

# 基于 AquaCrop 模型的东北春麦区小麦冠层生长模拟研究

李 晶, 付 驰, 张铁楠, 罗 宁, 乔天长, 张丽芳, 魏 湜

(东北农业大学 农学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:**在 AquaCrop 作物模型数据库组建的基础上,应用该模型对东北春小麦冠层生长进行模拟。结果表明,除 2010 年呼玛地区模拟值低于实测值外,其余年份和地点的模拟值均高于实测值, IoA 在 0.726~0.995 之间,模拟值与实测值的一致性较为理想; AquaCrop 模型能较好反映正常年份下春麦生育活动,模型模拟情况与各地观测到的冠层发育情况较为一致。但对极端气候下的春麦冠层发育的模拟效果较为一般。在以后的研究中,需进一步对气象参数做出修正,以更好地应用于小麦的生产和预测。

**关键词:** AquaCrop 模型; 东北地区; 春小麦; 冠层

**中图分类号:** S512.2<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)06-0106-05

## Study on the Simulation of the Canopy Growth of Spring Wheat in the Northeast Based on the AquaCrop Model

LI Jing, FU Chi, ZHANG Tie-nan, LUO Ning, QIAO Tian-chang, ZHANG Li-fang, WEI Shi

(College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The results indicated that the simulated values of the rest of the year were generally higher than the measured values in addition to the Huma region. The consistency of simulated values and measured values was ideal, which IoA was 0.726 to 0.995. The simulated and measured values of other region have reached a consistent in canopy development, and the AquaCrop model can reflect spring wheat reproductive activities in average years. But the development of spring wheat canopy was general under extreme weather, which was a problem to improve in AquaCrop. In order to better use in producing and forecasting the wheat, we need to make a further correction to the meteorological parameters in the future research.

**Key words:** AquaCrop model; northeast region; spring wheat; canopy

作物模型是作物科学中引进系统分析方法和应用计算机后兴起的新型研究领域<sup>[1]</sup>,自 Dewit 和 Duncan 最早建立了能在计算机上完全模拟作物生长过程的模型后,至今,针对水稻、小麦、玉米、棉花、花生、番茄、大豆、苜蓿等多种作物的模型均已建立<sup>[2-7]</sup>。AquaCrop 作为新开发的作物模型,适用于大田作物,通过生物量与收获指数来模拟作物生产力水平,且只需少量参数即可用于预测产量和生物量,已在多个国家和地区得到验证<sup>[8]</sup>。国内在华北地区有过应用与报道<sup>[9-11]</sup>,杜文勇等<sup>[12]</sup>基于灌溉技术采用 AquaCrop 模型对冬小麦生物量和产量进行了预测。

作物冠层结构特征是作物栽培管理、采取措施的主要依据,创造合理的群体冠层结构是获得高物质生

产的有效途径。对于作物合理群体冠层结构的构建,前人进行了大量研究<sup>[13]</sup>。东北春麦区是我国各春麦区中面积最大、总产最多的春麦区,包括黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东部,地处高纬度。随土地过度开垦,生态环境脆弱,是典型旱作农业区。春旱及生理发育期缺水,限制了小麦冠层生长,提早衰老导致产量降低,因而监测田间生长变化特征,及时有效采取管理措施尤为重要。冠层生长模拟监测是实现产量潜力估测的基础。

本文以东北平原春小麦为研究对象,依据实际情况对 AquaCrop 模型中的一些参数进行调试,对东北地区春小麦冠层生长进行模拟验证,以期对产量形成模拟与验证提供基础,为该区域种植模式调整和制

收稿日期:2013-04-24

修回日期:2013-05-10

资助项目:东北农业大学博士科研基金项目(2010RCB20);公益性行业(农业)科研专项(200903010);黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z10253)

