

基于土地综合承载力的西安市适度人口测度

范晨辉, 马蓓蓓, 薛东前

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: [目的] 测度和分析西安市 2001—2011 年的适度人口及其变化情况, 探讨人口承载力变化的特征与原因, 提出优化对策。[方法] 食品承载力模型、生态足迹模型、改进的经济承载力模型和改进的综合承载力模型。[结果] 2001—2011 年, 西安市的适度人口数量及结构呈现出阶段性变化; 2004 年开始, 西安市人口承载赤字一直存在, 并在经历一个快速增长阶段后出现缓和趋势; 西安市经济人口承载力较强, 而食品和生态人口承载力不足。[结论] 提高区域综合承载力, 土地承载是基础, 经济承载是关键, 生态承载是限制。

关键词: 土地综合承载力; 适度人口; 人口承载赤字; 西安市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0205-05

中图分类号: K901.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.038

Optimum Population Measure on Basis of Land Comprehensive Carrying Capacity in Xi'an City

FAN Chenhui, MA Beibei, XUE Dongqian

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: [Objective] Measure and analyze the optimum population of Xi'an City from 2001 to 2011, in order to discuss the characteristics and the cause of the change in the population carrying capacity, and to put forward the optimization countermeasures. [Methods] Four models, which are food carrying capacity, ecological footprint, improved economy carrying capacity and improved comprehensive carrying capacity were used. [Results] The population size and structure of Xi'an City presented periodic characteristics in different phases from 2001 to 2011. Since 2004, population carrying deficit has always existed, and with this situation, the trend of it became smooth after a rapid growth stage. The economy carrying capacity of Xi'an City was stronger, however, the food and ecological population carrying capacity was insufficient. [Conclusion] In the process of improving the area comprehensive carrying capacity of Xi'an City, the land carrying capacity is the base, the economy carrying capacity is the key point, and the ecology carrying capacity is the limitation.

Keywords: land comprehensive carrying capacity; optimum population; population carrying deficit; Xi'an City

土地承载力是指在不同的时间尺度上, 以可预见的技术、经济和社会发展水平及与此相适应的物质生活水平为依据, 一个国家或地区利用其自身的土地资源所能持续稳定供养的人口数量^[1]。而适度人口, 一般是指在一定目标和条件下区域能够供养的最优人口数量, 其规模取决于区域各种自然、经济承载力和区域人口对这些承载力的需求水平之间的平衡^[2]。

土地资源承载力与适度人口之间有着天然的联系, 从 1948 年 William Vogt 首先提出土地承载力的概念开始, 土地承载力就以可承载人口的数量作为衡

量标准^[3]。最初的研究基本是围绕耕地—食物—人口展开^[4-6], 此后土地承载力和适度人口的内涵得到多次扩展, 研究内容扩展到自然资源、经济水平和生态等^[7-15]。现在多数学者开始更多地从综合的视角研究土地所能承载的适度人口。在研究方法上也不断创新, ECCO 数学模型及系统动力学的仿真方法都被应用到土地承载力的研究之中^[16]。

随着西部大开发政策的持续推进, 西安市的社会经济高速发展, 区域环境变化显著, 由此引发的快速城市化过程中的土地承载力演变特征和规律是一个

收稿日期: 2014-02-21

修回日期: 2014-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“转型期西安市新城市贫困的时空分异与效益评价研究”(41171142); 国家自然科学基金青年项目“文化产业空间集聚及其与城市微观功能格局的耦合规律研究: 以西安市为例”(41301170)

第一作者: 范晨辉(1990—), 男(汉族), 河北省衡水市人, 硕士研究生, 研究方向为城市与区域发展。E-mail: fanchenhui1990@163.com。

通信作者: 马蓓蓓(1983—), 女(汉族), 河南省信阳市人, 博士, 副教授, 主要从事城市化与区域资源环境研究。E-mail: mabb@snnu.edu.cn。

