doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.017

基于区域畦灌模拟模型的参数随机模拟方法比较

董勤各[1]　许　迪[2]　李益农[2]　章少辉[2]　白美健[2]

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对区域畦灌随机模拟模型中直接蒙特卡洛模拟方法存在的抽样重复性及收敛性较差等问题,借助仅考虑土壤特性空间随机性的区域畦灌随机模拟模型,研究拉丁超立方模拟、修正拉丁超立方模拟与直接蒙特卡罗模拟在抽样精确性、区域畦灌模拟计算收敛性、准确性、稳定性和计算效率等方面的差异。结果表明:修正拉丁超立方模拟和拉丁超立方模拟能够很好地表征土壤干容重的区域分布特征,抽样精确性较高。修正拉丁超立方模拟收敛速度最快,能够显著改善抽样质量,模拟准确性与分布形态优于拉丁超立方模拟与直接蒙特卡洛模拟。修正拉丁超立方模拟具有比拉丁超立方模拟与直接蒙特卡洛模拟更好的稳定性。基于修正拉丁超立方的区域畦灌随机模拟模型计算效率比拉丁超立方抽样和直接蒙特卡洛模拟分别提高 0.23 倍和 1.80 倍,说明修正拉丁超立方模拟能够解决原有模拟方法计算效率较低的问题,有助于缩短计算时间,降低计算成本。

关键词: 土壤特性; 空间变异; 蒙特卡洛模拟; 畦灌性能

中图分类号: S275.3; S147.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)12-0130-09

Comparison of Stochastic Parameter Simulation Methods Based on Regional Scale Border Irrigation Numerical Model

Dong Qin'ge[1]　Xu Di[2]　Li Yinong[2]　Zhang Shaohui[2]　Bai Meijian[2]

(1. *Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The uncertainty of border irrigation parameters will directly affect the simulation results of border irrigation flow model for surface irrigation management at regional scale. Latin hypercube sampling (LHS), updated Latin hypercube sampling (ULHS) and simple Monte Carlo sampling (SMCS) are studied in sampling convergence, stability and simulation efficiency based on regional scale border irrigation simulation method and soil properties spatial randomness. In terms of the sampling accuracy, ULHS and LHS can satisfactorily represent the statistical characteristics of soil bulk density. In the simulation convergence aspect, ULHS has the faster convergence than LHS and SMCS, which indicates that ULHS can significantly improve the sampling quality and reduce the sampling frequency. In the simulation accuracy, simulation times of ULHS are less than those of LHS and SMCS, simulation accuracy and distribution pattern are better than those of LHS and SMCS. Stability simulation of ULHS is better than those of LHS and SMCS. Computational efficiency of ULHS is increased by 0.23-fold and 1.8-fold than those of LHS and SMCS, respectively. Convergence rate of ULHS is faster than those of LHS and SMCS. In addition, ULHS can improve computational efficiency and sampling stability. ULHS can help to improve the simulation performance of regional scale border irrigation stochastic simulation model.

Key words: soil properties; spatial variability; Monte Carlo simulation; border irrigation performance

收稿日期: 2016-07-08　修回日期: 2016-10-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102904、2011AA100505)、国家自然科学基金项目(51609237)、中科院"西部之光"项目(XAB2015B04)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452016104)

作者简介: 董勤各(1982—),男,助理研究员,博士,主要从事畦沟灌地表-土壤水流、水盐运移模拟研究,E-mail: qgdong2011@163.com

通信作者: 许迪(1957—),男,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事灌溉技术理论与方法研究,E-mail: xudi@iwhr.com

引言

通过田间试验精确评价区域灌溉性能具有挑战性，这是因为土壤特性、畦田规格、灌水流量等技术要素存在空间随机性，导致完全获得区域灌溉水流运动数据耗时费力成本高。模型模拟是研究灌溉地表水流运动过程的重要工具，能够很好地弥补田间试验难以大量开展的不足[1-2]。区域灌溉模拟模型可分为 3 类：①确定性区域灌溉模型，将区域尺度灌溉技术要素的算术或几何平均值，输入给田块尺度灌溉数值模型，模拟区域农田水文过程。该模型能够简单快速模拟评价区域灌溉性能，但未考虑灌溉技术要素的空间随机性，模拟精度差。②分布式区域灌溉模型，将分布式方法与田块尺度灌溉模型紧密结合，模拟区域农田水文过程[1-2]。该模型开展若干次子区域灌溉过程模拟后，加权计算区域畦灌性能，模拟精度有所提高，但子区域划分依据的选择与子区域内灌溉技术要素均值化处理方式，均易导致区域灌溉性能被过高或过低估计。③基于参数随机模拟的区域灌溉模型，将参数随机模拟方法与田块尺度灌溉模型紧密结合，模拟区域农田水文过程[3]。该模型随机抽取的模型参数值能很好表征灌溉技术要素的空间随机性，可有效解决分布式区域灌溉模型模拟值被高估或低估的问题。

基于参数随机模拟的区域灌溉模型（区域灌溉随机模拟模型），主要由田块尺度灌溉模型和基于概率分布函数的参数随机模拟方法两部分构成[3]。基于 Saint－Venant 方程或其简化形式与 Richards 方程构建的田块尺度地面灌溉模型，可从物理机制上建立起地表水与土壤水系统之间的互动关系，能够为区域地面灌溉模拟提供技术工具。目前，常采用的参数随机模拟方法包括直接蒙特卡洛模拟（Simple Monte Carlo sampling，SMCS）[4-5]、拉丁超立方模拟（Latin hypercube sampling，LHS）与修正拉丁超立方模拟（Updated Latin hypercube sampling，ULHS）等方法[6-12]。SMCS 通过随机抽取大量样本表征抽取对象的实际物理意义，但在输入模型模拟计算时，包含较大比例相同的数值模拟过程，易导致区域模拟计算效率低、稳定性较差等问题，故在考虑参数实际意义和随机性质基础上，从参数不确定性范围内抽取的参数值样本量是可以减小的，而 LHS 和 ULHS 正好拥有提供小样本约束采样方案的特征[13]。LHS 与 ULHS 在岩土工程、机械工程等领域是表现最好的 Monte－Carlo 方法。而在区域灌溉随机模拟评价方面，SMCS、LHS 和 ULHS 对区域灌溉模拟计算效率与模拟稳定性的影响如何，目前鲜见相关研究成果。

