

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.024

不同水头和土壤容重下微润灌湿润体内水盐分布特性

刘小刚 朱益飞 余小弟 李义林 唐建楷 喻黎明

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为探明微润灌溉施肥的湿润体内水盐分布规律,开展不同压力水头和土壤容重下室内微润灌溉入渗试验。设置3个水头(H1.0:1.0 m、H1.5:1.5 m和H2.0:2.0 m)和3个土壤容重(D1.00:1.00 g/cm³、D1.15:1.15 g/cm³和D1.30:1.30 g/cm³),以质量分数0.3%的硝酸钾溶液为入渗溶液,研究微润灌湿润体内水盐空间分布规律和变异特征。结果表明:微润管口水头和土壤容重对湿润体内含水率、NO₃⁻-N与K⁺含量均值影响显著。同一土壤容重下,H1.5和H2.0与H1.0相比,湿润体剖面面积增大13.50%~21.61%,湿润体内含水率、NO₃⁻-N与K⁺含量均值分别增大3.69%~10.71%、7.80%~10.95%和7.29%~17.49%,均匀系数分别增大7.65%~18.63%、5.22%~13.63%和9.34%~21.89%;同一水头下,D1.15和D1.30与D1.00相比,湿润体剖面面积减小5.76%~9.21%,含水率、NO₃⁻-N含量均值分别减小15.73%~21.54%、8.08%~10.97%,而K⁺含量均值增大34.89%~64.79%,三者均匀系数分别减小9.02%~11.45%、4.04%~7.25%和7.09%~11.54%。K⁺在微润管周围分布较集中,K⁺聚集分布面积约占湿润体剖面面积的40.80%~61.41%。微润灌湿润体内含水率、NO₃⁻-N和K⁺含量均值与至微润管的水平距离符合四参数Log-logistic模型。

关键词: 微润灌溉施肥; 土壤容重; 水头; 湿润体; 水盐分布; 四参数Log-logistic模型

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0189-09

Water – Salinity Distribution Characteristics in Wetted Soil of Moistube Irrigation under Different Pressure Heads and Soil Bulk Densities

LIU Xiaogang ZHU Yifei YU Xiaodi LI Yilin TANG Jiankai YU Liming

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to investigate water – salinity distribution characteristics in wetted soil of moistube fertigation, the infiltration experiment of moistube irrigation was carried out under different pressure heads and soil bulk densities, the 0.3% potassium nitrate solution was used in infiltration experiment, and three pressure heads (H1.0:1.0 m, H1.5:1.5 m and H2.0:2.0 m) and three soil bulk densities (D1.00:1.00 g/cm³, D1.15:1.15 g/cm³ and D1.30:1.30 g/cm³) were designed to study the water – salinity distribution and spatial variation traits in wetted soil of moistube irrigation. The results showed that pressure heads and soil bulk densities had significant effect on average contents of moisture, NO₃⁻-N and K⁺ in wetted soil. Under the same soil bulk density, compared with H1.0, the sectional area of wetted soil of H1.5 and H2.0 was increased by 13.50% ~ 21.61%, average contents of moisture, NO₃⁻-N and K⁺ were increased by 3.69% ~ 10.71%, 7.80% ~ 10.95% and 7.29% ~ 17.49%, respectively, and uniformity coefficients were increased by 7.65% ~ 18.63%, 5.22% ~ 13.63% and 9.34% ~ 21.89%, respectively. Under the same pressure head, compared with D1.00, the sectional area of wetted soil of D1.15 and D1.30 was decreased by 5.76% ~ 9.21%, average contents of moisture and NO₃⁻-N were decreased by 15.73% ~ 21.54% and 8.08% ~ 10.97%, but average content of K⁺ was increased by 34.89% ~ 64.79%, and uniformity coefficients of moisture, NO₃⁻-N and K⁺ contents in wetted soil were decreased by 9.02% ~ 11.45%, 4.04% ~ 7.25% and 7.09% ~ 11.54%, respectively. K⁺ distributed intensively around moistube and accounted for 40.80% ~ 61.41% of

收稿日期: 2016-11-01 修回日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469010、51109102)、云南省应用基础研究项目(2014FB130)、云南省教育厅重点项目(2011Z035)和大学生创新创业训练计划项目(201610674068)

作者简介: 刘小刚(1977—),男,教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: liuxiaogangjy@126.com

通信作者: 喻黎明(1976—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail: liming16900@sina.com

distribution area of wetted soil. Average contents of the moisture, NO_3^- -N and K^+ in wetted soil of moistube irrigation and the horizontal distance from moistube conformed to the four-parameter Log - logistic model. The research results can provide theoretical basis and practical reference for moistube fertigation.

Key words: moistube fertigation; soil bulk density; pressure head; wetted soil; water - salinity distribution; four-parameter Log - logistic model

引言

微润灌溉是一种精准高效的节水灌溉技术,能够向作物根部持续微量供水^[1-4],可在无外加动力下实现自动供水^[5-6],相对于其他灌水器而言沿程水头损失极其微小,其流态指数比一般灌水器大^[3],同时减少地表蒸发与土壤深层渗漏,具有节水高效、降低能耗、抗堵塞性能强等特点^[7-10]。有关微润灌溉的应用基础方面已有较多的研究成果,主要集中在压力水头、土壤容重、溶液矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响等方面^[1-4,7-9]。微润灌溉产生以微润管为轴心的对称圆形湿润体,土壤含水率最大值出现在微润管附近,并向管带四周逐渐减小^[7];压力是入渗量的重要因素,微润管埋深显著影响湿润体形状。压力越大,湿润锋运移距离越大,土壤水分分布范围越广,土壤平均含水率越高^[1-2];土壤密度和质地也是影响湿润体分布的重要因素,湿润锋运移距离与时间呈显著幂函数关系,累积入渗量和灌水时间呈线性函数关系^[8];微润灌溉的矿化度对湿润体体积影响显著,而对湿润体形状影响较小,湿润锋运移距离、土壤累积入渗量、湿润体体积均随入渗溶液矿化度提高而增大^[9]。