作者简介:李晶(1977—),女,哈尔滨人,博士,副教授,从事作物逆境生理研究。E-mail:jingli1027@163.com

通信作者:魏湜(1956—),男,哈尔滨人,博士,教授,从事作物高产栽培研究。E-mail:weishi5608@163.com

定,以及作物生长模型用于春小麦的应用研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验选择东北春麦区 5 个具有代表性的监测地点(表 1),获取各地 2010 年、2011 年春小麦生育期间田间自然状态下作物数据及气象数据。

1.2 试验设计

试验品种采用龙麦 33,戊唑醇种衣剂拌种;机械播种,基本保苗数 600 万株/hm<sup>2</sup>,播深 3~5 cm,播后镇压;应用除草剂封闭除草;施肥同普通大田水平,其

他均为常规大田管理。利用 2011 年哈尔滨春小麦无胁迫试验数据对模型进行参数本地化校正与调试,建立模型运行数据库。

1.3 气象数据采集与冠层生长测定

气象数据采集:2010 年、2011 年春小麦生育期内逐日气象数据由中国农科院联合清华大学、北京农业信息技术研究中心等机构联合开发的“农业环境无线远程实时监控系统”采集记录,包括日最高温度、最低温度、土壤含水量等,空气温度传感器为 HAYASHI DENKO 公司的 Pt100,土壤湿度传感器为 Automata 公司的 AQUA-TEL-TDR。数据缺失部分来源于国家气象信息中心资料服务室。

表 1 试验监测点概况

监测点	经纬度	年均气温/ ℃	无霜期/ d	年均降水量/ mm	年均日照/ h	有效积温/ ℃
呼玛县	51°43'E,126°37'N	-2.0	80~100	450	2564	1800~2100
牙克石市	49°24'E,121°08'N	-2.2	90~105	420	2589	1750~2000
嫩江县	49°10'E,125°17'N	3.0	85~120	500	2472	1850~2200
绥化市	46°36'E,126°53'N	3.3	120~140	483	2600	2400~2700
哈尔滨市	46°25'E,126°18'N	3.6	135~145	537	2632	2700~3000

在无胁迫条件下,模型对作物整个生育期内的冠层生长过程模拟如图 1,其表达式如下:

$$CC=CC_x-(CC_x-CC_0)e^{-CGC_t}$$

冠层充分发育和冠层衰老之间,有一段冠层覆盖度较稳定的时间。冠层开始衰老时,作物整体蒸腾能力逐渐降低,进入冠层衰老中后期,绿色冠层覆盖度急剧下降,冠层衰老过程以如下公式表示:

$$CC=CC_x[1-0.05(e^{\frac{CDC}{CC_x}}-1)]$$

式中:CC——生育期内某天冠层覆盖度;CC<sub>0</sub>——作物初始冠层覆盖度;CC<sub>x</sub>——无胁迫时作物冠层的最大覆盖度;CGC——冠层生长系数;CDC——冠层衰老系数;t——从播种到作物各发育阶段的天数。

年至今测量的平均大气 CO<sub>2</sub> 浓度作为参考,建立 CO<sub>2</sub> 浓度数据库。

作物参数数据库:根据 2011 年哈尔滨无胁迫小区试验实际调查,将龙麦 33 各生育期生长情况输入模型,建立模型所需的作物参数数据库文件 \*.CRO。

土壤参数数据库:根据资料查询结果,将模型所需的土壤参数输入,分别建立各地土壤数据库文件 \*.SOL。

管理措施数据库:5 个试验点春小麦均为雨养农业,施肥情况属中等肥力,建立模型所需管理参数数据库文件 \*.MAN。

2 结果与分析

2.1 冠层生长的模拟

对比 5 个监测点 2 a 冠层生长情况可知,2010 年五地春麦冠层生长系数较 2011 年低,冠层发育不良,其中呼玛、牙克石冠层生长系数最小,绥化、哈尔滨地区冠层生长也表现出明显的环境胁迫,由于 2010 年 6 月,东北春麦区出现持续高温气候,黑龙江平均高温日数达历史同期最高。其中呼玛最高温达 40.5℃、牙克石为 39.3℃、绥化为 39.7℃、哈尔滨为 39℃,日最高气温均突破历史极值。高温直接影响了 2010 年春麦的生长发育,制约了小麦产量的形成。2011 年各地气候较为适宜,未出现极端天气,春麦生长良好,2011 年各地冠层发育明显优于 2010 年。从根区水分状况可以看出,2010 年牙克石、2011 年嫩江小麦根区田间持水量(FC)接近于凋萎湿度(PVP),牙克石