本文阐述区域畦灌随机模型模拟流程与 3 种参数随机模拟方法，介绍区域畦灌试验方案与数据统计分析特征，并从参数随机模拟方法的抽样准确性、收敛性和稳定性等方面研究 3 种参数随机模拟方法的差异，确定更适用于区域畦灌随机模拟模型的参数随机模拟方法，为区域畦灌性能模拟评价提供精准的技术工具。

1　区域畦灌随机模拟模型

1.1　区域畦灌随机模拟过程

由于区域畦田耕作与管理措施相似，畦田坡度、田面糙率系数与畦田微地形高程标准差可认为基本相同。因此，开展区域尺度畦灌数值模拟时，主要考虑具有空间随机性的土壤特性、畦田长度、入畦单宽流量、畦田微地形高低起伏状况对畦灌性能及其空间分布特征的影响。区域畦灌随机模拟模型主要借助田块尺度畦灌数值模型与参数随机模拟方法构建，实现过程如下（图 1）：

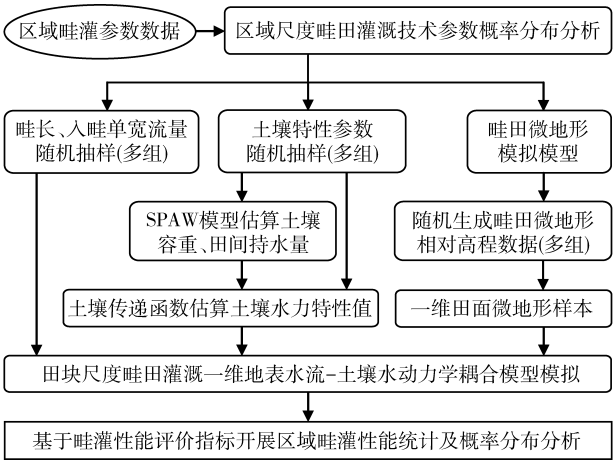

图 1　区域畦灌随机模拟过程

Fig. 1　Stochastic simulation processes of regional scale border irrigation

（1）通过田间试验或数据库收集上述畦灌技术要素具体数据，并进行概率分布函数拟合。

（2）基于畦田长度、入畦单宽流量概率分布函数，分别借助 SMCS、LHS 或 ULHS 随机抽样。

（3）基于土壤砂粒、粉粒、黏粒及有机质含量的概率分布函数，对上述变量分别借助 SMCS、LHS 或 ULHS 随机抽样，获取土壤砂粒、粉粒、黏粒与有机质含量的样本组合；将样本组合输入给 SPAW 模型[14]，得到与上述样本组合相匹配的土壤干容重（与土壤砂粒、黏粒及有机质含量呈现紧密的非线性关系，故不能通过土壤干容重概率分布函数直接抽样）；将上述土壤砂粒、黏粒、有机质含量及转换的土壤容重样本组合，输入给构建的土壤传递函数

或广泛应用的 Rosetta 人工神经网络模型[15]，转换为田间尺度畦灌数值模型所需的土壤水力特性参数值(饱和导水率、饱和含水率、残余含水率、参数 a、n、m)。

(4)通过畦田长度、宽度及田块尺度畦灌数值模型的地表单元格长度，确定田面相对高程数量，借助田面微地形随机模拟模型[16]，获得田面相对高程序列，并对其沿畦宽方向做均化处理与统计特征修正，作为一个畦田微地形高低起伏状况样本输入给田块尺度畦灌数值模型。

(5)重复步骤(2)~(4)，获得由畦田长度、入畦单宽流量、土壤水力特性参数值及畦田微地形高低起伏状况组成的样本组合，输入给田块尺度畦灌数值模型开展多次模拟工作。

(6)基于多次模拟数据，计算畦灌性能评价指标值，分析区域畦灌性能概率统计特征。

1.2 参数随机模拟方法

1.2.1 直接蒙特卡洛模拟

SMCS 是在(0，1)区间内随机产生均匀分布的随机数，然后根据变量概率分布函数反求其随机抽样值，如此反复进行，将产生 N 个随机值。当 N 趋向于无穷多次时，模拟变量的随机抽样相当于全样本抽样。因此，由 N 个随机抽样构成的集合也必然满足模拟变量的概率分布。

1.2.2 拉丁超立方模拟

拉丁超立方模拟的具体步骤为：

(1)确定模拟次数 N。

(2)将第 j 个输入变量 $x_j(j=1, 2, \cdots, M)$ 的累积分布函数 $F_j(x)$ 的范围分成 N 个不相连的区间 S_{ji} $(i=1, 2, \cdots, N)$，在每个区间内分别进行独立的等概率抽样。

(3)在(0，1)区间内生成 N 个随机数 $V_i(i=1, 2, \cdots, N)$，并将随机数 V_i 变换为第 i 个区间中的随机数 Q_i，即

$$Q_i = V_i/N + (i-1)/N \tag{1}$$

则有

$$(i-1)/N < V_i < i/N \tag{2}$$

其中，$(i-1)/N$ 和 i/N 是第 i 个区间的下界和上界。因此，每个区间上仅生成一个随机数 Q_i。

(4)求得约束随机数 Q_i 后，采用反变换法，即可求得相应的随机变量值，计算式为

$$X_{ij} = F_j^{-1}(Q_i) \tag{3}$$

式中 $F_j^{-1}()$——第 j 个输入变量的逆累积分布函数

1.2.3 修正拉丁超立方模拟

修正拉丁超立方模拟的具体实现步骤如下：

(1)在一个 M 维单位立方体$[0, 1]^M$的输入空间中选取 N 个抽样点，将每个一维坐标区间均等分为 N 个子区间，用标号 i 记小区间$[(i-1)/N, i/N]$，用 R_{ji} 记作第 j 维坐标的 N 个区间标号的一个随机排列，则得到一个 $N \times M$ 维随机排列矩阵 $\boldsymbol{R} = (R_{ji})$，$R_{ji}$ 为矩阵 $\boldsymbol{R}$ 第 i 行 j 列的区间秩数。

(2)采用排列矩阵 $\boldsymbol{T}$ 描述随机矩阵 $\boldsymbol{R}$ 各列间统计相关，可知 $\boldsymbol{T}$ 为一个 M 维对称矩阵。矩阵 $\boldsymbol{T}$ 各个元素 T_{ij} 计算式为

$$T_{ij} = 1 - \left(6\sum_{i=1}^{n} d_i^2\right) \Big/ [N(N-1)(N+1)] \tag{4}$$

式中 d_i——2 个样本排列的序差

N——样本容量

(3)对排列矩阵 $\boldsymbol{T}$ 进行 Cholesky 分解，得到下三角矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 并求逆 $\boldsymbol{Q}^{-1}$，计算新随机矩阵 $\boldsymbol{R}_b = \boldsymbol{R}\boldsymbol{Q}^{-1}$。