漫灌、地表滴灌、覆盖膜滴灌、膜下滴灌等灌水模式下土壤水盐含量及分布对土壤微生物、作物生长、水分利用及产量影响显著^[11-20]。作为一种新型农业节水技术,微润灌溉对土壤水盐分布的影响还鲜见报道。有关微润灌溉入渗特性研究大多集中在水平埋设条件下,而对于适宜于宽距作物的竖插式微润管入渗特性还研究较少,尤其是水肥一体微润灌湿润体水盐分布规律尚不清楚。本文研究水肥一体微润灌溉下微润管竖直布设时,毛管入口压力和土壤容重对土壤水盐分布的影响,并建立湿润体水盐分布模型,以期在水肥一体微润灌溉推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验土样

按国际制土壤分类方法(International Society of Soil Science, ISSS),供试红壤土属多砾质砂质壤土。土壤颗粒组成采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分

析仪(英国马尔文公司)测定,土壤自然堆放下粒径组成为直径 $d > 2\text{ mm}$ 、 $0.02\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$ 、 $0.002\text{ mm} < d \leq 0.02\text{ mm}$ 和 $0 < d \leq 0.002\text{ mm}$ 分别占 21.75%、74.27%、3.96% 和 0.12%,初始含水率为 3.56%, NO_3^- -N 与 K^+ 含量本底值分别为 19.74 mg/kg 和 39.52 mg/kg。土壤容重分别为 1.00、1.15、1.30 g/cm³ 时的饱和含水率分别为 66.80%、47.52% 和 40.69%。按照控制的容重分层填装土样,层间打毛。

1.2 试验装置

试验装置由土箱和供水系统组成。有机玻璃土箱的尺寸(长×宽×高)为 40 cm×40 cm×45 cm,厚度为 10 mm。微润管(深圳市微润灌溉技术有限公司提供)、马氏瓶和橡胶软管组成供水系统。微润管为四折痕双层结构,内层为厚度 0.06 mm 的高分子半透膜。孔隙直径在 10~900 nm 之间,膜上孔密度约为 10⁵个/cm²。微润管公称直径为 16 mm,折径(宽度)为(25±1.5) mm,壁厚为(0.9±0.5) mm,正常工作压力为 0.02 MPa。马氏瓶提供连续恒压水头,升降支架实现水头调控。

1.3 试验设计与方法

试验设 3 个微润管入口水头(H1.0:1.0 m、H1.5:1.5 m 和 H2.0:2.0 m)和 3 个土壤容重(D1.00:1.00 g/cm³、D1.15:1.15 g/cm³ 和 D1.30:1.30 g/cm³)完全组合共 9 个处理,各处理重复 3 次,文中所有数据取均值。采用质量分数为 0.3% 的硝酸钾溶液模拟灌溉施肥。试验开始前,控制容重分层装土,每层 5 cm,层间打毛。微润管长度为 30 cm,有效渗水长度为 25 cm,进水上端采用专用塑料接头与橡胶软管连接,下端采用生料带缠绕橡胶塞封闭。有机玻璃土箱内高为 45 cm,装土高度为 40 cm。竖直插入微润管时保持上端接头与土面齐平,控制两侧与土箱两壁水平距离各 1 cm。选取湿润体的 1/4 作为观测对象,记录湿润锋轮廓变化。在土层表面覆盖塑料薄膜抑制土壤水分蒸发。入渗时间持续 124 h,0~12 h 每 2 h、12~48 h 每 4 h、48~124 h 每 8 h 记录马氏瓶刻度,并在玻璃土箱侧面描绘湿润锋。入渗结束立即用小土钻分层取样,竖直方向从土壤表面起每隔 5 cm 取样 1 次,水平方向每隔 5 cm 取样。烘干法测定土壤含水率,紫外可

θ_i ——第 i 个取样点的润体内水盐含量
 m ——取样点个数

1.5 作图及统计方法

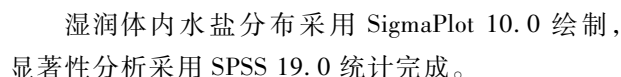


Fig. 1 Schematic diagram of wetted body and section area

2 结果与分析

2.1 湿润体内土壤水盐分布

2.1.1 土壤水分分布

$f(x)$ ——入渗 124 h 的湿润锋移动位置曲线的拟合函数(与实测曲线相关系数大于 0.9)

由图 2 可知,与 H1.0 相比,H1.5 和 H2.0 时,D1.00、D1.15 和 D1.30 的湿润体剖面面积分别增大 7.41% ~ 15.02%、10.46% ~ 21.35% 和 17.39% ~ 26.09%,且越靠近微润管含水率越高,距离微润管最近处接近饱和含水率。D1.00 时,H1.0、H1.5 和 H2.0 的含水率超过 35% 的面积分别占湿润体剖面面积的 43.16%、56.09% 和 65.57%。其中 D1.30 的湿润体剖面面积最小。土壤容重一定时,与 H1.0 相比,H1.5 和 H2.0 时的湿润体剖面面积增大 13.50% ~ 21.61%;水头一定时,与 D1.00 相比,D1.15 和 D1.30 的湿润体剖面面积减小 5.76% ~ 9.21%。

2.1.2 土壤 NO_3^- -N 分布

距微润管越近, NO_3^- -N 含量越高, 距微润管越远, NO_3^- -N 含量越低, 靠近微润管处的 NO_3^- -N 含量最高超过 180 mg/kg (图 3)。与 H1.0 相比, H1.5 和 H2.0 时, D1.00、D1.15 和 D1.30 的 NO_3^- -N 含量大于 80 mg/kg 的分布面积分别增大 $8.77\% \sim 34.62\%$ 、 $11.64\% \sim 27.73\%$ 和 $15.76\% \sim 31.15\%$ 。与 D1.00 相比, D1.15 和 D1.30 时, H1.0、H1.5 和 H2.0 的 NO_3^- -N 含量大于 80 mg/kg 的分布面积分别减小 $3.51\% \sim 8.69\%$ 、 $1.21\% \sim 3.43\%$ 和 $6.68\% \sim 9.33\%$ 。

