

宁夏中部干旱带降水渗透深度预测模型研究

李红英^{1,2}, 马国飞^{1,2}, 金飞³, 段晓凤^{1,2}, 王静^{1,2},
马力文^{1,2}, 张晓煜^{1,2}

(1. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏银川 750002; 2. 宁夏气象科学研究所, 宁夏银川 750002;
3. 吴忠市气象局, 宁夏吴忠 751100)

摘要: 为掌握降水在宁夏中部干旱带天然草场土壤中的渗透情况, 引入根据土壤含水量增量变化确定渗透深度的方法, 并运用回归、逐步回归和相关分析等多种统计手段, 建立了不同土壤质地下降水渗透深度预测统计模型。结果表明: (1) 运用回归方法建立的渗透深度预测模型 (R^2 在 0.60 ~ 0.67) 比逐步回归预测模型 (R^2 在 0.49 ~ 0.58) 显著性好, 两种预测模型中降水量或降水日数的回归系数在置信度为 0.05 水平下均通过显著性检验。(2) 通过对两种预测模型预测结果与实测值的相关分析, 回归预测结果、逐步回归预测结果和实测值之间的相关系数达 0.70 以上, 特别是两种模型预测结果相关性显著 (相关系数 0.88 ~ 0.93), 从模型简单可用的角度考虑, 最终选用逐步回归预测模型。(3) 兴仁土壤土条件下预测效果较好 (81% ~ 100% 的样本相对误差均在 30% 左右或以下), 同心壤土预测效果中等 (55% ~ 60% 的样本相对误差小于 30%), 盐池粗砂土条件下效果一般 (约 50% 左右样本相对误差在 30% 及以下)。(4) 同时, 文中预测模型试验验证了不同土壤质地对降水渗透深度的影响, 当相同的降水过程下, 降水渗透深度大小顺序为粗砂土 > 沙壤土 > 壤土。

关键词: 降水; 渗透深度; 预测模型; 土壤质地; 天然草场; 宁夏

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Study on a forecasting model of precipitation penetration depth in the middle arid zone of Ningxia

LI Hong-ying^{1,2}, MA Guo-fei^{1,2}, JIN Fei³, DUAN Xiao-feng^{1,2},
WANG Jing^{1,2}, MA Li-wen^{1,2}, ZHANG Xiao-yu^{1,2}

(1. Ningxia Key Lab for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan, Ningxia 750002, China;
2. Ningxia Meteorological Science Institute, Yinchuan, Ningxia 750002, China;
3. Wuzhong Meteorological Service, Wuzhong, Ningxia 751100, China)

Abstract: In order to understand the penetration of precipitation in the soil at natural grassland of central arid zone in Ningxia, the penetration was calculated based on the increment of soil water content, and the statistical model for predicting the penetration depth of different soil texture was studied by statistical methods including regression, stepwise regression and correlation analysis. The results showed that the regression models for penetration depth prediction were more notable than the stepwise regression models. R^2 of the regression models was 0.60 ~ 0.67, while R^2 of the stepwise regression models was 0.49 ~ 0.58. The coefficients of precipitation or precipitation days in two models all had statistically significant relationships with penetration depth. Through the comparison between the predicted results and the measured values by correlation analysis method, the correlation coefficient between them was over 0.70. In particular, the prediction results by two models were significantly correlated (the correlation coefficient was 0.88 ~ 0.93). From the usage of the prediction model, the stepwise regression model was selected for penetration depth prediction. In addition, the prediction model performed better for the sand loam soil in Xingren than others and the relative errors of 81% ~ 100% samples were about 30% or lower. The model for the loam soil in Tongxin was acceptable and the relative errors of 55% ~ 60% samples were about 30 percent or lower. The model for the sand soil was not very good and the relative errors of half

收稿日期:2015-10-19

基金项目:公益性行业(气象)科研专项项目“干旱致灾过程及机理”(GYHY201506001);宁夏气象防灾减灾重点实验室基金项目“宁夏干旱区降水对土壤水分动态的影响”

作者简介:李红英(1980—),女,河南三门峡人,博士,高工,主要从事农业气象灾害及农业气候资源研究。E-mail: hongyinglyh@126.com

of samples were about 30 percent or lower. Furthermore, the influence of soil texture on the penetration depth was verified by the stepwise regression model. Under the same precipitation process, the penetration depth was in the following order: sand soil > sandy loam soil > loam soli.