(4)重复步骤(2)、(3)，直到排列矩阵 $\boldsymbol{T}$ 达到预设的精度(接近于单位矩阵)为止，获得统计相关性很小的随机排列矩阵 $\boldsymbol{R}_L$。

(5)将(0，1)区间内生成的随机数 U_{ji} $(i=1, 2, \cdots, N; j=1, 2, \cdots, M)$ 转换为第 i 个区间 S_{ji} 的随机数 Q_{ji}

$$Q_{ji} = U_{ji}/N + (R_{ji}-1)/N \tag{5}$$

(6)以 $F_j^{-1}()$ 表示第 j 个输入变量的逆累积分布函数，并求得相应随机变量 x_{ji}

$$x_{ji} = F_j^{-1}(Q_{ji}) \quad (i=1, 2, \cdots, N; j=1, 2, \cdots, M) \tag{6}$$

2 田间试验与模拟方案

2.1 田间试验与数据分析

田间试验在山东省东营市麻湾灌区(图 2)开展，试验区面积 76 hm^2。麻湾灌区地处黄河下游滨海地区，属暖温带季风型大陆性气候，多年平均降水量为 537.4 mm。粮食作物以冬小麦与夏玉米连作为主。试验区内 0~120 cm 土层主要为黏壤土。作物采用条畦灌溉方式，水源为黄河引水。畦灌试验于 2012 年 3 月份开展，试验区域包括 272 块畦田。

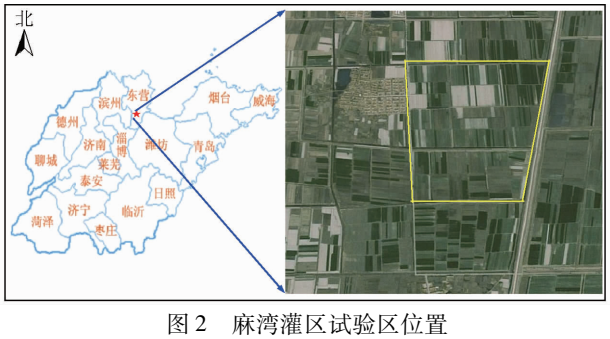

图 2 麻湾灌区试验区位置

Fig. 2 Location of experimental area in Mawan Irrigation District

采用工程测量绳测定畦田长度与宽度，便携式自动流量计测定入畦流量。畦灌前，采用自动对焦水准仪试验田观测选取的 100 块畦田（兼顾试验区畦田特征的代表性与全面性）的田面高程，以掌握畦田微地形状况与坡度。畦灌时，灌溉水流推进到畦尾时关闭。畦灌前 1 d 与畦灌后 2 d，在选取的 100 块畦田的畦首、畦中与畦尾处，均沿垂向分 4 层（0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 70 cm 及 70 ~ 120 cm）采集土样，测定土壤理化特性。

畦灌性能主要受畦田规格、田面微地形状况、土壤特性与入畦单宽流量等畦灌技术参数影响。根据研究区内畦田分布与耕作管理特性，畦田长度与宽度基本呈现正态分布特征（图 3），均值与标准差分别为 120、33.6 m 与 9、1.98 m。

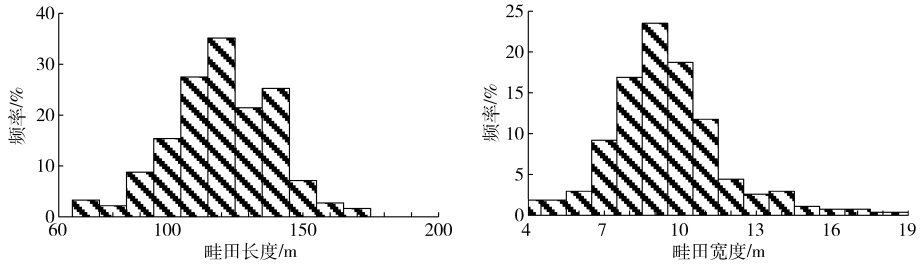

图 3　麻湾灌区畦田长度与宽度频率分布

Fig. 3　Frequency distribution of border length and width in Mawan Irrigation District

根据观测的入畦流量与畦田宽度，计算每块畦田的入畦单宽流量，经 Kolomogorov – Smirnov 方法检验[17]，入畦单宽流量呈现明显正态分布统计特征，均值为 3.12 L/（s·m），标准差为 0.47；研究区内土壤砂粒、粉粒、黏粒含量、土壤有机质含量与土壤干容重均呈现正态分布特征（表 1）。

表 1　麻湾灌区试验田土壤特性统计特征值

Tab. 1　Statistical characteristics values of soil properties in experimental area of Mawan Irrigation District

土壤质地	土壤特性	最小值	最大值	均值	变异系数	分布类型
黏壤土	砂粒质量分数/%	3.42	36.23	14.12	0.28	正态分布
	粉粒质量分数/%	19.45	76.11	63.62	0.61	
	黏粒质量分数/%	6.99	35.72	19.91	0.26	
	有机质含量/%	0.63	1.59	1.13	0.37	
	干容重/（$g\cdot cm^{-3}$）	1.13	1.64	1.41	0.24	

由于研究区内采用相似的农田耕作管理方式，100 块畦田的田面相对高程标准差均比较一致，田面相对高程标准差均值及其标准差分别为 4.06 cm 与 0.12 cm，块金值（C_0）为 3.46 cm^2，基台值（$C_0 + C$）为 16.48 cm^2，变程为 23.13 m。依据美国农业干旱研究中心的研究成果，畦灌过程中的田面糙率系数一般可参照作物长势获得[18-19]，故通过参考其提供的数据库，试验田面糙率系数为 0.13。畦面坡度近似为 0.6‰。

2.2　参数随机模拟方法对比方案

为便于分析 3 种参数随机模拟方法的适用性，基于麻湾灌区试验数据，假定一个理想化的区域畦田灌溉试验方案。区域内每块畦田的长度、坡度、田面糙率与微地形高程起伏状况、入畦单宽流量均假定相同（恒定值），仅考虑具有空间随机性的土壤特性对区域畦灌性能的影响。