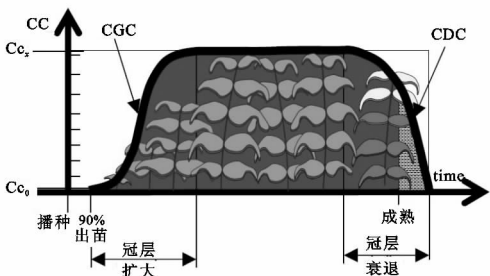


图 1 作物生育期内冠层覆盖变化过程

1.4 AquaCrop 模型数据库组建

气象参数数据库:根据各试验点的经纬度、海拔高度、日最高温、最低温、日降雨量、日照时数,应用 FAO 研发的参考作物蒸发量 ET<sub>0</sub> 计算器,求出参考作物需水量 ET<sub>0</sub>,并建立模型气象数据库文件 \*.CLI<sup>[14]</sup>。模型利用夏威夷 MaunaLoa 天文台自 1958

2010 年高温少雨、嫩江 2011 年高温气候导致地表蓄水量低于蒸发量,加大了根区耗水,这与历史气象记录水平中牙克石 2010 年属于高温干旱年、嫩江 2011 年属于高温年相一致。

2.2 模型有效性分析

从图 2 中可以看出,AquaCrop 模型对各地 2010 年高温胁迫下的冠层模拟均做出反应,与实际观测冠层发育趋势较为一致。2010 年绥化、哈尔滨两地冠层

模拟曲线未下降,与实测偏离较大。由于 2010 年两地春播期持续低温,播期推迟近 30 d。灌浆期又遭遇高温干旱复合胁迫,生育期缩短 20 d,模型并未准确模拟春麦生育后期的高温逼熟危害,故图 2 中显示的两地春麦生育末期冠层尚未衰老。2011 年各地小麦生长环境较好,仅牙克石和嫩江地区出现轻微干旱,AquaCrop 模型对正常年景下春麦生育活动反映良好,模拟情况与各地实际观测到的冠层发育情况较为一致。