Keywords: precipitation; penetration depth; forecasting model; soil texture; natural grassland; Ningxia

宁夏中部干旱带地处西北内陆干旱中心区域,受腾格里、乌兰布和毛乌素三大沙漠包围,干旱少雨,自然条件和生态环境恶化,灾害频繁,多年来一直是宁夏气象防灾减灾的重点区域^[1]。降水作为中部干旱带土壤水分的重要来源,水分利用效率一直是该区域关注的重点。但目前宁夏农业气象服务工作中,关于降水对土壤湿度的影响和渗透预测仍停留在简单直观的描述上,服务的精准度有待进一步提高。目前国内外关于降水在土壤中渗透深度预测模型的研究有两种方法,一种是基于降水透过地面渗入土壤的过程机理上展开研究^[2-4],不同种植模式、不同土壤类型等对降水入渗都会产生不同的影响^[5-7];第二种是通过渗透试验观测开展研究^[8-11]。两种方法在降水渗透预测模型研究中均取得了较好的效果。本文在此基础上,结合宁夏中部干旱带天然草场降水和土壤条件实际情况,基于土壤水分自动站观测资料,引入根据各层土壤含水量增量变化确定渗透深度的方法,运用 SPSS 统计软件分析了渗透深度与每次降水过程的降水量、降水日数、初始土壤含水量、日均降水量等因子的关系,建立了不同土壤质地的土壤条件下天然草场降水渗透深度统计预测模型,为更好地做好宁夏中部干旱带降水渗透预报,进一步提高雨情、墒情预报服务打下很好的基础。

1 资料方法

1.1 研究区域与资料

本文研究区域集中在宁夏中部干旱带,属于西北内陆,处于毛乌素沙地和腾格里沙漠的边缘,为典型的荒漠草原带,是我国北方农区与天然草地牧区接壤的过渡地带。此区域降雨时空分布不均,是宁夏受干旱影响最重的区域。研究区域内土壤类型多样,以灰钙土为主,结构松散沙性大,本文根据沙土、沙壤土、壤土不同质地,选择了盐池(粗砂土)、兴仁(沙壤土)、同心(壤土)三个试验地点,地表覆盖均为天然草场。

各站数据资料包括:2013—2015年主要生长季(4—9月)日降水量资料、土壤重量含水量资料。降水量资料来自于宁夏气象局气象数据库;土壤湿度数据来自气象部门在各地布设的 GStar - S406 土壤

水分自动监测仪测定数据,且研究所选站点的土壤水分自动站均已通过中国气象局的业务化检验,资料均已在当前农业气象业务服务中使用,数据可靠,服务效果较好,其测定深度为 100 cm、层次间隔为 10 cm、时间间隔为 10 min。

1.2 研究方法

(1) 降水渗透深度确定方法

水分在土壤中入渗时,一般情况下是表层土壤水分达到饱和后往下入渗到一定的土壤层,湿润程度随深度减小,形成一个湿润峰,湿润峰上面的湿土与下面的干土层形成明显的界面。随着越来越多的水分入渗,饱和层不断向下发展,湿润层与湿润峰也不断向下移动,也就是水分向更深的土层渗透。但实际上当渗透层土壤湿度低于田间持水量,但高于下面临界土层的湿度时,渗透层的土壤水分即将通过毛细管的作用向下渗透。本文运用方文松等提到的根据土壤增湿深度确定渗透深度的方法^[12],逐层、逐日分析土壤湿度的变化,从监测资料上来看,雨后第一天增湿层主要集中在表层,第二天则可达到较深的层次,且日增量向下逐渐减少,直至为零,此时,土壤增湿深度即为渗透深度。

(2) 降水渗透预测模型建立方法

初步选取各站点日降水量、降水日数、日均降水量、日最大降水速率、初始平均土壤湿度、表层土壤湿度等数据作为渗透深度的影响因子,运用 SPSS 软件中回归和逐步回归两种方法建立各影响因子与渗透深度的关系模型,通过检验模型和系数的显著性,确定不同土质的降水渗透深度的关键影响因子,最终建立各站降水在土壤中渗透深度预测模型。