土壤水力特性直接受土壤砂粒、粉粒、黏粒及有机质含量影响，因此，土壤水力特性参数值可由相互独立的土壤砂粒、黏粒和有机质含量拟合表达[4]。首先，根据拟合统计得到的土壤砂粒、黏粒及有机质含量的概率分布函数，采用参数随机模拟方法随机抽样，获取土壤砂粒、黏粒及有机质含量的样本组合，输入 SPAW 模型[14]，得到相匹配的土壤干容重（土壤干容重受土壤砂粒、粉粒、黏粒及有机质含量影响，直接通过其概率分布函数抽取，存在与土壤砂粒、粉粒、黏粒及有机质含量不匹配的情形）。然后，将随机抽取的土壤砂粒、黏粒、有机质含量样本及转换的土壤干容重样本，输入 Rosetta 人工神经网络模型[15]，转换为田块尺度数值模型所需的土壤水力特性参数值。最后，重复上述步骤多次，将获得的土壤水力特性参数值及其他模型参数恒定值，输入田块尺度畦灌数值模型开展模拟工作，并借助模拟数据计算畦灌性能评价指标值。

采用一维地表水流–土壤水动力学耦合模型作为田块尺度畦灌模拟模型[20-21]。该模型采用 Saint – Venant 方程组计算畦灌地表水流过程[17]，利用 Richards 方程计算土壤水动力学过程[22-23]，采用 van Genuchten 模型拟合土壤水力特征曲线[24]，使用

改进的内迭代耦合方法耦合畦灌地表与土壤水流模块,具有良好的模拟稳定性和数值计算精度[20,25]。开展数值模拟时,模型所需土壤水力特性参数值借助 SMCS、LHS 或 ULHS 随机抽取土壤特性样本后间接获取(表 2)。其他模型参数值为:畦田纵坡为 0.6‰,糙率系数为 0.13,入畦单宽流量均为 4.50 L/(s·m),水流推进到尾部停止供水,畦长均为 100 m,尾部闭口;不考虑畦田微地形状况。

表 2 情景模拟下土壤特性统计特征值

Tab. 2 Statistical characteristics values of soil properties for numerical simulation

土壤质地	土壤特性	最小值/%	最大值/%	均值/%	变异系数	分布类型
黏壤土	砂粒质量分数	3.42	36.23	14.12	0.28	正态分布
	粉粒质量分数	19.45	76.11	63.62	0.61	
	黏粒质量分数	6.99	35.72	19.91	0.26	
	有机质含量	0.63	1.59	1.13	0.37	

2.3 评价指标

2.3.1 畦灌性能评价指标

采用平均灌水水深、灌溉效率、灌溉均匀度作为畦灌性能评价指标[16]。灌溉效率通常是指一次灌水存储在耕作层内的平均水深和畦田平均灌溉水深之比。灌溉均匀度是反映灌水沿畦田长度方向的入渗分布均匀程度。灌溉均匀度越大,田块内各点土壤储存水分的均匀性就越好。

灌溉效率 E_a 的计算式为

$$E_a = \frac{Z_{sto}}{Z_{avg}} \times 100\% \tag{7}$$

其中

$$Z_{sto} = (\theta_a - \theta_b) R_D \tag{8}$$

式中 Z_{sto}——入渗并储存在单个田块耕作层内的平均灌水水深,cm

Z_{avg}——单个田块平均灌溉水深,cm

θ_a、θ_b——灌水前、灌水后耕作层内平均土壤体积含水率,cm^3/cm^3

R_D——耕作层土壤深度,cm

灌溉均匀度包含分布均匀系数 D_U 与灌溉均匀系数 C_U 2 个度量指标,其计算式分别为

$$D_U = \frac{Z_Q}{Z_{avg}} \times 100\% \tag{9}$$

$$C_U = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_b} |Z_i - Z_{avg}|}{N_b Z_{avg}}\right) \times 100\% \tag{10}$$

式中 Z_Q——平均入渗水量最少的 1/4 畦段的平均灌水水深,cm

Z_i——第 i 节点实际灌水水深,cm

N_b——畦田测点数量

2.3.2 区域畦灌模型模拟性能评价指标

区域畦灌性能评价指标均值计算式为

$$\overline{X}_{k+1} = \frac{\overline{X}_k k + X_{k+1}}{k+1} \quad (k = 1, 2, \cdots, N-1) \tag{11}$$

式中 X_{k+1}——基于第 $k+1$ 个参数样本模拟计算的畦灌性能评价指标值

$\overline{X}_k$——基于第 1 ~ k 个参数样本模拟计算的畦灌性能评价指标值的均值

当模拟次数达到一定数量后,畦灌性能评价指标值均值和标准差将趋于稳定。如果以连续 6 个数据点的 $M_{AREk} < 0.5\%$ 和 $R_{AREk} < 5\%$ 作为均值和标准差达到稳定状态的判别指标,则可确定畦灌性能评价指标值均值及相应标准差。M_{AREk} 和 R_{AREk} 的计算公式分别为

$$M_{AREk} = \left| \frac{\overline{X}_{k+1} - \overline{X}_k}{\overline{X}_k} \right| \times 100\% \tag{12}$$

$$R_{AREk} = \left| \frac{S_d^{k+1} - S_d^k}{S_d^k} \right| \times 100\% \tag{13}$$

式中 M_{AREk}——第 $k+1$ 与第 k 个畦灌性能评价指标值均值的相对误差

R_{AREk}——$k+1$ 个畦灌性能评价指标值的标准差与 k 个的相对误差

S_d^k——k 个畦灌性能评价指标值的标准差

LHS 和 ULHS 与 SMCS 之间畦灌性能评价指标均值收敛值的相对误差 R_E 计算式为

$$R_E = \left| \frac{\overline{X}_L - \overline{X}_{\mathrm{MCS}}}{\overline{X}_{\mathrm{MCS}}} \right| \times 100\% \tag{14}$$

式中 $\overline{X}_L$——LHS 或 ULHS 对应的畦灌性能评价指标均值收敛值

$\overline{X}_{\mathrm{MCS}}$——SMCS 对应的畦灌性能评价指标均值收敛值

均值约束条件下畦灌评价指标比率 P_f 计算式为

$$P_f = P\{X_k \geqslant \overline{X}_N\} = M/N \tag{15}$$

式中 M——畦灌性能评价指标值大于等于均值收敛值的个数($M \leqslant N$)

$\overline{X}_N$——畦灌性能评价指标均值收敛值

均值约束条件下畦灌评价指标比率的变异系数 C_v 计算式为

$$C_v = \frac{\frac{1}{N}\sqrt{\sum_{k=1}^{N} (X_k - \overline{X}_N)^2}}{\overline{X}_N} \tag{16}$$