值得研究的问题。以往对西安土地承载力的研究多采用生态足迹法^[7,17],不能全面反映西安市的现实土地承载问题。本文通过改进的土地综合承载力模型对西安市的适度人口进行研究,以便更全面科学地呈现西安市在快速城市化进程中的土地承载特征,并为未来西安市及类似区域的土地利用、城市化战略等决策提供参考依据。

1 研究方法

1.1 区域粮食人口承载力测算

食品是维持人类生存的基本保障。工业化和城市化带来的耕地萎缩,促使保障食品安全成为最重要的国家命题之一。区域食品人口承载力计算公式为:

$$C_{ri} = G / \sum_{j=1}^n [W_j / (I_j \times K_j)] \quad (1)$$

式中: C_{ri} ——区域食品可承载人口; G ——耕地总面积; W_j ——人均食品消费量; I_j ——某作物单位面积产量; K_j ——某作物复种指数。

1.2 区域经济人口承载力测算

经济发展水平的高低不止表现为地区绝对的经济总量,而更多地表现为相对于其他地区的发展程度。所以,经济人口承载力也不应局限于绝对经济量的承载能力,而更应该是一个相对的概念。2000年黄宁生等人较早提出了相对承载力的概念,即“以比具体研究区更大的一个或数个区域(参照区)作为对比标准,根据参照区的人均资源拥有量或消费量、研究区的资源存量,计算出研究区的各类相对资源承载力”^[8]。此后,李泽红等对相对资源承载力模型进行了改进^[9]。在此,本文参考其思路设计出区域经济人口承载力模型,计算公式为:

$$C_{re} = \sqrt[3]{C_{ic} \times C_{cs} \times C_{gd}} \quad (2)$$

式中: C_{re} ——区域经济可承载人口; C_{ic} ——收入水平可承载人口; C_{cs} ——消费水平可承载人口; C_{gd} ——国内生产总值(GDP)可承载人口。其计算公式分别如下:

$$C_{ic} = P_c \times Q_c / Q_{ca} + P_r \times Q_r / Q_{ra} \quad (3)$$

$$C_{cs} = P_c \times N_c / N_{ca} + P_r \times N_r / N_{ra} \quad (4)$$

$$C_{gd} = P \times M_x / M_c \quad (5)$$

式中: $P_c, Q_c, P_r, Q_r, N_c, N_r, M_x$ ——区域的城镇人口数量、城镇居民收入水平、农村人口数量、农村居民收入水平、城镇居民消费水平、农村居民消费水平和GDP; $Q_{ca}, Q_{ra}, N_{ca}, N_{ra}, P, M_c$ ——全国城镇居民收入水平、农村居民收入水平、城镇居民消费水平、农村居民消费水平、人口数量和GDP。

1.3 区域生态人口承载力测算

生态足迹指标是通过测定人类为维持自身生存

而利用自然的量来评估人类对生态系统的影响。因此,可以将任何已知人口的生态足迹表述为生产这些人所消费的所有资源和吸纳这些人所产生的所有废弃物所需要的生物生产土地的总面积和水域面积^[10]。生态足迹通过跟踪人类利用的多数消费品和产生的大部分废弃物,估算生产和维持这些消费品和资源以及消化废弃物所需要的生物生产性土地面积,并利用均衡因子将之转化为相应的生物生产性空间。在生态足迹方法中,生态承载力是指一个区域实际提供给人类的所有生物生产土地面积(包括水域)的总和^[11]。该定义实现了用同一指标(生物生产土地面积)来表示和评价生态足迹和生态承载力,使生态承载力与生态足迹具有可比性。所以本文选取生态足迹法来测度区域生态可承载人口,计算公式为:

$$C_{ra} = O_a / L_a \quad (6)$$

式中: C_{ra} ——区域生态可承载人口; O_a ——区域生态承载力; L_a ——区域人均生态足迹。其中区域人均生态足迹的计算模型为:

$$L_a = R_j \times \sum_{i=1}^n (C_i / P_i) \quad (7)$$

式中: C_i ——第*i*种商品的人均消费量; P_i ——第*i*种消费商品的平均生产能力; i ——消费商品和投入的类型; R_j ——均衡因子。

区域生态总承载力计算模型为:

$$O_a = \sum_{j=1}^6 EC_j \times EQ_j = \sum_{j=1}^6 AA_j \times YF_j \times EQ_j \quad (8)$$