2 结果分析

2.1 降水渗透深度预测方程建立

按照各层土壤水分增量分析的方法,分别得到各站土壤渗透深度,并统计同期降水量、降水日数、最大日降水量、初始土壤含水量、表层土壤含水量、日平均降水量等数据资料,借助 SPSS 统计软件,运用回归和逐步回归两种方法,建立了土壤渗透深度与各因子的关系方程,对方程和回归系数进行显著性检验,具体结果见表 1。

表 1 宁夏中部干旱带各站降水渗透深度预测方程

Table 1 Forecasting models on penetration depth in the middle arid zone of Ningxia

站点 Station	预测模型 Forecasting model	模型描述 Description
盐池 Yanchi	$Y_y = 34.117 + 2.157P - 1.689DP + 3.095PDM - 4.664IASW + 3.174SSW - 4.705PR$	$R^2 = 0.624$, 方程拟合较好; Better fitting; Sig. = $0.005 < 0.05$, 方程显著; Equation gain a notable level; PR 系数显著, 其它不显著。PR has a significance correlation, and others don't.
	$Y'_y = 27.179 + 2.868P - 2.626PR$	$R^2 = 0.487$, 拟合一般; General fitting; Sig. = $0.001 < 0.05$, 方程显著; Equation gain a notable level; 各因子系数显著。All factors have the significance correlation.
兴仁 Xingren	$Y_X = 16.825 + 4.201P + 0.269DP - 4.802PDM + 1.178IASW - 0.905SSW + 1.425PR$	$R^2 = 0.60$, 方程拟合较好; Better fitting; Sig. = $0.003 < 0.05$, 方程显著; Equation gain a notable level; P 和 DP 系数显著, 其它因子系数不显著。P and DP have the significance correlation, and others don't.
	$Y'_X = 21.972 + 3.188P - 2.889PDM$	$R^2 = 0.524$, 方程拟合一般; General fitting; Sig. = $0.025 < 0.05$, 方程显著; 系数显著。Equation gain a notable level; All factors have the significance correlation.
同心 Tongxin	$Y_T = -34.116 - 0.846P + 4.986DP + 2.533PDM + 3.774IASW + 1.117SSW - 0.664PR$	$R^2 = 0.673$, 方程拟合较好; General fitting; Sig. = $0.005 < 0.05$ 方程显著; Equation gain a notable level; 各因子系数均不显著。All factors have no significance correlation.
	$Y'_T = 3.674 + 1.164PDM + 7.221DP$	$R^2 = 0.575$, 方程拟合一般; General fitting; Sig. = $0.037 < 0.05$, 方程显著; Equation gain a notable level; 常数项不显著, 两个关键因子的系数显著。Constant factor has no significance correlation, and others have.

注: (1) Y_y 、 Y_X 、 Y_T 分别表示用回归方法预测的盐池、兴仁、同心的降水渗透深度; Y'_y 、 Y'_X 、 Y'_T 分别表示用逐步回归方法预测的盐池、兴仁、同心的降水渗透深度。(2) P 表示降水量, DP 表示降水日数, PDM 表示日最大降水量, IASW 表示初始平均土壤湿度, SSW 表示表层土壤湿度, PR 表示日平均降水速率。

Note: (1) Y_y , Y_X , and Y_T respectively represented predicted penetration depth by regression method, Y'_y , Y'_X and Y'_T respectively represented predicted penetration depth by stepwise regression. (2) P represented precipitation, DP represented days, PDM represented daily maximum precipitation, IASW represented initial average soil water content, SSW represented surface average soil water content, and PR represented daily average precipitation rate.

由表 1 可以看出, 运用回归方法得到的各站降水在土壤中渗透深度预测方程均能够达到 95% 的显著水平, 判定系数 R^2 在 0.60 ~ 0.673 之间, 说明方程拟合较好。但各站渗透预测方程中影响因子的系数显著性却不好, 其中仅盐池日平均降水量因子的系数显著, 其它因子在模型中的系数不显著; 兴仁预测方程降水量和最大日降水量系数显著, 其它因子的系数不显著; 同心的预测方程中, 各因子的系数均不显著。

运用逐步回归方法得到的各站渗透深度预测方程, 各站判定系数 R^2 偏小, 即方程拟合一般, 方程及各进入方程的系数经检验均显著。各站进入预测方程的因子有所不同, 其中盐池降水在土壤中渗透深度与降水量呈显著正相关、与日均降水量显著负相关, 兴仁渗透深度与降水量呈正相关、与日最大降水量呈负相关, 同心渗透深度与日最大降水量和降水日数呈显著正相关。