NO_3^- -N 分布规律与含水率分布规律类似。土壤容重一定时, NO_3^- -N 分布面积随着水头的增加而增大; 而水头一定时, NO_3^- -N 分布面积随土壤容重

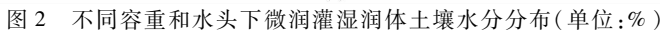
$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^m |\theta_i - \bar{\theta}|}{m\bar{\theta}} \right) \times 100\% \quad (3)$$
 $\bar{\theta}$ ——润体内平均水盐含量

Fig. 2 Soil water distributions of moistube-irrigated wetted body under different bulk densities and pressure heads

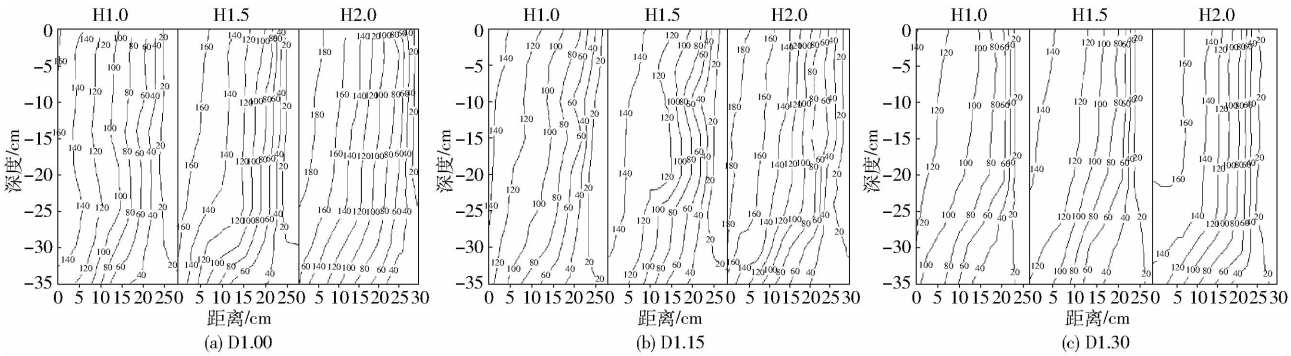


图 3 不同容重和水头下微润灌的湿润体土壤 NO_3^- -N 含量分布 (单位:mg/kg)

Fig. 3 Soil NO_3^- -N content distributions of moistube-irrigated wetted body under different bulk densities and pressure heads

的增加而减小。

2.1.3 土壤 K^+ 分布

K^+ 含量大于 120 mg/kg 的分布面积较小且聚集在微润管附近, K^+ 含量最大可达 600 mg/kg 以上 (图 4)。与 H1.0 相比, H1.5 和 H2.0 时, D1.00、D1.15 和 D1.30 的 K^+ 含量大于 120 mg/kg 的分布面积分别增大 5.26% ~ 18.42%、5.83% ~ 26.09%、12.57% ~ 22.16%。与 D1.00 相比, D1.15 和 D1.30 时, H1.0、H1.5 和 H2.0 的 K^+ 含量

大于 120 mg/kg 的分布面积分别减小 18.64% ~ 26.75%、18.34% ~ 21.62% 和 14.07% ~ 24.45%; K^+ 含量大于 120 mg/kg 的分布面积分别占湿润体剖面面积的 35.12%、38.73% 和 43.15%。

综上 (图 2 ~ 4) 可知, K^+ 含量分布规律与含水率和 NO_3^- -N 含量的差异明显, K^+ 含量分布面积较小且随距离的增大变幅较大。综上可知, 湿润体剖面水盐分布相对均匀, 底部含量未明显增大, 因此未出现淋洗现象。

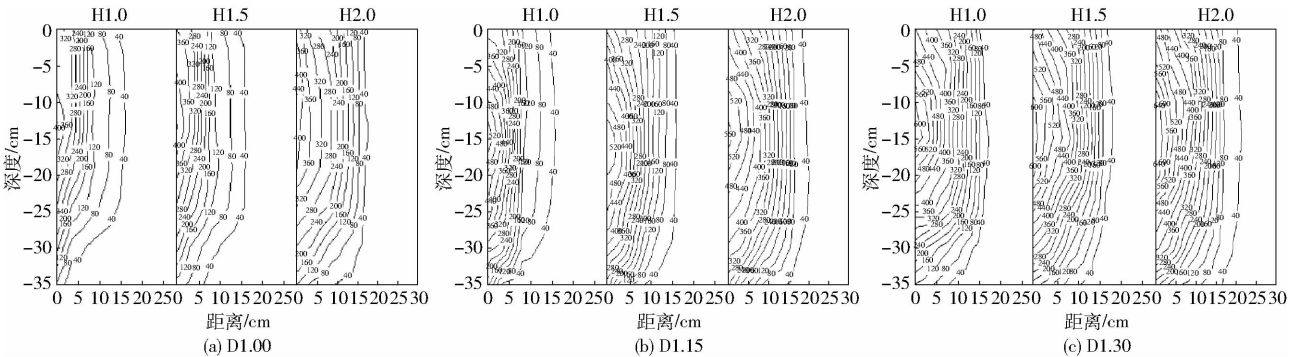


图 4 不同容重和水头下微润灌的湿润体土壤 K^+ 含量分布 (单位:mg/kg)

Fig. 4 Soil K^+ content distributions of moistube-irrigated wetted body under different bulk densities and pressure heads