式中: AA_j ——不同类型的生态生产性土地面积; EQ_j ——均衡因子; YF_j ——不同类型生态生产性土地产量调整系数,即产量因子。

1.4 区域适度人口测算

迄今为止,综合人口承载力测算方法尚不成熟,目前普遍采用的是加权线性和法^[8,12],计算公式为 $C_s = W_1 C_{ri} + W_2 C_{re} + W_3 C_{ra}$,其中: W_1, W_2, W_3 分别为食品、经济和生态人口承载力的权重。现有模型最大缺陷在于权重确定的随意性,忽视了不同因素之间的匹配关系,从而影响了模型的科学性。基于此,本文对土地综合承载力模型进行了改进,改进后的模型表示为:

$$C_s = \sqrt[3]{C_{ri} \times C_{re} \times C_{ra}} \quad (9)$$

相比加权线性和模型,改进后的模型避免了权重的使用,同时一定程度上考虑了资源之间的匹配关系。例如,加权线性和法往往取 $W_1 = W_2 = W_3 = 1/3$,即 $C_s = 1/3(C_{ri} + C_{re} + C_{ra}) \geq (C_{ri} \times C_{re} \times C_{ra})^{1/3}$,当且仅当 $C_{ri} = C_{re} = C_{ra}$ 时取等号。也就是说,当食品承载力、经济承载力和生态承载力相等时,改进后的模型与加权模型计算的才相等;而当土地、经济和

生态资源匹配性较差时,改进后的模型计算的理论值往往小于加权模型计算的值,这说明改进后的模型对资源的匹配性要求更高。

2 结果与分析

本文利用《中国统计年鉴》(2002—2012)、《西安市统计年鉴》(2002—2012)以及《中国农业统计年鉴》的数据,分别对西安市 2001—2011 年的食品承载人口、经济承载人口和生态承载人口进行了测算,在此基础上得出西安市适度人口。复种指数根据西安市历年种植情况计算得到。计算方法为年内农作物播种面积与耕地面积之比。近年来城镇居民在外用餐增加而其消费量并未相应计入统计。人口赤字指区域的实际人口超过区域的可承载人口。

2.1 西安市食品人口承载力

食品可承载人口根据西安 2001—2011 年的人均需要食物标准、农作物单产、复种指数、耕地面积等数据计算得出。其中人均需要食物标准依照动物所需饲料将肉禽类及其制品的消费量按照一定比例转换为粮食,本文采用周道玮 2013 年提出的转化比,即猪肉 6,牛羊肉 2,禽肉 4,蛋类 2,水产品 0.8,奶类

0.5^[18]。西安市作物复种指数以 1.87 计算;工业、种子、储运损耗按人均用粮的 12% 计^[19]。

2001—2011 年西安市实际人口均超过食品可承载的人口,超载人口的数量总体上呈现出先增加再减少的趋势(表 1)。由于西安市城市化水平较高,耕地较少,人均耕地面积更是常年只有全国平均水平的 35% 左右,故西安市历年均表现出食品承载力不足。超载人口也呈现出一定的阶段性特征,2001—2008 年,人均粮食需求量的增加及耕地面积的持续减少使得超载人口持续增加;而 2008 年后超载人口的减少趋势得益于土地整理和耕地保护的加强、耕地面积减速放缓以及单产提高。