2.2 降水在土壤中渗透深度预测方程检验

图 1 显示的是各站渗透深度实际观测值和预测值的对比分析, 预测值包括 2013—2015 年用来建立回归方程的降水在土壤中渗透深度拟合值以及

2015 年渗透深度的预测值, 预测 1 和预测 2 分别是运用回归和逐步回归两种回归方程得到的拟合/预测值。

运用 SPSS 软件对各站渗透深度实际观测值和预测值进行了相关分析, 各自的相关系数见表 2, 各站实际观测值和预测值 1 之间的相关系数为 0.759 ~ 0.805, 与预测值 2 之间相关系数为 0.698 ~ 0.714, 且均在 0.01 水平上显著相关。预测值 1 和预测值 2 之间的相关性非常好, 盐池、兴仁和同心三站两种预测结果相关系数分别为 0.876、0.931 和 0.928, 且均在 0.01 水平上显著相关。因此, 从模型的简单可用性的角度考虑, 运用逐步回归方法得到的各站渗透深度预测方程可作为当地降水在土壤中渗透深度预报模型。

同时, 采用相对误差方法进行 2013—2015 年模型回代拟合和 2015 年预测效果进行了检验。其中对 2013—2015 年回代拟合检验结果为: 盐池粗砂土条件下, 约有 50% 左右样本相对误差在 30% 及以下; 兴仁沙壤土条件下, 有 81% 左右样本相对误差小于 30%; 同心壤土条件下, 有约 55% 的样本相对误差小于 30%。对 2015 年降水渗透深度预测效果

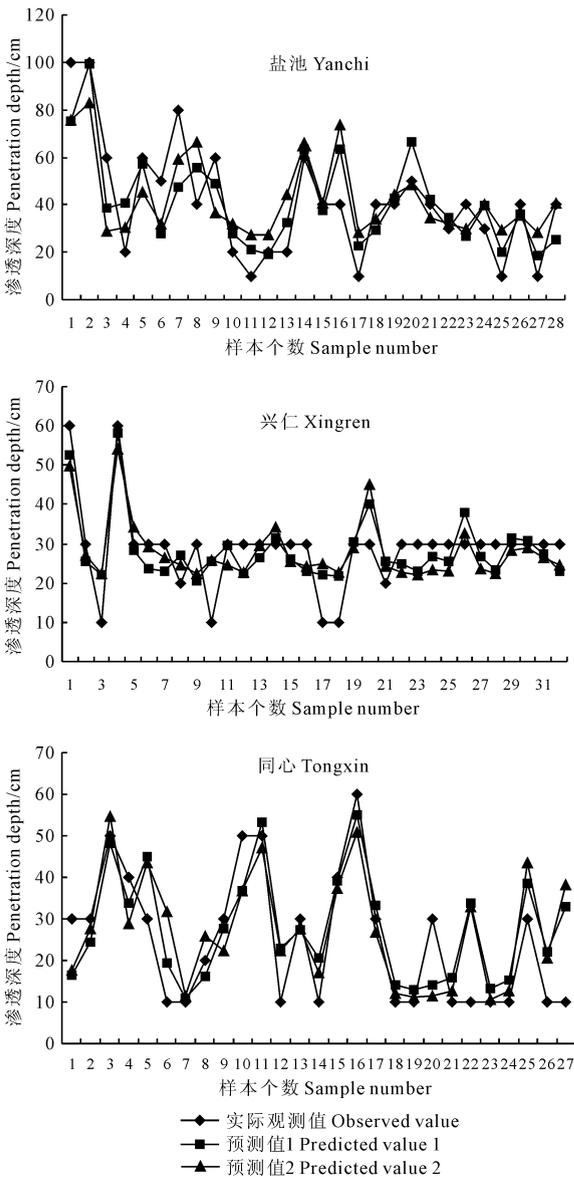


图 1 各站渗透深度实际观测值和预测值对比

Fig.1 Comparisons of the observed and the predicted values for the penetration depth

表 2 各站降水渗透深度实际观测值与预测值相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the observed and the predicted values for the penetration depth

数值 Value	盐池 Yanchi	兴仁 Xingren	同心 Tongxin
观测值:预测值 1 Observed value: Predicted value 1	0.805 **	0.759 **	0.788 **
观测值:预测值 2 Observed value: Predicted value 2	0.714 **	0.698 **	0.705 **
预测值 1:预测值 2 Predicted value 1: Predicted value 2	0.876 **	0.931 **	0.928 **

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** represented the significant difference at 0.01 level (bilateral).