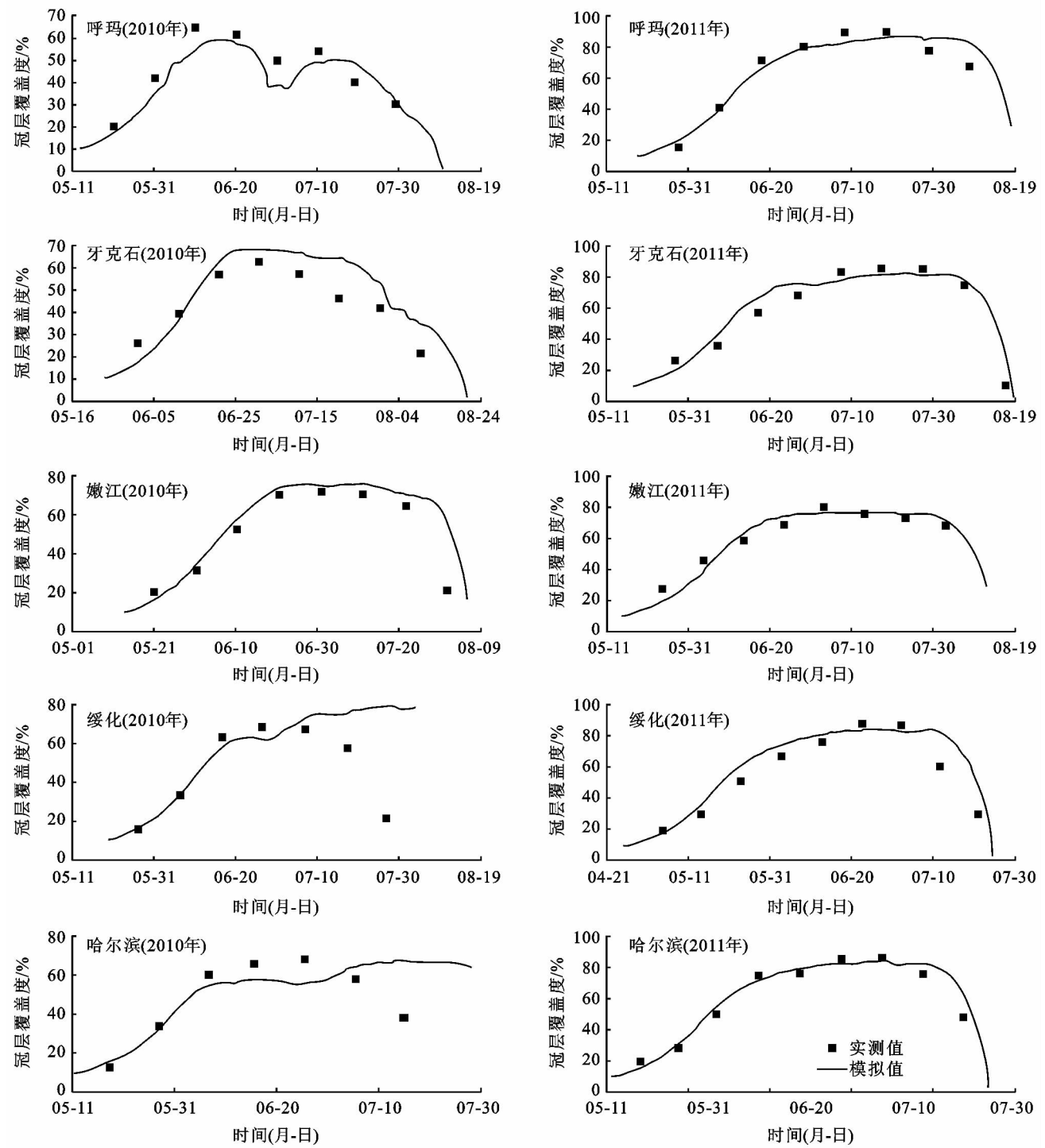


图 2 2010—2011 各地春麦冠层覆盖度实测值与模拟值

对 2010、2011 年各地冠层覆盖模拟值与实测值进行精度分析,结果见表 2。从表 2 中可看出,模型对 2011 年的模拟效果整体优于 2010 年,2010 年气候异常,表明模型对极端气候下的春麦冠层发育的模拟效果较为一般。2010 年、2011 年冠层覆盖度模拟值与实测值相对平均误差 MAE 在 4.63%~12.86%之间,其中 2010 年、2011 年呼玛和 2011 年哈尔滨的模

拟值与实测值 MAE 值较低;RMSE 在 5.09%~22.02%之间,2011 年的 RMSE 整体优于 2010 年,说明模型对正常年景下的模拟效果更好;EF 在-1.450~0.168 之间,CRM 在-0.079~0.218 之间,除 2010 年呼玛地区模拟值低于实测值外,其余年份和地点的模拟值均高于实测值,IoA 在 0.726~0.995 之间,模拟值与实测值的一致性较为理想。