上述结论的得出是建立在封闭系统的西安市域范围内,未考虑区际间的流通。事实上,任何一个区域都是在一个相对开放的环境下发展,这样才能保证物质和能量的交换,因此,当在一个相对开放条件的环境下,区域内土地食品承载力不足的问题将在很大程度上得以解决。把区域作为封闭系统来研究其土地资源承载力,只是暂时解决问题的一个方法,而对于开放系统中的土地资源承载力研究还需要大大加强。

表 1 西安市 2001—2011 年食品人口承载力

年份	人均食物需要量(kg/人)			人均需耕地 (hm ² /人)	耕地总面积/ 10 ³ hm ²	食品可承载 人口/万人	实际人口/ 万人	超载人口/ 万人
	粮食	油料	蔬菜					
2001	254.65	3.41	152.30	0.068 7	431.69	628.71	694.84	66.13
2002	259.23	3.65	153.88	0.069 4	424.46	611.29	702.59	91.30
2003	263.73	3.57	159.76	0.074 1	413.84	558.36	716.58	158.22
2004	246.39	3.52	147.73	0.062 6	404.87	646.74	725.01	78.27
2005	259.84	3.70	152.47	0.064 0	400.17	625.70	741.73	116.03
2006	246.27	3.56	143.75	0.064 8	395.79	611.09	753.11	142.02
2007	244.81	3.77	143.57	0.064 8	391.77	604.74	764.25	159.51
2008	287.75	4.11	132.58	0.066 2	390.77	589.91	772.3	182.39
2009	253.50	3.85	137.04	0.057 5	387.89	674.84	781.67	106.83
2010	228.49	5.49	137.51	0.051 2	383.32	748.06	782.73	34.67
2011	208.43	4.38	139.21	0.052 0	377.10	725.66	791.83	66.17

西安市食品人口承载力表现出有所提升趋势的一个主要原因是人均粮食消费量减少。人均粮食消费量减少的主要原因是本文在折算过程中只包括了口粮、猪肉、牛羊肉、禽肉、蛋类、水产品、奶类 7 种(类),而随着居民的食品消费更加个性化多样化以及外出用餐次数增多,折算后的粮食消费要小于实际消费量,食品承载力可能并不容乐观。在耕地面积不断减少而人口不断增加的大背景下,食品的承载能力不足更应该得到应有的重视。如果不对人口的增长和

耕地的减少加以控制,将会威胁到未来地区的粮食安全。

2.2 西安市经济人口承载力

通过计算 2001—2011 年期间西安市居民收支和 GDP 的承载能力,并作几何平均,得到了西安市经济人口承载力(表 2)。从表 2 可以看出,2001—2011 年,西安市经济人口承载能力较强,未出现人口超载状况。其中 2001—2007 年经济人口承载盈余处于稳定水平,约 50 万人左右;从 2007 开始,经济人口承载

能力出现大幅增长,人口承载盈余也快速增长,达到实际人口的 30.45%。究其原因,西安市的经济发展水平一直高于全国平均水平,且 2007 年前经济增速与全国平均水平相仿;自 2007 年起西安市的经济发展速度持续快速增长。从贡献率来看,虽然 GDP 对经济人口承载力的贡献率最大,达到 35.49%,但是自 2008 年起的承载盈余的大幅增长却更多地得益于居民收入和消费水平的大幅提高,收入和消费对人口承载力增长的贡献率分别达到 38.67%和 34.61%。

表 2 西安市 2001—2011 年经济人口承载力 万人

年份	消费可承载人口	收入可承载人口	GDP 可承载人口	经济可承载人口	实际人口	超载人口
2001	733.98	694.50	854.12	757.92	694.84	-63.08
2001	728.87	682.80	882.47	760.12	702.59	-57.53
2003	724.73	689.94	900.69	766.52	716.58	-49.94
2004	751.44	691.60	896.29	775.17	725.01	-50.16
2005	742.72	710.91	928.97	788.65	741.73	-46.92
2006	762.13	726.87	935.17	803.14	753.11	-50.03
2007	780.26	732.91	922.89	808.13	764.25	-43.88
2008	826.90	772.76	980.28	855.62	772.3	-83.32
2009	973.40	888.06	1 066.37	973.23	781.67	-191.56
2010	973.88	943.10	1 092.21	1 001.05	782.73	-218.32
2011	1 010.73	990.47	1 101.00	1 032.97	791.83	-241.14