计算效率是指单位时间内完成的模拟计算工作量。假设不同抽样方法下畦灌性能评价指标均值达到稳定状态时的单次模拟时间相同，则计算效率 E 的表达式为

$$E=\frac{1}{NT} \tag{17}$$

式中　T——单次模拟时间，单次模拟平均用时约为 0.31 min

3　结果与分析

主要分析 SMCS、LHS、ULHS 3 种随机模拟方法在区域畦灌模拟评价方面的差异性，因此主要研究三者在区域畦灌随机模拟时展现的特征，不直接与田间试验结果比较。同时，由于 SMCS 是传统成熟的大样本随机模拟方法，因此在三者之间进行相对比较时，以 SMCS 为基准。

3.1　抽样精确性

由 1 200 次模拟时 3 种随机模拟方法得到的土壤容重统计结果（图 4）可以看出，ULHS 和 LHS 的抽样数据和输入的正态分布函数具有良好的拟合性，而 SMCS 的抽样数据则包含了噪声。

3.2　模拟计算收敛性

由 1 200 次模拟时 3 种随机模拟方法得到的畦灌性能评价指标值均值-模拟次数曲线（图 5 ~ 7）可以看出，SMCS、LHS 和 ULHS 下畦灌性能评价指标均值收敛到稳定值所需模拟次数越来越少。

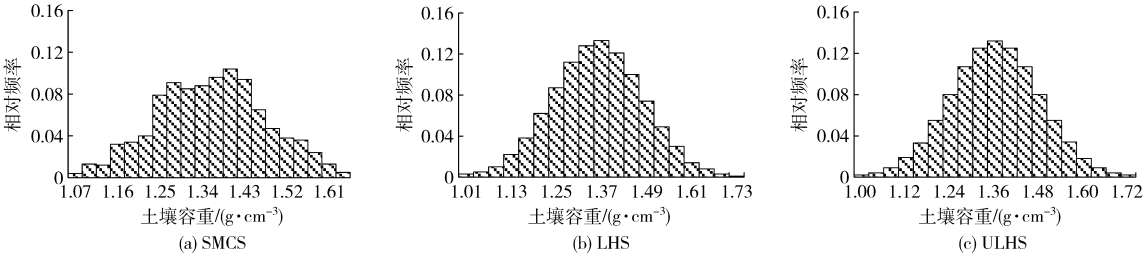

图 4　1 200 次抽样的土壤容重直方图

Fig. 4　Soil bulk density histograms based on 1 200 sampling

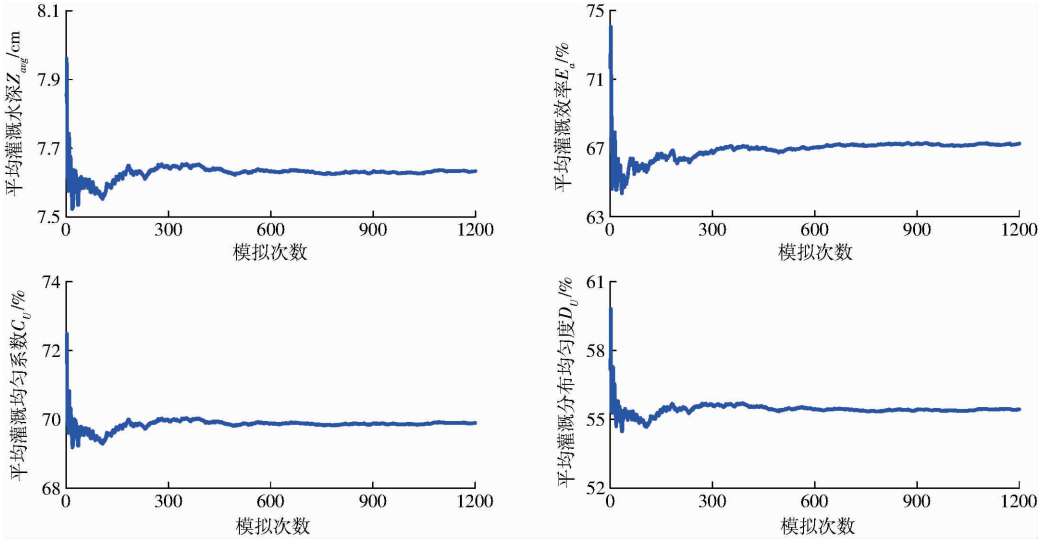

图 5　SMCS 模拟下畦灌评价指标均值-模拟次数曲线

Fig. 5　Curves of border irrigation evaluation index mean values and simulation times based on SMCS

由表 3 可知，SMCS 模拟 610 次左右，4 个畦灌性能评价指标均值都已经收敛，而 LHS 和 ULHS 则分别在模拟 270 次和 220 次左右，4 个畦灌性能评价指标均值已经收敛。修正拉丁超立方模拟的收敛速度快于拉丁超立方模拟及直接蒙特卡洛模拟，表明修正拉丁超立方模拟能够显著改善抽样质量，减少抽样次数。

3.3　模拟计算准确性

畦灌性能评价指标均值收敛值和标准差见表 4。可以看出，LHS 和 ULHS 的收敛值和 SMCS 的相互误差非常小。这说明通过 LHS 和 ULHS 得到畦灌性能评价指标收敛值时，不仅能减少模拟次数，还能具有和 SMCS 相同的模拟准确性。另外，3 种随机模拟方法下畦灌性能评价指标均值收敛时对应的指标值累积概率曲线具有良好的一致性（图 8）。