2.2 湿润体内水盐分布变化特性

经检验, 土壤容重和水头对含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量均值影响显著 ($P < 0.001$)。容重一定时, 与 H1.0 相比, H1.5 和 H2.0 时含水率均值与均匀系数分别增大 3.69% ~ 10.71% 和 7.80% ~ 10.95%。水头一定时, 与 D1.00 相比, D1.15 和 D1.30 时的含水率均值和均匀系数分别减小 15.73% ~ 21.54% 和 8.08% ~ 10.97%。D1.00、D1.15 和 D1.30 的含水率均匀系数分别为 80.32% ~ 87.91%、72.82% ~ 81.13% 和 70.06% ~ 78.69%。D1.00 的含水率均匀系数最大, 而 D1.30 时最小, 比 D1.00 减小 9.77% ~ 12.77%。

土壤容重不变时, 与 H1.0 相比, H1.5 和 H2.0 时的 NO_3^- -N 含量均值与均匀系数分别增大 7.65% ~ 18.63% 与 5.22% ~ 13.63%。水头不变时, 与

D1.00 相比, D1.15 和 D1.30 时的 NO_3^- -N 含量均值与均匀系数分别减小 9.02% ~ 11.45% 与 4.04% ~ 7.25%。D1.00、D1.15 和 D1.30 的 NO_3^- -N 均匀系数分别为 72.61% ~ 80.19%、68.46% ~ 78.20% 和 65.80% ~ 76.69%。D1.00 的 NO_3^- -N 均匀系数最大, 其中 D1.30 时最小, 比 D1.00 减小 4.36% ~ 9.38%。

容重一定时, 与 H1.0 相比, H1.5 和 H2.0 时的 K^+ 含量均值与均匀系数分别增大 7.29% ~ 17.49% 和 9.34% ~ 21.89%。水头一定时, 与 D1.00 相比, D1.15 和 D1.30 时的 K^+ 含量均值增大 34.89% ~ 64.79%, 而均匀系数减小 7.09% ~ 11.54%。在同一水头下, 容重越大, K^+ 含量越大。D1.00、D1.15 和 D1.30 的 K^+ 含量均匀系数分别为 65.60% ~ 74.81%、58.42% ~ 72.15% 和 54.19% ~ 70.23%。

D1.00 的 K^+ 含量均匀系数最大,而 D1.30 时最小,比 D1.00 减小 6.12% ~ 17.39%。

因此,湿润体内 NO_3^- -N 含量分布特征与含水率基本一致,而 K^+ 含量分布特征与含水率和 NO_3^- -N 含量有所区别。在同一容重下,含水率、 NO_3^- -N 含

量和 K^+ 含量均值与均匀系数均随着水头的增加而增大。在同一水头下,含水率、 NO_3^- -N 含量均值与均匀系数均随着容重的增加而减小, K^+ 含量均值随着容重的增加而增大,而 K^+ 含量均匀系数随容重增加则减小。

表 1 微润灌的湿润体内水盐分布特征

Tab.1 Characteristics of soil water and salinity distribution in moistube-irrigated wetted body

土壤容重/ (g·cm ⁻³)	水头/ m	累积入渗量/L	土壤含水率		土壤 NO ₃ ⁻ -N 含量		土壤 K ⁺ 含量	
			均值/%	均匀系数/%	均值/(mg·kg ⁻¹)	均匀系数/%	均值/(mg·kg ⁻¹)	均匀系数/%
1.00	1.0	5.04 ± 0.21 ^e	32.58 ± 3.29 ^b	80.32	123.34 ± 3.62 ^{cd}	72.61	225.33 ± 5.89 ^e	65.60
	1.5	6.63 ± 0.11 ^b	33.73 ± 3.81 ^b	85.03	128.98 ± 3.08 ^{bc}	75.68	249.68 ± 6.29 ^e	69.37
	2.0	7.46 ± 0.15 ^a	35.90 ± 4.09 ^a	87.91	138.12 ± 4.35 ^{ab}	80.19	288.17 ± 4.93 ^{de}	74.81
1.15	1.0	3.56 ± 0.06 ^e	27.51 ± 3.66 ^{cde}	72.82	106.87 ± 3.14 ^{de}	68.46	306.24 ± 4.41 ^{de}	58.42
	1.5	4.54 ± 0.09 ^d	28.78 ± 3.11 ^{cd}	78.84	117.64 ± 3.53 ^{cde}	72.58	342.00 ± 5.68 ^{bcd}	64.33
	2.0	5.12 ± 0.09 ^c	30.24 ± 3.31 ^{bc}	81.13	130.71 ± 4.26 ^{abc}	78.20	381.17 ± 4.79 ^{bc}	72.15
1.30	1.0	2.75 ± 0.07 ^f	25.31 ± 4.19 ^e	70.06	104.30 ± 2.98 ^{de}	65.80	407.62 ± 5.75 ^{ab}	54.19
	1.5	3.66 ± 0.03 ^e	26.46 ± 4.01 ^{de}	76.72	113.47 ± 3.79 ^{de}	69.43	415.95 ± 5.15 ^{ab}	61.16
	2.0	4.38 ± 0.10 ^d	28.43 ± 4.61 ^{cd}	78.69	127.99 ± 3.37 ^{bc}	76.69	434.09 ± 6.39 ^a	70.23

注:数据为平均值 ± 标准差 (n = 3), 同列数值后不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05), 下同。

2.3 微润灌湿润体内水盐含量均值

2.3.1 四参数 Log-logistic 分析

Logistic 模型是 S 型曲线的常用模型,大量试验表明呈 S 型曲线的数据都符合该模型^[21-26]。Log-logistic 模型是 Logistic 的扩展,拟合效果优于前者,且参数更有实际意义^[25]。用四参数 Log-logistic 模型进行曲线拟合,得到不同水头和土壤容重湿润体内含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量均值与至微润管水平距离的关系。试验数据回归结果如表 2 所示,其模型为