表 2 2010—2011 年各地冠层模拟精度分析

地点	年份	MAE/%	RMSE/%	EF	CRM	IoA
呼玛	2010	6.37	7.11	0.052	-0.079	0.923
	2011	6.89	8.55	0.168	0.052	0.989
牙克石	2010	9.00	10.02	-1.450	0.148	0.885
	2011	6.89	8.32	0.086	0.051	0.979
嫩江	2010	8.00	13.04	-0.296	0.140	0.988
	2011	4.63	5.09	-0.434	0.006	0.983
绥化	2010	12.86	22.02	-0.252	0.218	0.726
	2011	8.33	10.02	0.074	0.106	0.983
哈尔滨	2010	9.57	13.05	0.128	0.032	0.873
	2011	4.77	5.82	0.016	0.033	0.995

3 结论与讨论

本研究基于 2011 年哈尔滨地区春小麦无胁迫试验数据对模型中的参数进行了本地化调试与校正,获得了适宜东北地区春麦生长发育的模型参数:春小麦生育基础温度为 0℃,上限温度为 26℃,90%出苗时每株所占土地面积取值 1.5 cm<sup>2</sup>/株,冠层增长系数为 0.006,冠层下降系数为 0.004,通过 ET<sub>0</sub> 和 CO<sub>2</sub> 为标准规范化的水分生产率系数 WP\* 为 15 g/m<sup>2</sup>,产量形成阶段以 ET<sub>0</sub> 和 CO<sub>2</sub> 为标准规范化的水分生产率取值 100%,参考收获指数 48%。AquaCrop 模型对 2010 年、2011 年各地春麦生育期内冠层覆盖度进行模拟,其模拟值与实测值的相对平均误差 MAE 在 4.63%~12.86%之间,说明模型对正常年景的春麦模拟效果更好;除 2010 年呼玛地区模拟值低于实测值外,其余年份和地点的模拟值均高于实测值,IoA 在 0.726~0.995 之间,模拟值与实测值的一致性较为理想。

作物生长模型是动态表达作物生长过程的一种系统。模型的区域适应性验证是目前作物模型的应用热点之一,通过大范围的检验和校正可以提高数据质量、尽可能提高模拟精度,从而提高模型在作物生产中的应用可靠性。生长模型的区域研究成为一个新的方向。对此,国内外已有相应的报道<sup>[15-16]</sup>。AquaCrop 模型面世较晚,对其研究涉及该模型的参数调整、验证<sup>[17-18]</sup>及模拟应用<sup>[19]</sup>等,应用该模型在东

北春麦区的模拟应用尚属首次。本研究利用 AquaCrop 模型对 2010 年、2011 年东北春麦区五地冠层生长的模拟值与实测值一致性较为理想。刘战东等<sup>[20]</sup>进行冬小麦冠层降雨截留模拟时,受风速、温度等因素影响,认为模拟降雨试验并不能完全代表实际降雨时的冬小麦冠层截留过程和特性,自然环境中模拟冠层截留作用仍需深入研究。本研究中也表现出极端温度条件的定量模拟不理想,在预测东北春麦生态点小麦生长时出现一定误差。李子忠等<sup>[11]</sup>应用 AquaCrop 对大葱的模拟结果与实测值拟合程度也表现出一定误差。表明模型在环境胁迫下模拟会加大与实测值的误差。为此,应进一步对作物参数进行测定、校准,增加田间实地检测数据的频率,从模型机理机制上寻找解决的办法,提高模型的预测性和适应性。

参考文献:

[1] 高亮之. 农业模型学基础[M]. 香港:天马图书有限公司,2004.

[2] Jones C A, Kiniry J R. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development[M]. College Station, U S;Texas A&M Univ. Press,1986:89-110.

[3] Ritchie J T, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat; A user-oriented wheat yield model[J]. ARS-United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service,1985,38:159-175.