3.4　模拟稳定性

图 9 从畦灌性能评价指标均值稳定性与样本容量关系角度表明 LHS 和 ULHS 具有比 SMCS 更好的

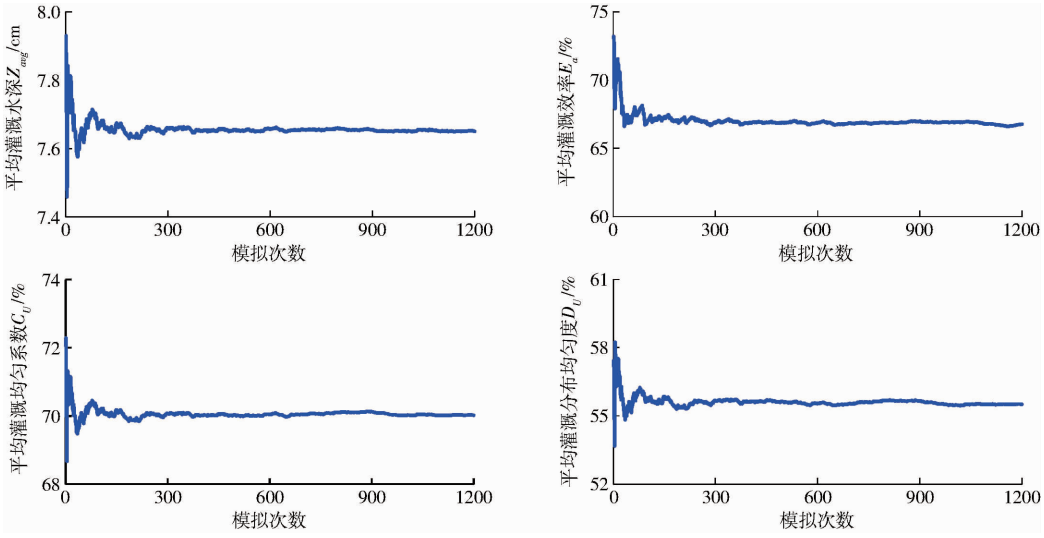

图 6 LHS 模拟下畦灌评价指标均值-模拟次数曲线

Fig. 6 Curves of border irrigation evaluation index mean values and simulation times based on LHS

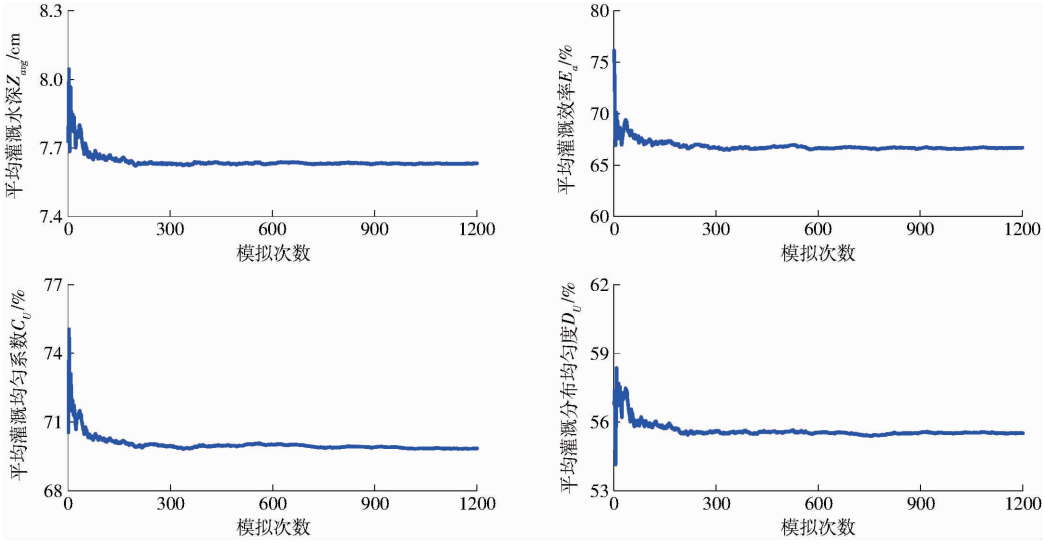

图 7 ULHS 模拟下畦灌评价指标均值-模拟次数曲线

Fig. 7 Curves of border irrigation evaluation index mean values and simulation times based on ULHS

表 3 3 种参数随机模拟方法下畦灌性能评价指标均值收敛时的模拟次数

Tab. 3 Simulation times of three stochastic simulation methods under condition of mean value convergence of border irrigation evaluation indexes 次

抽样方法	Z	E_a	C_U	D_U	最大值
SMCS	530	610	410	460	610
LHS	250	270	240	240	270
ULHS	220	190	190	200	220

抽样稳定性。表 5 为 3 种随机模拟方法各抽取 1 000 个样本 50 次模拟得到的均值约束条件下畦灌评价指标比率变异系数。可以看出,LHS 和 ULHS 下的区域畦灌性能评价指标比率变异系数均小于 SMCS,而 ULHS 又小于 LHS。这说明 ULHS 法具有比 LHS 和 SMCS 法更好的抽样稳定性。

3.5 模拟计算效率

3 种随机模拟方法下畦灌性能评价指标均值达到稳定状态时的模拟次数见图 5 ~ 7。在此基础上,表 6 为 3 种随机模拟方法下畦灌性能评价指标均值收敛时的计算效率。LHS 和 ULHS 下的计算效率比 SMCS 分别提高 1.30 和 1.80 倍左右,ULHS 下的计算效率比 LHS 提高 0.23 倍左右。

4 结束语

与直接蒙特卡洛模拟和拉丁超立方模拟相比,修正拉丁超立方模拟在抽样精确性、计算收敛性及模拟计算准确性均显著占优,同时具备最高计算效率与最强模拟稳定性。对 3 种随机模拟方法 1 200 次抽取土壤干容重数据进行统计特征分析,修正拉丁超立方模拟和拉丁超立方模拟的抽样数据能够很好地表征土壤干容重区域分布特征。修正拉丁超立方模拟在模拟次数少于拉丁超立方模拟及直接蒙特卡洛模拟时,其模拟准确性与分布形态显著占优,且

表 4　3 种随机模拟方法下畦灌性能评价指标均值收敛值 u 与均值标准差 S_d

Tab. 4　Mean convergence value u and standard deviation S_d of border irrigation performance evaluation from three stochastic simulation methods

抽样方法	样本量	Z		E_a		C_U		D_U	
		u	S_d	u	S_d	u	S_d	u	S_d
SMCS	610	7. 63	0. 541	0. 668	0. 097	0. 697	0. 039	0. 554	0. 061
	1 200	7. 63	0. 547	0. 670	0. 100	0. 696	0. 039	0. 554	0. 061
LHS	270	7. 64	0. 576	0. 670	0. 104	0. 697	0. 041	0. 554	0. 065
	1 200	7. 63	0. 566	0. 668	0. 106	0. 696	0. 042	0. 555	0. 064
ULHS	230	7. 63	0. 541	0. 668	0. 105	0. 698	0. 040	0. 555	0. 061
	1200	7. 63	0. 546	0. 667	0. 105	0. 697	0. 040	0. 555	0. 062

