

刘天麒,孟繁佳,陈 昕,等. 温室中作物根区土壤水分数学研究方法[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):459-462.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.128

温室中作物根区土壤水分数学研究方法

刘天麒,孟繁佳,陈 昕,卢 韬

(中国农业大学信息与电气工程学院/农业信息获取技术重点实验室,北京 100083)

摘要:温室中,土壤水分空间差异是评价灌溉质量的重要指标。研究了中国农业大学河北涿州农场日光温室内一垄土壤中作物根区水分的变化规律。根据连续 4 d 的观测数据,分析了温室内移动传感器所测土壤中作物根区水分的逐点变化情况,并根据最高含水量和最低含水量归纳出采用含水量逐点变化系数计算逐点根区水分的方法。结果表明,该方法所得的作物根区逐点含水量模拟结果与实测含水量较为吻合。在此基础上采用分段插值法,推算出了温室中任意位置根区含水量的数学表达式。该研究为温室作物的精量灌溉决策提供了科学的数据支撑。

关键词:温室;含水量;土壤;插值法;数学模型

中图分类号: S151.9⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0459-03

在温室环境中,不同的灌溉供水方式可以改变作物根系的生长发育和分布,采用合理的灌溉对策控制根区水分状况,有利于作物产量的形成和水分的高效利用^[1-6]。因此,对作物根区土壤水分空间差异的研究,对今后为科学灌溉决策提供有效的数据支撑有着重要意义。目前国内外对作物根区土壤水分空间差异的研究较少^[7-14],且大多是对垂直土壤空间水分分布的分析,而对一垄土壤所在的水平空间含水量研究甚少。然而水平分布的农作物如果水分灌溉不均匀,则会导致水资源利用效率低、作物生长状态不均等问题。

本研究结合温室的小环境特点,参照建筑上暖通空调领域的研究方法^[15-16],对中国农业大学河北涿州农场日光温室一垄土壤中传感器实测的 75 个逐点数据进行归一化处理,进而得到该垄土壤的根区含水量逐点变化系数;使用计算得到的逐点变化系数简化温室中农作物根区逐点含水量的模拟方法,为温室内多垄土壤的精量灌溉方式的改善提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料来源

本研究采用移动式土壤水分传感器测量涿州农场日光温室内农作物根区含水量数据。该日光温室内的土壤由多垄组成,选取其中一垄土壤进行测量,从 2014 年 11 月 19—25 日连续 7 d 进行测量,每天测量 4 次,每隔 6 h 测量 1 次,做数据分析时,将前 4 d 的根区水分数据作为已知数据,后 3 d 的根区水分数据用于结果验证。

传感器工作原理如图 1^[17-20]。该土壤水分传感器能在植物根区连续移动测量,在 3.9 m 管道自动稳定运行,每隔 5 cm 便对作物根区水分数据进行采集,总共采集 75 个数据

点,直到到达限位传感器检测范围之后,传感器测量系统停止工作。

1.2 研究方法

数据处理中,传感器在一垄土壤移动过程中依次采集了 75 个数据点,将其分成 25 组,每组 3 个数据,每组数据记为 1 个测量点。分别计算各测量点的平均值和逐点变化系数,然后将其在同 1 d 内的不同时刻进行对比,若相差不大,则取平均值代表,之后再对不同日期之间的逐点变化系数进行对比,若不同日期间差异不大,则也可以用同一系数来表达,具体计算方法步骤如下:

(1) 各时刻数据分别处理。

(2) 按顺序将 75 个数据分为 25 个测量点,每个测量点包含 3 个数据,并取其平均值作为该测量点的含水量:

$$w = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 w_i. \quad (1)$$

式中: w 为每个测量点所包含 3 个数据含水量的平均值, cm^3/cm^3 ; w_i 为每个测量点第 i 个数据点含水量数据, cm^3/cm^3 。

(3) 数据进行归一化处理,计算各测量点的土壤水分逐点变化系数。

$$w = \bar{w} + \beta \cdot \Delta w. \quad (2)$$

式中: w 为土壤中某测量点的土壤含水量, cm^3/cm^3 ; β 为土壤某测量点的逐点变化系数; Δw 为含水量差值,由该时刻传感器所得出 25 组数据的最高和最低含水量计算得到, cm^3/cm^3 ; \bar{w} 该垄土壤平均含水量, cm^3/cm^3 ,可由式(3)简化计算:

$$\bar{w} = \frac{w_{\max} + w_{\min}}{2}. \quad (3)$$

式中: w_{\max} 该垄土壤 25 个测量点中最高含水量, cm^3/cm^3 ; w_{\min} 该垄土壤 25 个测量点中最低含水量, cm^3/cm^3 。

由式(2)、(3)可知,各时刻根区水分逐点变化系数 β 为

$$\beta = \frac{w - \frac{w_{\max} + w_{\min}}{2}}{\Delta w}. \quad (4)$$

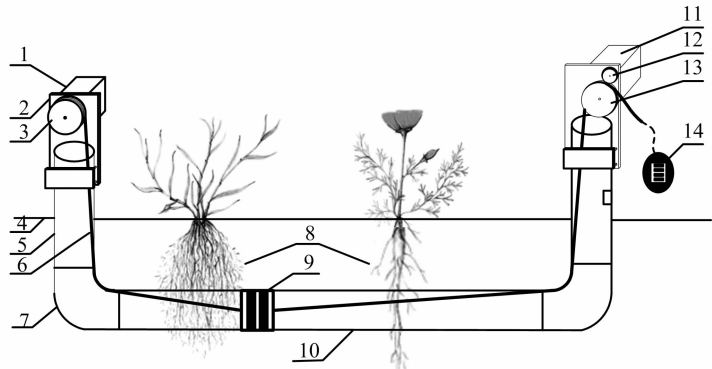
通过计算可得到任意时刻该垄土壤的 25 个测量点的逐点变化系数。同一方法即可得到各个时刻该垄土壤含水量的

收稿日期:2015-07-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:31401294);教育部博士点基金(编号:20130008120013)。

作者简介:刘天麒(1993—),女,湖北荆州人,硕士研究生,从事农业信息化、农业大数据方面的研究。E-mail:837680695@qq.com。

通信作者:陈 昕,副教授,硕士生导师,主要从事农业信息化、农业大数据方面的研究。E-mail:chxin@cau.edu.cn。



1—直流电机；2—传动系统支架；3—绕线轮；4—地面；5—纵向管；6—牵引线和电缆线；7—90°弯头；8—植物根茎；9—土壤水分传感器；10—横向PVC管；11—步进电机；12—从动轮；13—主动轮；14—控制采集装置

图1 传感器测量系统总体结构

逐点变化系数。

(4) 传感器每天测量 4 个时刻,即可得到每天 4 个时刻根区水分的逐点变化系数。

(5) 对比不同日期的逐点变化系数,若结果一致,则取平均值作为温室作物根区水分的逐点变化系数。

通过以上计算,在已知某时刻的最高、最低含水量的条件下,即可计算该垄土壤中任一位置的根区含水量。对得到的根区水分的逐点变化系数采用分段插值法展开,便可以计算该垄土壤在任意位置点的根区含水量。

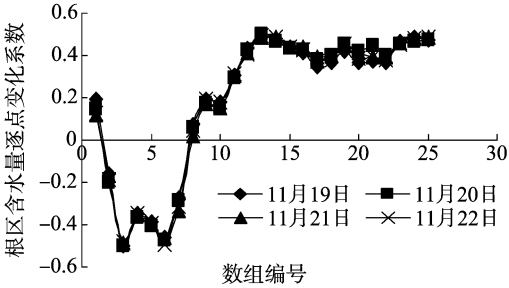


图2 各日期温室作物根区含水量逐点变化系数对比

2 结果与分析

2.1 根区水分变化规律

为了验证数据的可靠性,采用传感器标定方法^[17,19]将移动传感器所测各个数据点的实测数据分别与烘干法测量数据进行了对比,结果表明所测的根区水分数据与烘干法测量数据的 r^2 达到了 0.98 以上,因此测试数据可信。