表 2 微润管湿润体内水盐含量的四参数 Log-logistic 拟合

Tab.2 Fitting formula of soil water and salinity contents in moistube-irrigated wetted body using four-parameter Log-logistic model

土壤容重/ (g·cm ⁻³)	水头/ m	平均含水率		土壤 NO ₃ ⁻ -N 含量		土壤 K ⁺ 含量	
		拟合公式	R ²	拟合公式	R ²	拟合公式	R ²
1.00	1.0	$\lambda = 1.688\,5 + \frac{38.675\,0 - 1.688\,5}{1 + 10^{-0.144\,1(20.985\,6 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 0.837\,8 + \frac{150.246\,8 - 0.837\,8}{1 + 10^{-0.107\,1(20.435\,9 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 40.920\,4 + \frac{359.528\,7 - 40.920\,4}{1 + 10^{-0.109\,4(8.809\,5 - I)}}$	0.99 [*]
	1.5	$\lambda = 2.634\,5 + \frac{38.785\,2 - 2.634\,5}{1 + 10^{-0.228\,9(22.869\,3 - I)}}$	0.97 [*]	$\lambda = 0.429\,4 + \frac{163.240\,8 - 0.429\,4}{1 + 10^{-0.092\,4(21.766\,8 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 37.825\,6 + \frac{476.300\,6 - 37.825\,6}{1 + 10^{-0.112\,4(3.392\,2 - I)}}$	0.98 [*]
	2.0	$\lambda = 4.303\,3 + \frac{39.200\,1 - 4.303\,3}{1 + 10^{-0.250\,4(24.334\,3 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 0.107\,9 + \frac{178.592\,2 - 0.107\,9}{1 + 10^{-0.096(20.739\,4 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 29.228\,4 + \frac{496.762\,6 - 29.228\,4}{1 + 10^{-0.080\,1(4.390\,5 - I)}}$	0.98 [*]
1.15	1.0	$\lambda = 0.599\,1 + \frac{33.484\,8 - 0.599\,1}{1 + 10^{-0.111\,9(20.255\,7 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 2.944\,3 + \frac{139.295\,9 - 2.944\,3}{1 + 10^{-0.118\,6(20.186\,3 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 36.220\,7 + \frac{429.656\,9 - 36.220\,7}{1 + 10^{-0.233\,8(4.775\,7 - I)}}$	1.00 [*]
	1.5	$\lambda = 0.896\,6 + \frac{34.483\,7 - 0.896\,6}{1 + 10^{-0.118\,2(20.363\,4 - I)}}$	0.97 [*]	$\lambda = 2.670\,2 + \frac{144.021\,2 - 2.670\,2}{1 + 10^{-0.124\,2(20.135\,7 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 37.189\,8 + \frac{485.632 - 37.189\,8}{1 + 10^{-0.178\,9(5.375\,6 - I)}}$	0.99 [*]
	2.0	$\lambda = 1.020\,9 + \frac{35.36 - 0.020\,9}{1 + 10^{-0.101\,5(22.226\,8 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 0.899\,3 + \frac{144.021\,2 - 0.899\,3}{1 + 10^{-0.122\,3(20.133\,1 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 37.421\,7 + \frac{466.939\,3 - 37.421\,7}{1 + 10^{-0.170\,4(8.071\,4 - I)}}$	0.98 [*]
1.30	1.0	$\lambda = 0.031\,2 + \frac{31.431\,4 - 0.031\,2}{1 + 10^{-0.090\,8(20.284\,1 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 4.757\,5 + \frac{124.507\,1 - 4.757\,5}{1 + 10^{-0.196\,5(19.578\,3 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 38.264\,4 + \frac{458.934\,4 - 38.264\,4}{1 + 10^{-0.227\,8(5.804\,8 - I)}}$	0.99 [*]
	1.5	$\lambda = 0.893\,9 + \frac{32.735\,6 - 0.893\,9}{1 + 10^{-0.106\,1(20.484\,7 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 2.044\,3 + \frac{135.074\,6 - 2.044\,3}{1 + 10^{-0.142\,8(19.765\,3 - I)}}$	0.97 [*]	$\lambda = 34.533\,5 + \frac{524.058\,1 - 34.533\,5}{1 + 10^{-0.169\,2(6.327\,1 - I)}}$	0.97 [*]
	2.0	$\lambda = 1.638\,8 + \frac{35.357\,2 - 1.638\,8}{1 + 10^{-0.094\,3(21.615\,3 - I)}}$	0.99 [*]	$\lambda = 0.086 + \frac{153.987\,9 - 0.086}{1 + 10^{-0.133\,6(19.728\,5 - I)}}$	0.98 [*]	$\lambda = 33.438\,3 + \frac{527.780\,5 - 33.438\,3}{1 + 10^{-0.184\,2(7.419\,4 - I)}}$	0.96 [*]

注: * 表示在 P < 0.05 水平差异显著。

$$\lambda = D + \frac{A - D}{1 + 10^{B(\lg C - l)}}$$

$(0 \leq l \leq f(x))$

(4)

- 式中
- l ——与微润管水平距离

λ ——拟合含量

D ——含量的下渐近线,略低于水平距离趋近于湿润体边缘时的最小 λ 值^[25]

A ——含量的上渐近线,略高于水平距离趋近微润管时的最大 λ 值

B ——含量变化速率参数,相当于模型曲线的最大斜率

C ——模型曲线拐点所对应的 λ 值

表2中各回归方程式的 R^2 均大于0.97,并通过 $P < 0.05$ 的显著性检验。因此,湿润体内含水率、 NO_3^- -N和 K^+ 含量均值与至微润管水平距离的关系规律符合四参数Log-logistic模型。水头与土壤容重一定时,根据拟合公式可计算出与微润管不同水平距离相应的水盐含量均值。