检验发现,有限样本量下,盐池粗砂土 50% 样本的相对误差在 30% 以下;兴仁沙壤 100% 的样本相对误差均在 30% 左右或以下;同心壤土约 60% 的样本相对误差小于 30%。无论模型拟合回代和预测结果均是兴仁沙壤土条件下效果较好,同心壤土条件下效果中等,而盐池粗砂土条件下效果一般。

2.3 土壤质地对降水渗透深度的影响分析

基于宁夏中部干旱带 2015 年 5 月 20 日的降水过程,做一次模拟降水过程,运用各站渗透深度预报模型预测渗透深度,从而分析不同土壤质地对渗透深度的影响。具体模拟降水过程为:降水量取各站降水量的平均值 5.34 mm,降水日数为 1 d,日最大降水量和日均降水量均为 5.34 mm,预测结果如图 2 所示,在降水过程一致的情况下,三个站的地表植被覆盖均为天然草场,认为环境基本一致,发现土壤质地对降水渗透深度影响较大,渗透深度大小顺序为粗砂土 > 沙壤土 > 壤土。

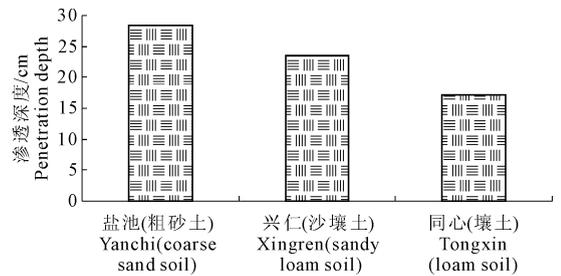


图 2 不同质地土壤降水渗透深度预测对比

Fig.2 Comparisons of penetration depth in different soil textures

3 结论

本文运用各层土壤水分增量分析来获取降水在土壤中渗透深度的办法,得到宁夏中部干旱带各站的降水渗透深度,借助 SPSS 统计软件分析了渗透深度与每次降水过程的降水量、降水日数、初始土壤含水量、日均降水量等因子的关系,采用两种统计方法,得到了各站降水在土壤中渗透深度的预测方程,通过检验预测结果,最终确定了宁夏中部干旱带各站降水渗透深度预测模型。主要得出以下结论:

(1) 由于宁夏中部干旱带常年处于缺水状态,通过分析发现:在本文所选的几个影响因子当中,降水量是最关键的影响因子,其中盐池粗砂土、兴仁沙壤土降水渗透深度与降水量呈显著正相关,同心壤土渗透深度与日最大降水量和降水日数呈显著正相关。

(2) 回归和逐步回归两种统计方法建立的渗透深度预测方程,预测结果与实际观测值之间均在 0.01 水平下达到显著水平,说明预测方程可用,同时两种预测结果之间相关性也较高,为了使预测在实

际中更加简便可行,本文明确各站均采用逐步回归方程作为降水渗透深度预测模型。

(3) 降水渗透深度预测模型,沙壤土条件下模型预测效果较好、壤土条件下效果中等,而粗砂土条件下预测效果一般,主要考虑是粗砂土地表温度高,加上盐池站降水量普遍偏小,蒸发蒸腾对降水入渗的影响大于其它站两种土质的土壤。

(4) 在地表植被覆盖程度基本一致、降水过程相同的情况下,土壤质地对降水渗透深度影响较大,渗透深度大小顺序为粗砂土 > 沙壤土 > 壤土。

4 讨 论

本文引入根据土壤各层含水量增量的变化确定渗透深度的方法,用其代表降水在土壤中渗透深度的观测值,虽然存在一定的误差,但由于研究区域属于雨养农业区,土壤中水分基本都来自降水,因此用该方法获得的渗透深度数据具有一定的代表性。同时,在建立渗透深度模型时,没有涉及日照、风速等其它气象因素,主要是考虑从宁夏整个气候划分看,研究站点同属于一个大的气候背景,暂认为其它气象因素对渗透深度的影响基本相似,忽略其对模型的影响,这也可以作为本文研究进一步的关注重点。