在 0:00、06:00、12:00、18:00 这 4 个时刻分别测量该垄土壤 75 个数据点的含水量,将其分成 25 个测量点,每个测量点包含 3 个数据,分别计算在 4 个时刻 25 个测量点的含水量逐点变化系数,取 4 个时刻计算结果的平均值作为当天含水量逐点变化系数。每天重复执行此步骤,对每天根区水分的逐点变化系数进行对比分析,如图 2 所示,计算得到的该垄土壤在 4 d 内的根区水分逐点变化系数趋势相同, $r^2=0.9979$ 。因此可以将 4 d 的根区水分逐点变化系数取平均,由统一的变化系数来表示温室作物根区水分的逐点变化。

通过以上分析,得到该垄土壤 4 d 内温室作物根区 25 个测量点的含水量逐点变化系数的平均值(表 1)。由表 1 可知,温室内作物根区含水量最低值出现在测试点 3 和测试点 6 所在区域内,以此决断日后在灌溉方式的改进上可对该区域适当增加灌溉量;作物根区含水量在测试点 13~25 之间,其值相对较高,该编号所占区域约为传感器测量区域的 1/2,日后可以据此对其后半区域适当减少灌溉。其余测试点所处位置的根区含水量在此范围内波动。

2.2 模拟方法的验证

本研究对涿州农场日光温室 2014 年 11 月 23—25 日的作物根区含水量数据进行了测试。取 3 d 数据的平均含水量作为实际测量值进行验证。实际测量值和根据逐点变化系数

表 1 温室作物根区含水量逐点变化系数

测试点	含水量逐点变化系数 β
1	0.147
2	-0.179
3	-0.491
4	-0.353
5	-0.396
6	-0.472
7	-0.300
8	0.051
9	0.183
10	0.166
11	0.306
12	0.421
13	0.492
14	0.479
15	0.439
16	0.427
17	0.375
18	0.392
19	0.444
20	0.397
21	0.401
22	0.386
23	0.458
24	0.479
25	0.479

得到的模拟值的交叉检验结果见图 3。统计结果表明,涿州农场日光温室作物根区的模拟含水量与实测值的 r^2 为 0.995,均方根误差为 0.035 cm³/cm³。可见运用逐点含水量

系数法对该垄土壤传感器所测作物根区进行 75 个点的逐点含水量模拟,其结果较好地反映了测试区域内逐点含水量的变化。

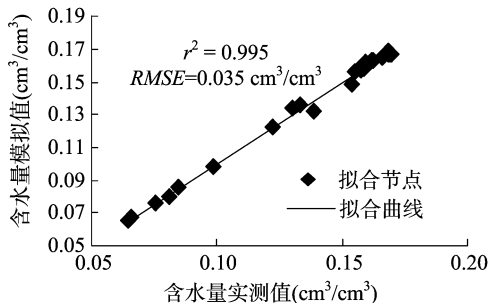


图3 模拟值与实测值的交叉检验结果

2.2 任意位置根区含水量的计算方法

根据以上作物根区含水量逐点变化系数研究结果,采用插值法即可计算该垄地以及该温室内多垄地任意位置的根区含水量。插值法由于简单、实用和补偿效果好,被广泛应用到工程中^[21]。本研究结合数据特征,采用分段线性插值法对移动传感器所经过的任意位置含水量进行模拟。

表 2 模拟数据参照

测量点	到起始点距离(m)	含水量(cm ³ /cm ³)
1	0.15	0.132
2	0.30	0.098
3	0.45	0.066
4	0.60	0.080
5	0.75	0.076
6	0.90	0.068
7	1.05	0.086
8	1.20	0.122
9	1.35	0.136
10	1.50	0.135
11	1.65	0.149
12	1.80	0.161
13	1.95	0.169
14	2.10	0.167
15	2.25	0.163
16	2.40	0.162
17	2.55	0.156
18	2.70	0.158
19	2.85	0.164
20	3.00	0.159
21	3.15	0.159
22	3.30	0.158
23	3.45	0.165
24	3.60	0.167
25	3.75	0.167

