 15(1): 58-61.

[15] 张超, 杨秉康. 计量地理学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 107-110.

[16] 李新波, 郝晋珉, 丁忠义, 等. 盐渍化改造区土地利用变化对地下水资源的影响: 以河北省曲周县为例[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 152-154.

[17] 孔祥斌, 张凤荣, 齐伟, 等. 集约化农区土地利用变化对水资源的影响: 以河北省曲周县为例[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 747-753.

[18] 林耀明, 任鸿遵, 于静洁, 等. 华北平原的水土资源平衡研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3): 252-258.

[19] 许月卿. 土地利用对地下水位下降的影响: 以河北平原为例[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 224-228.

[20] 赵荣海. 新疆三工河流域灌区节水灌溉制度设计[J]. 新疆农业大学学报, 1997, 20(2): 65-70.

[21] 杨艳昭, 封志明, 刘宝勤. 西北地区县域农业水资源平衡问题研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 347-353.

[22] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴(1990-2006)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.