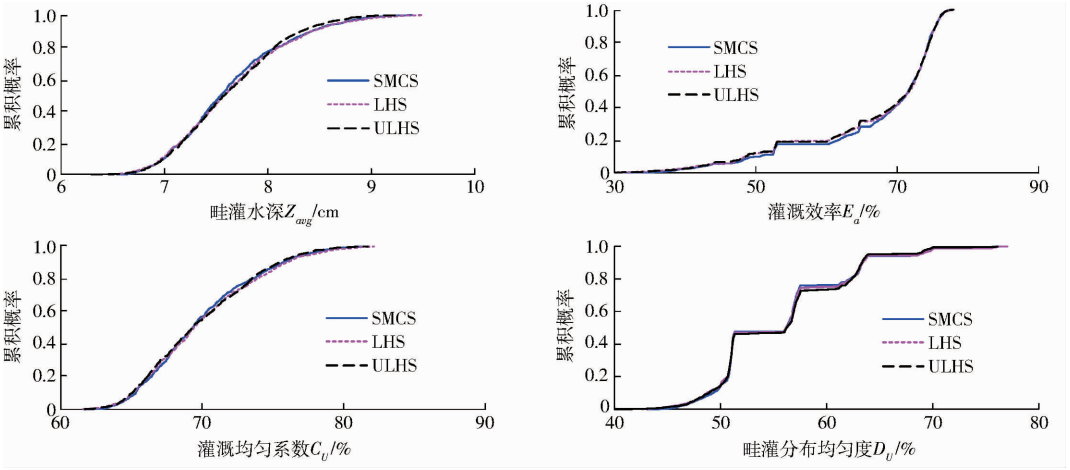

图 8　不同畦灌评价指标值累积概率曲线

Fig. 8　Cumulative probability curves of different border irrigation evaluation index values

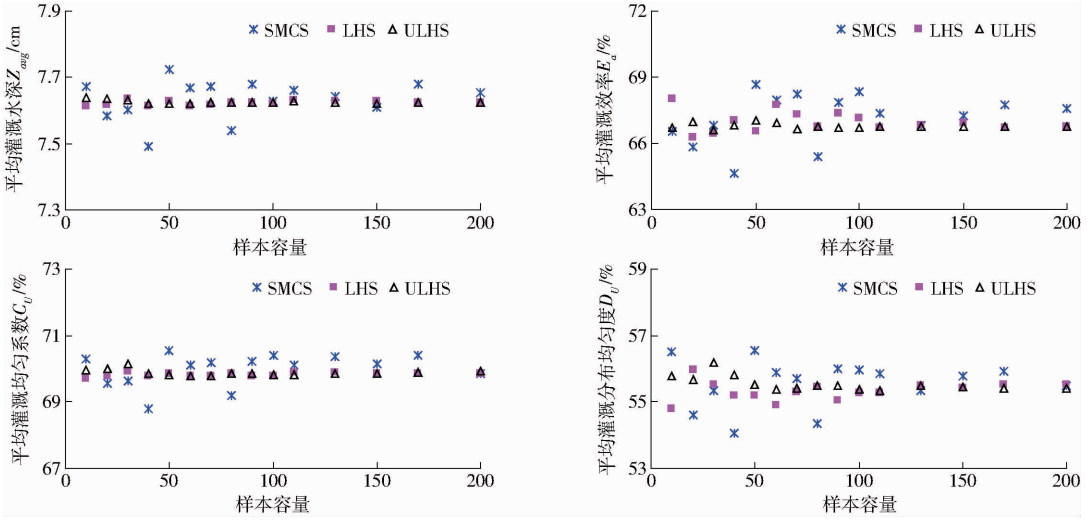

图 9　不同畦灌评价指标均值与样本容量关系

Fig. 9　Relationships between mean values of different border irrigation evaluation indexes and corresponding sample sizes

表 5　3 种随机模拟方法各抽取 1 000 个样本 50 次模拟得到的均值约束条件下畦灌评价指标比率变异系数

Tab. 5　Ratio variation coefficients of border irrigation evaluation indexes under mean constraint condition based on 1 000 samples taken 50 times from three stochastic simulation methods

抽样方法	Z_{avg}	E_a	C_U	D_U
SMCS	0. 099	0. 034	0. 093	0. 062
LHS	0. 052	0. 026	0. 056	0. 043
ULHS	0. 048	0. 023	0. 052	0. 039

表 6 3 种随机模拟方法下畦灌性能评价指标均值收敛时的计算效率

Tab. 6 Computational efficiency of three stochastic simulation methods under condition of border irrigation evaluation index mean convergence

抽样方法	Z	E_a	C_U	D_U	最优值
SMCS	0.005 8	0.005 4	0.007 7	0.006 5	0.005 4
LHS	0.012 6	0.012 4	0.013 5	0.012 5	0.012 4
ULHS	0.013 9	0.017 2	0.016 9	0.015 0	0.013 9

具有比拉丁超立方模拟及直接蒙特卡洛模拟更好的稳定性。修正拉丁超立方模拟完成 1 次区域畦灌模拟计算效率较拉丁超立方模拟与直接蒙特卡洛模拟分别提高 0.23 倍与 1.80 倍,有助于缩短计算时间、降低计算成本。因此,在构建区域尺度畦灌随机模拟模型时,选取修正拉丁超立方模拟作为畦灌技术参数的随机模拟方法最合适。

参 考 文 献

1 PAYDAR Z, GALLANT J. A catchment framework for 1-D models introducing FLUSH and its application[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(13): 2094 - 2104.

2 AWAN U K, TISCHBEIN B, MARTIUS C. Combining hydrological modeling and GIS approaches to determine the spatial distribution of groundwater recharge in an arid irrigation scheme[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 793 - 806.

3 SKONARD C J. A field-scale furrow irrigation model[D]. Nebraska: University of Nebraska, 2002.

4 JARED L D, CLAYTON V D. Latin hypercube sampling with multidimensional uniformity[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2012, 142(3): 763 - 772.

5 吴振军, 王水林, 葛修润. LHS 方法在边坡可靠度分析中的应用[J]. 岩土力学,2010, 31(4):1047 - 1054.
WU Zhenjun, WANG Shuilin, GE Xiurun. Application of Latin hypercube sampling technique to slope reliability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1047 - 1054. (in Chinese)

6 BUDIMAN M, ALEX B M. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(9): 1378 - 1388.

7 RAD M R P, TOOMANIAN N, KHOEMALI F, et al. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran[J]. Geoderma, 2014, 232 - 234: 97 - 106.

8 SHIELDS M D, ZHANG Jiaxin. The generalization of Latin hypercube sampling[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 148: 96 - 108.