[3] 戚昌瀚,殷新佑,刘桃菊,等. 水稻生长日历模拟模型

- (RICAM)的调控决策系统(RICOS)研究 I 水稻调控决策系统(RICOS)的系统结构设计[J]. 江西农业大学学报,1994,16(4):323-327.
- [4] 吴锦,余福水,陈仲新,等. 基于 EPIC 模型的冬小麦生长模拟参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报,2009,25(7):136-138.
- [5] 潘学标,韩湘玲,石元春. 一个可用于栽培管理的棉花生长发育模拟模型-COTGROW[J]. 中国农业科学,1996,29(1):94-96.
- [6] 尚宗波,杨继武,殷红,等. 玉米生长生理生态学模拟模型[J]. 植物学报,2000,42(2):184-194.
- [7] 孙忠富,陈人杰. 温室番茄生长发育动态模型与计算机模拟系统初探[J]. 中国生态农业学报,2003,11(2):84-88.
- [8] 庄严,梅旭荣. 不同基因型作物水分—产量响应关系及生理生态学研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
- [9] Steduto P, Hsiao T C, Raes D, et al. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. Agron J, 2009, 101(3):426-437.
- [10] 李会,刘钰,蔡甲冰,等. AquaCrop 模型的适用性及应用初探[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):28-31.
- [11] 李子忠,徐洋,卢宪菊,等. AquaCrop 模型在大葱生物量和土壤贮水量模拟中的应用和验证[J]. 中国农业大学学报,2011,16(4):59-66.
- [12] 杜文勇,何雄奎,Shamaila Z,等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J]. 农业机械学报,2011,42(4):174-178.
- [13] The ETo Calculator FAO [EB/OL]. [2009] <http://www.fao.org/nr/water/docs/ReferenceManualETo.pdf>.
- [14] Sinclair T R, Seligma N. Criteria for publishing papers on crop modeling[J]. Field Crops Research, 2000, 68(3):165-172.
- [15] Resenthal W D, Hillel D. Climate change and the global harvest[M]. New York:Oxford University,1998.
- [16] 玛丽艳姑丽·阿西穆,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等. 基于 Markov 模型的植被覆盖动态变化预测研究[J]. 水土保持研究,2013,20(1):121-124.
- [17] Theodore C Hsiao, Lee Heng, Pasquale Steduto, et al. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):448-459.
- [18] Hamid J Farahani, Gabriella Izzi, et al. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):469-476.
- [19] Geerts S, Raes D, Garcia M, et al. Modeling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(11):1652-1658.
- [20] 刘战东,高阳,巩文军,等. 冬小麦冠层降雨截留过程及其模拟研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):53-58.

(上接第 91 页)

- [2] 张彩云,于法展,李岚,等. 徐州市城区绿地土壤碳储量格局及养分特征[J]. 水土保持研究,2012,19(1):120-124.
- [3] 孙本信,李敏,白史. 绿地草坪[M]. 北京:中国林业出版社,1999:15-22.
- [4] 胡化广,张振铭. 灌溉对草坪草蒸散和坪用质量的影响[J]. 节水灌溉,2012(10):49-55.
- [5] 王跃栋. 不同灌水量对三种冷型草坪草蒸散量和草坪质量的影响研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010:16-18.
- [6] 科学技术部农村科技司. 中国现代节水高效农业技术发展战略[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2006.
- [7] 尹秀莲. 中国城市水资源的现状与出路[J]. 吉林省经济管理干部学院学报,2008,22(1):40-42.
- [8] 李海防,卫伟,陈利顶,等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J]. 水土保持研究,2013,20(1):287-193.
- [9] 杨建. 北京地区不同灌溉量对草坪草生长的影响[D]. 北京:北京林业大学,2005:5-6.
- [10] 刘洪禄. 城市绿地节水技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:123-132.
- [11] 傅琳. 微灌工程技术指南[M]. 北京:水利水电出版社,1988:33-36.
- [12] 白丹,魏小抗,王凤翔,等. 节水灌溉工程技术[M]. 西安:陕西科技出版社,2001:26-50.
- [13] 康绍忠. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M]. 北京:水利水电出版社,1991:55-61.