2.3.2 土壤含水率、 NO_3^- -N、 K^+ 含量均值与水平距离的关系

图5为入渗124 h后湿润体内不同距离水盐含量的均值。由图5可知,水头越大,湿润体内水盐含

量均值越大,高水头的模拟曲线均位于低水头上方。湿润体内含水率与 NO_3^- -N含量均值随着与微润管水平距离的增大而减小,随着土壤容重的增加而减小; K^+ 含量均值随着土壤容重的增加而略有增大,随着与微润管水平距离的增大而减小,而减小到趋于土壤本底值后基本不变。随着与微润管水平距离的增大,湿润体内含水率和 NO_3^- -N含量均值模拟曲线的斜率由小变大,而 K^+ 含量均值的模拟曲线斜率由大变小,主要由于土壤对水盐的吸附程度不同所致。

土壤含水率、 NO_3^- -N与 K^+ 含量均值的拟合值减去本底值得到不同水平距离上水盐含量的增加量。结果发现土壤容重一定时, NO_3^- -N含量均值增加量与含水率较接近,两者增加量均随距离的增大逐渐减小。而 K^+ 含量均值增加量与含水率、 NO_3^- -N含量差异显著,微润管附近增加显著,与微润管水平距离15 cm以外增加不显著,表明 K^+ 在微润管附近出现富集。

3 讨论

水肥一体化技术是水和肥同步供应的一项农业

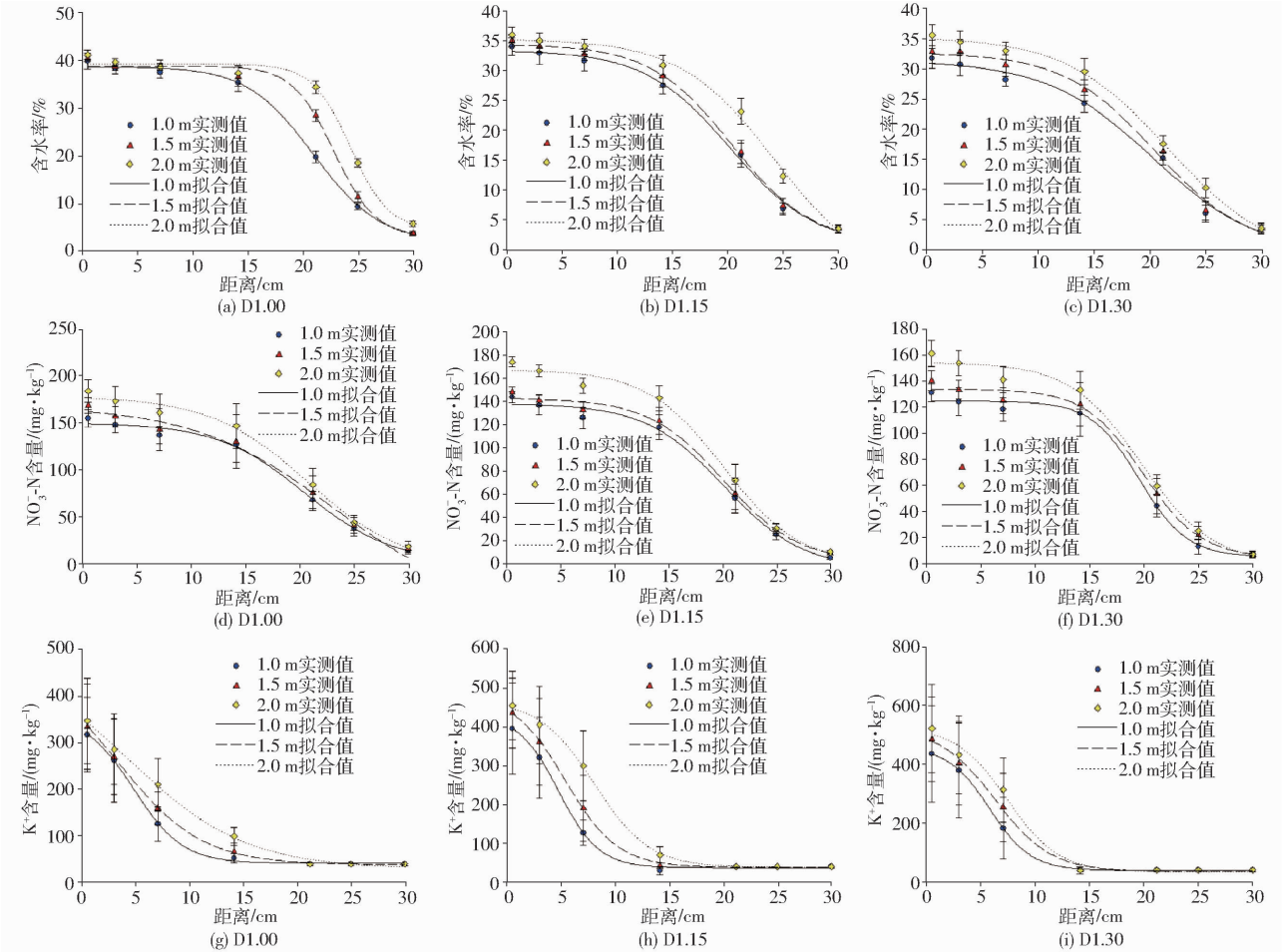


图5 湿润体剖面水盐含量均值实测值与模拟曲线

Fig.5 Measurement values and simulation curves of average contents of soil water and salinity in wetted body profile

技术,是将可溶性固体或液体肥料配制成的肥液,借助压力系统与水一起灌溉,根据土壤养分含量和作物种类的需肥规律和特点,均匀、定时、定量浸润作物根系发育生长区域,从而达到提高作物品质、增产增收的一项新技术。前人对水肥一体化滴灌条件下土壤水盐分布做了较多研究,结果发现季节变化、土壤质地、咸水灌溉均会影响滴灌模式下的土壤水盐分布^[14-15,18]。有关土壤盐分的研究大多采用电导率这一综合指标,然而不同离子在土壤中迁移转化规律有所不同,因此本文对水肥一体化微润灌溉的土壤含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量进行探讨,分析水盐分布规律和变异特征,并建立微润灌湿润体内水盐含量均值模型以期指导实际生产。