本研究以 0.15 m 为 1 个步长对需要测量的含水量范围进行分段,1 个编号代表 1 个步长的距离,顺序计量。在模拟计算时,将需要计算根区含水量的位置到起点的距离(S)与表 2 中的距离相比较(可采用对分搜索法),直到落到某一编号所对应的范围内($S_{n+1} \geq S \geq S_n$)时停止。进而再用线性插值法计算出其含水量,具体计算公式为:

$$\frac{S - S_n}{W - W_n} = \frac{S_{n+1} - S_n}{W_{n+1} - W_n} \Rightarrow W = \frac{S - S_n}{S_{n+1} - S_n} (W_{n+1} - W_n) + W_n \tag{5}$$

式中:W 为待计算某位置根区的含水量;W_{n+1} 为比 W 大的第一个根区测量点含水量;W_n 为比 W 小的第一个根区测量点含水量;S 为待计算的某位置到起始点的距离;S_{n+1} 为比 S 大的第一个长度在表 2 中对应的距离;S_n 为比 S 小的第一个长度所对应的距离。

根据公式(5)、表 2 以及该时刻的最高、最低含水量,即可模拟计算任意时刻温室作物任意根区所在位置的含水量,便可用此结果对温室作物根区水分环境进行模拟。

3 结论与讨论

本研究通过计算,确定了涿州农场日光温室农作物在一垄土壤内的根区含水量逐点变化系数,经过检验,该系数真实反映了移动传感器测量时所经过的一垄土壤中作物根区水分的整体变化规律。据此可计算该垄地及该温室内任一垄地任意位置的根区含水量,简化了 75 个数据含水量的计算。同时通过分段插值法展开,给出了温室内任意位置的作物根区含水量的数学表达式,可以用来计算这段时间温室内任意位置的根区含水量,进而科学地确定日后农作物在水平空间的灌溉方式,对农作物健康成长与高效生产具有重要指导意义。

由于观测数据的限制,只进行了连续 4 d 的测试和 3 d 的结果验证,测试地点也仅局限于 1 个温室,因此还有待更多时间和地点的观测数据来进行检验。同时,温室内作物根区含水量也会受到植物种类、温室内环境、室外环境等多方面因素的影响,该系数只能整体反映温室内一定范围农作物根区的水分状况,若遇到环境突变时,温室内作物根区含水量的模拟效果则存在一定的偏差,需要在今后的研究中结合其他条件逐渐改进。

参考文献:

[1] Hu X T, Chen H, Wang J, et al. Effects of soil water content on cotton root growth and distribution under mulched drip irrigation [J]. Agricultural Sciences in China, 2009, 8(6): 709 - 716.

[2] Ahmed B A O, Inoue M, Moritani S. Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 165 - 170.

[3] 冯广龙, 罗远培. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 96 - 103.

[4] 李运生, 王 菱, 刘士平, 等. 土壤 - 根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(10): 1680 - 1687.

[5] 李凤民, 郭安红, 雒 梅, 等. 土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 575 - 579.

[6] 罗宏海, 朱建军, 赵瑞海, 等. 膜下滴灌条件下根区水分对棉花根系生长及产量的调节[J]. 棉花学报, 2010, 23(1): 63 - 69.

[7] Wijewardana Y G N S, Galagedara L W. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 24 - 33.

严群芳,张世其,蔡秀萍,等. 农作物副产品用作废水处理固体碳源[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):462-464.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.129

农作物副产品用作废水处理固体碳源

严群芳¹, 张世其², 蔡秀萍¹, 时志敏², 贾培红²

(1. 江苏食品药品职业技术学院, 江苏淮安 223003; 2. 淮安四季青污水处理厂, 江苏淮安 223002)

摘要:生物脱氮除磷法处理有机物含量较低的污水需要补充碳源,拟利用大豆秸秆、蚕豆秸秆、豇豆藤、豌豆藤、绿豆藤、花生藤、花生壳等 7 种农业废弃物用作固体氮源进行相关研究。结果表明:豇豆藤、豌豆藤、绿豆藤、花生藤 4 种材料释碳量很少,不适合作为碳源;蚕豆秸秆、大豆秸秆经一定的预处理后,可单独作为反硝化脱氮的固体碳源;大豆秸秆还可以和花生壳按等比例混合作为混合固体碳源,固体碳源材料用量为 6 g/L 时,直到 16 d 后还能持续提供足够碳源,污水中的硝态氮去除率高达 95% 以上。