2.3 西安市生态人口承载力

本文均衡因子的确定参考了 Lenin 和 Murray 的指标,确定耕地和建筑用地 2.8,森林 1.1,草地 0.5,水域 0.2^[13],产量因子采用中国耕地、林地、草地、水域、建设用地的平均值,分别为 1.66,0.91,0.19,1.66,1^[14]。生物资源消费主要包括农产品、林产品、动物产品以及水产品等,能源消费部分包括煤、原油、柴油、汽油、天然气、热能、电力等。生态足迹扣除 12%的面积用于生物多样性保护^[15]。

2001—2011 年西安市生态人口承载力不断下降,从 2004 年开始人口出现超载,且超载人口数量逐年增加(表 3)。2001—2011 年西安市的生态承载力虽有小幅上升,但与人均生态足迹的增加相比增幅有限,这也导致西安市生态可承载人口大幅下降,人口对生态的压力逐渐增大。西安市生态人口超载的根本原因是人均生态足迹的增加。把人均生态足迹分解来看,能源消费的人均生态足迹一直占绝对主导地位,而且主导地位不断加强;而生物资源消费的人均生态足迹虽然有所减少,但由于其所占比重过小,对增加土地承载力的作用有限。能源消费的人均生态足迹的增加主要来自与煤炭和原油消费量的急速增长,人均煤炭和石油的消费量在 2001—2011 年分别增长了 139%和 240%。

表 3 西安市 2001—2011 年生态人口承载力

年份	生物资源消费的人均生态足迹/hm ²	能源消费的人均生态足迹/hm ²	人均生态足迹/hm ²	生态承载力/hm ²	可承载人口/万人	实际人口/万人	超载人口/万人
2001	0.055 5	0.252 3	0.307 8	3 286 004	953.27	694.84	-258.43
2002	0.054 7	0.247 3	0.301 9	3 350 444	990.76	702.59	-288.17
2003	0.052 0	0.288 4	0.340 3	3 310 378	868.49	716.58	-151.91
2004	0.046 1	0.396 2	0.442 3	3 490 908	704.65	725.01	20.36
2005	0.044 0	0.430 7	0.474 7	3 464 415	651.66	741.73	90.07
2006	0.046 5	0.484 5	0.531 0	3 640 047	612.04	753.11	141.07
2007	0.046 0	0.492 8	0.538 8	3 639 183	603.06	764.25	161.19
2008	0.038 6	0.503 1	0.541 8	4 053 531	668.06	772.3	104.24
2009	0.037 6	0.561 9	0.599 5	3 608 961	537.47	781.67	244.20
2010	0.035 6	0.527 3	0.562 9	3 862 152	612.65	782.73	170.08
2011	0.038 8	0.541 1	0.579 9	3 894 065	599.54	791.83	192.29

2.4 基于土地综合承载力的西安市适度人口测度

综合西安市食品、经济和生态的人口承载力,得出西安市的适度人口(图 1)。2001—2011 年西安市的适度人口以 2007 年为界经历了一个先下降再增长的过程,而实际人口一直处于增长状态。西安市从 2004 年开始实际人口超过适度人口,出现人口承载

赤字,以 2007 年为界,人口承载赤字先持续上升再波动下降。

从西安市适度人口的构成来看,经济承载人口比重最大,而生态和食品人口承载能力不足。经济、食品和生态人口承载力对适度人口的年均贡献率分别为 38.60%,29.09%和 32.31%。分年份来看,2001