水头是控制微润灌溉流量的主要参数,通过影响入渗界面的势梯度进而改变水分运动通量^[1]。水盐在土壤中的运移与土壤孔隙及含量密切相关,土壤容重越小,水盐实际流动面积越大,入渗能力越强^[27],本试验中土壤容重增加,溶液入渗总量也随之减小。因此,随着水头的增加,湿润体剖面面积及高于本底值的 NO_3^- -N 和 K^+ 含量分布面积显著增大;而随着土壤容重的增加,水盐分布面积显著减小。水头和土壤容重对微润灌溉湿润体内含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量均值影响显著。前人研究发现,不同水头下含水率最大均值出现在微润管附近;同一位置,压力水头越大,土壤平均含水率越高^[1],这与本文水分分布规律类似。本文同时发现,不同水头下土壤水盐含量最大值均出现在微润管附近,并向管带四周逐渐减小, NO_3^- -N 含量均值与微润管水平距离的减小速率与水分类似,先小后大再小,而 K^+ 含量均值减小速率先大后小;同一水平位置,水头越大,土壤水盐含量均值越高。随着水头的增加, NO_3^- -N 与 K^+ 含量均值与均匀系数均增大。主要由于增加水头使得土壤吸湿和导水性能增大,同时增大水盐入渗速率以及湿润体增加速率,从而显著提高土壤水盐均匀度^[28]。土壤容重增大,含水率均匀系数减小,湿润体减小^[6]。而本文发现土壤容重增大, NO_3^- -N 含量均值减小,而 K^+ 含量均值增大,水盐均匀系数均减小。可能由于土壤容重增加,密实度增大,孔隙率减小,水分通道变小,水盐入渗总量减小。 NO_3^- -N 带负电荷,作为一种非吸附性离子,在土壤中的迁移能力较强,显著表现出“ NO_3^- -N 随水运动”的规律。而土壤对 K^+ 的吸附性较强且随容重增大而增强, K^+ 在土壤中移动性较小,结合土壤容重增大, K^+ 分布面积略有减小,因此 K^+ 含量均

值随土壤容重增加而增大,且在微润管附近出现富集现象,D1.30 时微润管附近 K^+ 含量最高。土壤容重增大,水盐均匀系数减小,可能由于土壤容重增大,孔隙度减小,水盐运移、扩散与再分布降低所致。另外,相对于入渗界面的势梯度,重力势梯度对水盐的影响微小,因此未出现淋洗现象。

土壤水盐迁移常用经典数学模型计算获得,但由于模型参数较多且较难确定,限制了模型的应用。Logistic 模型在多个领域已有广泛应用^[21-26]。与传统模型比较,四参数 Log-logistic 模型增加了一个参数(拐点),该模型灵活性高,对于符合 S 型曲线的的数据,拟合效果优良^[25]。本文基于水盐含量均值拟合的曲线公式,系统总结了不同水头与容重下的水盐分布模型,通过模拟曲线可直观得到与竖插式微润管不同距离的水盐含量均值。因此,四参数 Log-logistic 模型为模拟微润灌溉水盐分布提供了思路。

水肥一体化微润灌溉可根据土壤状况及作物不同阶段的生长特性,有效控制水分、养分供给的数量和比例,充分发挥水肥耦合效应,提高水肥利用率,达到以肥调水,以水促肥,协调水肥供应状况,实现水肥高效利用。根据土壤容重和作物在不同生长期的水盐(水肥)需求量,通过调控水头来改变湿润体的水盐分布,同时调控微润管与作物的水平距离使水盐分布与作物需求相匹配,从而达到节水增效的目的。本研究结果尤其对宽距经济林微润水肥一体化灌溉的推广应用具有一定的指导意义。

4 结论

(1)微润管竖直布设下,水头和土壤容重对微润灌溉湿润体内含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量均值影响显著。

(2)湿润体剖面面积、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量分布面积随着水头的增加而增大;湿润体剖面面积与 NO_3^- -N 和 K^+ 含量分布面积随着土壤容重的增加而减小, K^+ 富集于微润管周围。

(3)随着水头增加,微润灌溉湿润体内含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量均值及其均匀度显著增大;随着土壤容重增加,湿润体剖面及湿润体内含水率和 NO_3^- -N 含量均值显著减小,而 K^+ 含量均值略有增大,水盐含量均匀度显著降低。