关键词:农业废弃物;废水处理;固体碳源;反硝化脱氮

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0462-03

由于许多城市生活污水的有机物含量较低,针对这样的低碳源城市生活污水,在生物脱氮除磷处理工艺中需要补充碳源^[1-2],否则较难达到排放水体的标准。投加液体碳源如甲醇、乙醇、葡萄糖^[3]等,存在运输不便、不安全、成本高等一系列问题,而且进水水质常常不稳定,导致碳源投加量难以控制。近年来,利用含纤维素类物质用作固体碳源方面的研究越来越引起关注^[4-5],我国每年各类农作物中仅秸秆总产量就达 7 亿 t 左右^[6],还有各种壳类废弃物,是一种巨大的可利

用再生资源。已有研究表明,稻壳、玉米芯等可作为较好的固体碳源,而花生壳虽在初期释碳较多,但持续性不好而不能被很好地利用^[7-8]。本研究以来源广泛的 7 种不同农作物的副产物为原料,分析各自的释碳规律,探寻能持续有效地供碳的单一或混合固体碳源,为更合理有效地利用农业废弃物提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及预处理

花生藤、花生壳、大豆秸秆,购自淮安市城南乡农村;蚕豆秸秆、豇豆、豌豆、绿豆藤,取自淮安市淮阴区农村。将各种原材料洗净、凉干,粉碎为 0.2~0.4 cm 大小,各称取 500 g,用稀 H₂SO₄ 浸泡 20 min^[9],在高压锅内蒸煮 20 min 后迅速减压^[10]。

自配污水:200 mg/L 葡萄糖,100 mg/L NaNO₃,20 mg/L

收稿日期:2015-08-02

基金项目:江苏省高等职业院校高级访问工程师计划(编号:2014FG040)。

作者简介:严群芳(1971—),女,江苏洪泽人,硕士,副教授,从事化工及环保研究。E-mail:yan7173@163.com。

[8] Hedley C B, Yule I J. A method for spatial prediction of daily soil water status for precise irrigation scheduling [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(12): 1737-1745.

[9] Shi J C, Li S, Zuo Q, et al. An index for plant water deficit based on root-weighted soil water content [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 285-294.

[10] Aljoumani B, Sánchez-Espigares J A, Cañameras N, et al. Time series outlier and intervention analysis: Irrigation management influences on soil water content in silty loam soil [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 111: 105-114.

[11] Hossain M B, Lamb D W, Lockwood P V, Frazier P. EM38 for volumetric soil water content estimation in the root-zone of deep vertosol soils [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 100-109.

[12] Zou P, Yang J S, Fu J R, et al. Artificial neural network and time series models for predicting soil salt and water content [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 2009-2019.

[13] Hu W, Si B C. Can soil water measurements at a certain depth be used to estimate mean soil water content of a soil profile at a point or at a hillslope scale? [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 67-75.

[14] Chen L J, Feng Q, Li F R, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 24-33.

[15] GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S].

[16] 徐凡, 马承伟. 温室环境分析中冬季室外气温日变化及数学表达 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 203-209.

[17] 秦玉龙. 一种面向植物根区土壤水分的移动传感系统[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.

[18] Yurui S, Lammers P S, Daokun M, et al. Determining soil physical properties by multi-sensor technique [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147(1): 352-357.

[19] 周海洋, 孙宇瑞, Lammers P S, 等. 基于水平尺度扩展的土壤水分介电传感技术 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 261-265.

[20] Sun Y, Zhou H, Qin Y, et al. Horizontal monitoring of soil water content using a novel automated and mobile electromagnetic access-tube sensor [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 50-55.

[21] Berrut J P, Klein G. Recent advances in linear barycentric rational interpolation [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2014, 259: 95-107.