年经济、食品和生态人口承载力对适度人口的贡献率分别为 32.39%、26.87% 和 40.74%；此后经济人口承载力贡献率不断提高,食品人口承载力保持相对平稳,而生态人口承载力贡献率不断降低;至 2011 年,经济人口承载力贡献率达到 43.80%,而生态承载力的贡献率降为最低,只有 25.42%。

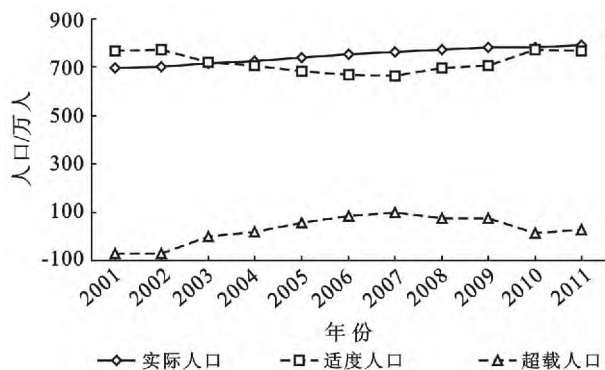


图 1 西安市 2001—2011 年人口变化趋势

从西安市食品、经济和生态人口承载力的变化趋势看,西安市经济承载力不断上升,食品承载力呈现出上升趋势,而生态承载力却不断下降。西安市超载人口先上升再下降,表明 2007 年前西安市由于经济发展使承载人口增加的能力被生态环境破坏所蚕食;2007 年后情况开始好转,经济发展向良性发展轨道迈进,但是生态承载力的持续下降及人口赤字的持续存在突显出西安市生态承载能力的不足,表明西安市经济发展可持续性依旧较差,是以耗竭自身的自然资源为基础的。

分析西安市长期存在人口赤字的原因,一是西安市城市化率较高,但是城市人口密度却较低,西安市的人口密度不仅大大低于京沪广深等东部城市,而且低于成都、重庆、武汉等中西部同级城市,这导致相同的人口会占据更多的城市建成区;二是随着工业化和城市化进程的加快,开发强度的加大和化石燃料的消费不断增加促使了人均生态足迹的快速增加,使得生态人口承载力持续弱化;三是区域实际人口的不断增加,2001—2011 年西安市实际人口增加了 96.99 万人,年均增长率达到 11.95%,是同期全国人口年均增长率 4.94% 的 2.4 倍。

3 结论

(1) 2001—2011 年,西安市的适度人口数量及结构呈现出阶段性变化。2007 年以前适度人口不断减少,2007 年后适度人口呈现波动增长趋势;西安适度人口的构成结构由“生态人口承载力>经济人口承载

力>食品人口承载力”变为“经济人口承载力>生态人口承载力>食品人口承载力”再变为“经济人口承载力>食品人口承载力>生态人口承载力”。

(2) 2004 年开始,西安市人口承载赤字一直存在,并在经历一个快速增长阶段后出现缓和趋势。人口赤字出现的最主要原因是人均生态足迹增加引起的生态人口承载力不足。这说明西安市人口、资源与环境已处于一种不协调状态。

(3) 要实现西安市的可持续发展,必须继续推进经济发展方式的转变,促使经济发展与资源环境系统的生产能力和供养能力相互协调;持续推进城市化进程并提高建设用地的利用效率,提高城市容积率;严格控制人口增长,尤其是人口的自然增长;开发和采用先进科学技术,提高资源的利用效率,提高土地的综合承载能力。

(4) 西安要在 2020 年实现建设“拥有 1000 万人口的国际化大都市圈”的宏伟目标,必须提高区域的综合承载力。其中,土地承载是基础,经济承载是关键,生态承载是限制。

[参 考 文 献]