(4)四参数 Log-logistic 模型能很好地拟合竖插式微润灌溉湿润体内含水率、 NO_3^- -N 和 K^+ 含量均值的分布规律。

参 考 文 献

- 1 薛万来, 牛文全, 张俊, 等. 压力水头对微润灌土壤水分运动特性影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6):7-11.
XUE Wanlai, NIU Wenquan, ZHANG Jun, et al. Effects of hydraulic head on soil water movement under moistube-irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6):7-11. (in Chinese)
- 2 牛文全, 张俊, 张琳琳, 等. 埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12):128-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131221&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021
NIU Wenquan, ZHANG Jun, ZHANG Linlin, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):128-134. (in Chinese)
- 3 朱燕翔, 王新坤, 程岩, 等. 半透膜微润管水力性能试验的研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(5):23-25.
ZHU Yanxiang, WANG Xinkun, CHENG Yan, et al. Research on the hydraulic performance of semi-permeable membrane moistube [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5):23-25. (in Chinese)
- 4 李朝阳, 夏建华, 王兴鹏. 低压微润灌灌水均匀性及土壤水分分布特性[J]. 节水灌溉, 2014(9):9-12.
LI Zhaoyang, XIA Jianhua, WANG Xingpeng. Soil water distribution characteristic and irrigation uniformity of low-pressure moisture irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2014(9):9-12. (in Chinese)
- 5 张子卓, 张珂萌, 牛文全, 等. 微润带埋深对温室番茄生长和土壤水分动态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2):122-129.
ZHANG Zizhuo, ZHANG Kemeng, NIU Wenquan, et al. Effects of burying depth on growth of tomato and soil moisture dynamics by moistube-irrigation in greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2):122-129. (in Chinese)
- 6 何玉琴, 成自勇, 张芮, 等. 不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(4):566-569.
HE Yuqin, CHENG Ziyong, ZHANG Rui, et al. Effects of different ways of micro-moist irrigation on growth and yield of maize [J]. Journal of South China Agricultural University, 2012, 33(4):566-569. (in Chinese)
- 7 谢文香, 祁世磊, 刘国宏, 等. 地理微润管入渗试验研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12):2201-2205.
XIE Wenxiang, QI Shilei, LIU Guohong, et al. Buried moistube infiltration testing under sandy loam [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2014, 51(12):2201-2205. (in Chinese)
- 8 张俊, 牛文全, 张琳琳, 等. 微润灌溉线源入渗湿润体特性试验研究[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6):32-38.
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Experimental study on characters of wetted soil in moistube irrigation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6):32-38. (in Chinese)
- 9 牛文全, 薛万来. 矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4):163-172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140426&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.026.
NIU Wenquan, XUE Wanlai. Effects of mineralization degrees on soil infiltration under moistube-irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):163-172. (in Chinese)
- 10 张立坤, 窦超银, 李光永, 等. 微润灌溉技术在大棚娃娃菜种植中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2013(4):53-55.
ZHANG Likun, DOU Chaoyin, LI Guangyong, et al. Application of self-irrigation to baby cabbage planting in greenhouses [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(4):53-55. (in Chinese)
- 11 BUI E. Soil salinity: a neglected factor in plant ecology and biogeography [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 92:14-25.
- 12 PATEL N, RAJPUT T B S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato [J]. Agricultural Water Management, 2007, 88:209-223.
- 13 YAN Nan, MARSCHNER Petra, CAO Wenhong, et al. Influence of salinity and water content on soil microorganisms [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2015, 3:316-323.
- 14 MACINNIS-NG C M O, ZEPPEL M J B, PALMER A R, et al. Seasonal variations in tree water use and physiology correlate with soil salinity and soil water content in remnant woodlands on saline soils [J]. Journal of Arid Environments, 2016, 129:102-110.
- 15 SELIM T, BERNDTSSON R, PERSSON M. Simulation of soil water and salinity distribution under surface drip irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 2013, 62:352-362.
- 16 PARVIZI H, SEPASKHAH A R, AHMADI S H. Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit yields and water productivity of a pomegranate (*Punica granatum* (L.) cv. Rabab) [J]. Agricultural Water Management, 2014, 146:45-56.
- 17 SAADAT S, HOMAEI M. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage [J]. Agricultural Water Management, 2015, 152:119-124.
- 18 AHMED C B, MAGDICH S, ROUINA B B, et al. Saline water irrigation effects on soil salinity distribution and some physiological responses of field grown chenlali olive [J]. Journal of Environment Management, 2012, 113:538-544.
- 19 SELIM T, BOUKSILA F, BERNDTSSON R, et al. Soil water and salinity distribution under different treatments of drip irrigation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(4):1144-1156.

20 RUSSO D, LAUFER A, BARDHAN G, et al. Salinity control in a clay soil beneath an orchard with treated waste water in the presence of a high water table; a numerical study [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531(Part1):198 – 213.

21 施建平, 鲁如坤, 时正元, 等. Logistic 回归模型在红壤地区早稻推荐施肥中的应用[J]. *土壤学报*, 2002,39(6):853 – 862. SHI Jianping, LU Rukun, SHI Zhengyuan, et al. Application of logistic regression for early rice recommended fertilization in red soil area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6):853 – 862. (in Chinese)

22 张英虎, 牛健植, 杜晓晴, 等. 鹭峰国家森林公园土壤优先流现象分析[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1):41 – 45. ZHANG Yinghu, NIU Jianzhi, DU Xiaoqing, et al. Analysis of preferential flow phenomenon in Jiufeng national forest park [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1):41 – 45. (in Chinese)

23 陈世宝, 林蕾, 魏威, 等. 基于不同测试终点的土壤锌毒性阈值及预测模型[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5):922 – 930. CHEN Shibao, LIN Lei, WEI Wei, et al. Comparative study of Zn-toxicity thresholds in 16 Chinese soils as determined by different bioassay endpoints and its predicted models [J]. *China Environment Science*, 2013, 33(5):922 – 930. (in Chinese)

24 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21):223 – 232. WANG Jinman, GUO Lingli, BAI Zhongke, et al. Succession low of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(21):223 – 232. (in Chinese)

25 冯国双, 谭德讲, 刘韞宁, 等. 四参数 log – logistic 模型在生物活性测定中的应用[J]. *药物分析杂志*, 2013, 33(11):1849 – 1851. FENG Guoshuang, TAN Dejiang, LIU Yunning, et al. Application of 4-parameter log – logistic model in bioassay [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2013, 33(11):1849 – 1851. (in Chinese)

26 薛晓萍, 王建国, 郭文琪, 等. 氮素水平对初花后棉株生长量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响[J]. *生态学报*, 2006,26(11):3631 – 3640. XUE Xiaoping, WANG Jianguo, GUO Wenqi, et al. Effects of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11):3631 – 3640. (in Chinese)

27 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009,25(6):40 – 45. LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6):40 – 45. (in Chinese)

28 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015,31(4):107 – 112. WANG Honglan, TANG Xiangyu, ZHANG Wei, et al. Effects of biochar application on tilth soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4):107 – 112. (in Chinese)