另外,受研究区域内土壤水分自动站建站、数据标校和投入使用等因素的影响,文章共统计出了宁夏中部干旱带各站 2013—2015 年生长季内典型降水过程 27~32 次,综合考虑模型建立和检验的样本量,各站均预留 5 次降雨过程数据资料进行模型验证,用于建立模型的样本在 22~27 次,从统计学的角度看,样本量仍略显不足,因此本文在建立回归模型的同时,对样本进行了相关分析和检验,以弥补由于样本量有限给预测模型带来的不确定性。

值得注意的是,本文最终选用逐步回归方程作为降水渗透深度预测模型,各站进入模型的因子均只有气象因子而没有初始土壤湿度,这并不是说初始土壤湿度对渗透深度没有影响,而是因为试验站点均处于干旱少雨、风日偏多的干旱区域,模型应用时可暂时忽略各试验点土壤湿度条件对渗透深度影响的不同。

参 考 文 献:

- [1] 张瑞兰. 宁夏中部干旱带基本气候特征与干旱化[J]. 宁夏农林科技, 2006, (5): 85-86.
- [2] 赵同应, 朱凌云, 卫丽萍, 等. 旱地土壤水渗透深度预测模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 68-71.
- [3] 陶祖文, 裴步祥. 华北平原地区春季降水渗透深度和透雨的农业气象估算方法[J]. 气象学报, 1983, 41(1): 97-105.
- [4] 杨淑香. 农牧林交错带不同降水年型下土壤水分动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 107-110.
- [5] 张永涛, 杨吉华, 夏江宝, 等. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 123-126.
- [6] 熊好琴, 段金跃, 王 妍, 等. 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 82-87.
- [7] 秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 等. 西南喀斯特山地地下经济模式对土壤渗透性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1386-1394.
- [8] Shukla M K, Lal R, Unkefer P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management system[J]. J Soil Science, 2003, 168(3): 178-191.
- [9] 冶林茂, 薛昌颖, 杨海鹰, 等. 过程降雨入渗土壤深度的推算方法[J]. 中国农业气象, 2010, 31(增 1): 66-69.
- [10] 赵同应, 王景秀, 王福仁. 过程降水与土壤水渗透深度试验分析[J]. 山西气象, 2003, (4): 19-21.
- [11] 万 爽, 何俊仕, 付玉娟, 等. 基于人工降水模拟的不同灌溉方式下土壤水分入渗[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 401-405.
- [12] 方文松, 刘荣花, 朱自玺, 等. 农田降水渗透深度的影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 185-188.

(上接第 74 页)

- [15] Yaklich R W, Abdul - Baki A. Variability in metabolism of individual axes of soybean seeds and its relationship to vigor[J]. Crop Science, 1975, 15: 474-426.
- [16] 张自阳, 姜小琴, 王娟娟, 等. 人工老化处理对小麦种子活力和醇溶蛋白、麦谷蛋白组成的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(2): 24-27.
- [17] 贺 杰, 王 伟, 胡海燕, 等. 小麦种子活力与其保护酶活性关系的研究[J]. 天津农业科学, 2012, 18(2): 17-19.
- [18] Brooking I R. Maize ear moisture during grain filling, and its relationship to physiological maturity and grain filling[J]. Field Crops Research, 1990, 23: 55-68.
- [19] 张桂莲, 杨定照, 张顺堂, 等. 不同成熟度对水稻种子萌发及其生理特性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2012, 48(3): 272-276.
- [20] 石海春, 柯永培, 傅体华, 等. 不同成熟度玉米种子活力的差异性研究[J]. 四川农业大学学报, 2006, 24(3): 269-271.
- [21] 成广雷, 张海娇, 赵久然. 临界胁迫贮藏条件下不同基因型玉米种子活力及生理变化[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 33-42.
- [22] Adam N M, Mcdonald M B, Henderlong P R. The influence of seed position, planting and harvesting dates on soybean seed quality[J]. Seed Science and Technology, 1989, 17: 143-152.
- [23] 廖文燕, 金钱松种子贮藏过程中的生理生化变化[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [24] 蔡春菊, 高 健, 牟少华. 60Co γ 辐射对毛竹种子活力及早期幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 2007, 21(5): 436-440.