- [1] 石玉林,陈百明. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究[M]. 北京:中国人民大学出版社,1991.
- [2] 彭希哲,刘宇辉. 生态足迹与区域生态适度人口:以西部 12 省市为例[J]. 市场与人口分析,2004,10(4):9-15.
- [3] Vogt W. Road to survival[J]. Soil Science, 1949,67(1):75.
- [4] FAO. Potential population supporting capacities of lands in the developing world[M]. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
- [5] Millington R, Gifford R. Energy and how we live[C]// Australian UNESCO Seminar, Committee for Man and Biosphere, 1973.
- [6] 宋建,孙以萍. 从食品资源看我国现代化后所能养的最高人口数[J]. 人口与经济,1981(2):2-10.
- [7] 王建洪,任志远,苏雅丽. 基于生态足迹的 1997—2009 年西安市土地生态承载力评价[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):224-229.
- [8] 黄宁生,匡耀求. 广东相对资源承载力与可持续发展问题[J]. 经济地理,2000,20(2):52-56.
- [9] 李泽红,董锁成,汤尚颖. 相对资源承载力模型的改进及其实证分析[J]. 资源科学,2008,30(9):1336-1342.
- [10] 张志强,徐中民. 生态足迹的概念及计算模型[J]. 生态经济,2000(10):8-10.
- [11] 岳东霞,李自珍,惠苍. 甘肃省生态足迹和生态承载力发展趋势研究[J]. 西北植物学报,2004,24(3):454-463.

(下转第 219 页)

- 1972,36(5):697-702.
- [4] Hillel D, Baker R S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. Soil Science, 1988,146(1):51-56.
- [5] 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):104-110.
- [6] 张建丰,王文焰,汪志荣,等. 具有砂质夹层的土壤入渗计算[J]. 农业工程学报,2004,20(2):27-30.
- [7] 郑燕燕,冯绍元,霍再林. 沟灌条件下层状土壤入渗与排水实验研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(5):30-33.
- [8] 王春颖,毛晓敏,赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(11):61-67.
- [9] 宋日权,褚贵新,张瑞喜. 绿洲农田表层掺砂、覆砂对土壤水分入渗的影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2010,28(3):360-365.
- [10] 李毅,任鑫. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):485-490.
- [11] 王金平. 蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟[J]. 水利学报,1989,10(5):49-54.
- [12] 任利东,黄明斌,樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报,2013,29(19):105-111.
- [13] 聂卫波,马孝义,王术礼. 一维土壤入渗特性数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2009,28(3):53-57.
- [14] 陆垂裕,裴源生. 适应复杂上表面边界条件的一维土壤水运动数值模拟[J]. 水利学报,2007,38(2):136-142.
- [15] 范严伟,赵文举,冀宏. 垂直一维入渗土壤水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 兰州理工大学学报,2012,38(2):51-55.
- [16] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [17] Simunek J, Vogel T N, Van Genuchten M T. The SWMS-2D code for simulating water and solute transport in two dimensional variably saturated media-Version 1.2[R]. Research Report 132, US Salinity Lab., Agric. Res. Serv. USDA, Riverside, California, USA, 1994.

(上接第 209 页)

- [12] 韩书成,濮励杰. 江苏土地综合承载能力空间分异研究[J]. 水土保持通报,2009,29(5):146-150.
- [13] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia[J]. Ecological Economics, 2001,37(2):229-255.
- [14] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999,29(3):375-390.
- [15] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报,2000,55(5):607-616.
- [16] Meadows D H, Goldsmith E I, Meadow P. The limits to growth[M]. London: Earth Island Limited, 1972.
- [17] 王建洪,任志远,苏雅丽. 西安市土地承载力定量评价与动态分析[J]. 水土保持通报,2012,32(2):233-236.
- [18] 周道玮,刘华伟,孙海霞,等. 中国肉品供给安全及其生产保障途径[J]. 中国科学院院刊,2013,28(6):733-739.
- [19] 李波,张俊飏,李海鹏. 我国中长期粮食需求分析及预测[J]. 中国稻米,2008(3):23-25.