9 ALEŠ F. An efficient sampling scheme: updated Latin hypercube sampling[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1992, 7(2): 123 - 130.

10 GODA T, SATO K. History matching with iterative Latin hypercube samplings and parameterization of reservoir heterogeneity[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 114: 61 - 73.

11 CLIFFORD D, PAYNE J E, PRINGLE M J, et al. Pragmatic soil survey design using flexible Latin hypercube sampling[J]. Computers & Geosciences, 2014, 67(3): 62 - 68.

12 MULDER V L, DE BRUIN S, SCHAEPMAN M E. Representing major soil variability at regional scale by constrained Latin hypercube sampling of remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 21(1): 301 - 310.

13 万越, 吕震宙, 袁修开. 基于 Latin 方抽样和修正的 Latin 方抽样的可靠性灵敏度估计及其方差分析[J]. 机械强度, 2008, 30(6): 927 - 934.
WAN Yue, LÜ Zhenzhou, YUAN Xiukai. Latin hypercube sampling and updated Latin hypercube sampling method for reliability sensitivity and its variance analysis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(6): 927 - 934. (in Chinese)

14 ŠIMŮNEK B J, VAN GENUCHTEN M T, SENJA M. The HYDRUS - 2D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media[R]. University of California-Riverside Research Reports, 2008.

15 SAXTON K E, RAWLS W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1569 - 1578.

16 BAI M J, XU D, LI Y N, et al. Stochastic modeling of basins microtopography: analysis of spatial variability and model testing[J]. Irrigation Science, 2010, 28: 157 - 172.

17 LILLEFORS H. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown[J]. Journal of the American Statistical Association, 1967, 62(318): 399 - 402.

18 BAUTISTA E, CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, et al. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7): 1146 - 1154.

19 BAUTISTA E, CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, et al. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—example application[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7): 1162 - 1169.

(下转第 91 页)

RNG $k-\varepsilon$ turbulent model with wall function law[J]. Advances in Water Science,2004,15(1):109 - 112. (in Chinese)
9 张仁田. 双向泵站进水流道优化水力设计与试验研究[J]. 农业机械学报, 2003,34(6):73 - 76, 72.
ZHANG Rentian. Optimum hydraulic design and experiment for dual-directional inlet passage in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6):73 - 76, 72. (in Chinese)
10 刘军. 竖井式贯流泵装置水力特性及优化设计研究[D]. 扬州:扬州大学, 2010.
LIU Jun. Study on hydraulic characteristic and optimization design of pit tubular pump system[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese)
11 刘君,郑源,周大庆,等. 前、后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):32 - 38.
LIU Jun, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):32 - 38. (in Chinese)
12 徐磊,陆林广,陈伟,等. 南水北调工程邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J]. 农业工程学报,2012, 28(6): 50 - 56.
XU Lei, LU Linguang, CHEN Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou Pumping Station in South-to-North Water Diversion Project[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 50 - 56. (in Chinese)
13 杨帆,刘超,汤方平,等. 竖井型线演变及对泵装置水力性能的影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014,22(1): 129 - 139.
YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Shaft shape evolution and analysis of its effect on the pumping system hydraulic performance [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(1):129 - 139. (in Chinese)
14 徐磊,陆林广,王海,等. 竖井式进水流道尺寸对水力性能的影响[J]. 水利水运工程学报,2014(5):47 - 52.
XU Lei, LU Linguang, WANG Hai, et al. Influence of control size of shaft inlet conduit on hydraulic performance[J]. Hydro-Science and Engineering,2014(5):47 - 52. (in Chinese)
15 王秋景, 郑源, 阚阚. 竖井贯流泵装置进出水流道优化分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(8): 132 - 135.
WANG Qiujing, ZHENG Yuan, KAN Kan. Inlet and outlet flow channel optimization analysis of shaft tubular pump system[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(8): 132 - 135. (in Chinese)
16 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(6):49 - 59.
LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):49 - 59. (in Chinese)
17 谢荣盛, 吴忠, 何勇, 等. 双向竖井贯流泵进出水流道优化研究[J]. 农业机械学报, 2015,46(10):68 - 74.
XIE Rongsheng, WU Zhong, HE Yong, et al. Optimization research on passage of bidirectional shaft tubular pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):68 - 74. (in Chinese)
18 张仁田,朱红耕,姚林碧. 竖井贯流泵不同出水流道型式的对比研究[J]. 水力发电学报,2014,33(1):197 - 201.
ZHANG Rentian, ZHU Honggeng, YAO Linbi. Comparison of shaft-type tubular pump systems with different outflow structures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(1):197 - 201. (in Chinese)
19 程千,冯卫民,周龙才,等. 前置导叶对轴流泵马鞍区工况回流涡特性的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(4):8 - 14.
CHENG Qian, FENG Weimin, ZHOU Longcai, et al. Effects of inlet guide vane on characteristics of backflow vortex in hump region of axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(4):8 - 14. (in Chinese)
20 杨帆,谢传流,刘超,等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水流道水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2016, 47(2): 15 - 21.
YANG Fan, XIE Chuanliu, LIU Chao, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2):15 - 21. (in Chinese)

(上接第 138 页)

20 董勤各, 许迪, 章少辉, 等. 一维畦灌地表水流-土壤水动力学耦合模型 Ⅰ:建模[J]. 水利学报,2013,44(5): 570 - 577.
DONG Qin'ge, XU Di, ZHANG Shaohui, et al. Coupled surface-subsurface hydrodynamic model for border irrigation Ⅰ, model development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 570 - 577. (in Chinese)
21 董勤各, 许迪, 章少辉, 等. 一维畦灌地表水流-土壤水动力学耦合模型 Ⅱ:验证[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 726 - 733.
DONG Qin'ge, XU Di, ZHANG Shaohui, et al. Coupled surface-subsurface hydrodynamic model for border irrigation Ⅱ, validation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 726 - 733. (in Chinese)
22 GARCÍA-NAVARRO P, PLAYÁN E, ZAPATA N. Solute transport modeling in overland flow applied to fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(1): 33 - 40.
23 MANZINI G, FERRARIS S. Mass-conservative finite volume methods on 2-D unstructured grids for the Richards' equation[J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(12): 1199 - 1215.
24 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 101 - 106.
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 101 - 106. (in Chinese)
25 BAUTISTA E, ZERIHUN D, CLEMMENS A J. Iterative coupling strategy for surface-subsurface flow calculations in surface irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010,136(10): 692 - 703.