

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.022

基于制造偏差的滴灌系统综合流量偏差率*

张林¹ 吴普特¹ 朱德兰² 王剑²

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在文献[10]提出的流量偏差率公式基础上,作了进一步推导,简化了公式中的参数。根据步进法水力解析原理,模拟了不同制造偏差下给定灌水小区的综合流量偏差率,通过对综合流量偏差率的统计分析,验证了理论公式。利用公式分析了制造偏差对综合流量偏差率的影响,提出了灌水小区综合流量偏差率允许值的建议。

关键词: 滴灌 流量偏差率 制造偏差 允许值

中图分类号: S275.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)12-0135-05

Integrated Flow Deviation Rate of Drip Irrigation System Based on Manufacturing Variation

Zhang Lin¹ Wu Pute¹ Zhu Delan² Wang Jian²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the formula of flow deviation rate proposed by authors in reference [10], the further derivation was conducted to simplify the parameters in the formula for designing drip irrigation system economically and credibly. According to the hydraulic analysis using step-by-step method, the integrated flow deviation rates for a drip irrigation submain unit were calculated at different emitter manufacturing variation. The formula of flow deviation rate was verified by the statistical analysis of the integrated flow deviation rate. Further, the effect of emitter manufacturing variation on integrated flow deviation rate was analyzed using the formula, and the allowable value for integrated flow deviation rate of drip irrigation submain unit was recommended for drip irrigation system design.

Key words: Drip irrigation Flow deviation rate Manufacturing variation Allowable value

引言

灌水均匀度是衡量滴灌系统灌溉质量的一个重要指标,滴灌工程设计中通常采用限定流量偏差率的办法保证系统灌水均匀度^[1-2]。我国现行的《微灌工程技术规范》在流量偏差率计算时仅考虑了水力偏差一项因素^[3]。Keller等提出了同时考虑水力偏差和灌水器制造偏差的凯勒均匀度(EU)计算式,并被美国农业部水土保持局推荐在微灌工程设计中使用至今^[4]。然而,为了提高滴灌系统设计精度,

使滴灌系统实际运行指标与设计目标最大限度地接近,在系统设计时应同时考虑水力、制造和地形偏差。张国祥提出了考虑水力、地形及制造偏差,并建立了考虑三偏差的滴灌系统流量总偏差率计算公式^[5];牛文全等定义了地面偏差率,推导出了综合流量偏差率和极限综合流量偏差率的计算方法^[6];朱德兰等通过计算机模拟,经统计分析确定了考虑三偏差的灌水均匀度计算公式,进而得到总流量偏差率与总灌水均匀度之间的关系^[7-8]。笔者对滴灌系统流量偏差率计算方法也进行了研究,根据不利

收稿日期: 2013-04-01 修回日期: 2013-07-04

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B02)、国家工程技术研究中心再建资助项目(2011FU125Z27)、西北农林科技大学博士科研启动基金资助项目(Z111021310)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)

作者简介: 张林,助理研究员,博士,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail: z10211wy@163.com

通讯作者: 吴普特,研究员,博士生导师,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

组合原则与概率论知识,分析了制造偏差对滴灌系统流量偏差率的影响,建立了考虑水力、地形和制造三偏差的滴灌系统流量偏差率计算公式,并提出了基于该公式的滴灌灌水小区水力设计方法^[9-11]。

按照现行的《微灌工程技术规范》,灌水小区流量偏差率的允许值为20%,仅为水力流量偏差率的限定值。若在工程设计中计入制造偏差等因素,那么需要对流量偏差率的允许值进行重新规定。

为了使滴灌系统流量偏差率的计算更为简便,同时使滴灌工程设计更为简单,本文在原有流量偏差率公式的基础上,进行进一步推导和简化,并分析制造偏差对综合流量偏差率的影响,提出灌水小区综合流量偏差率允许值的建议,以便考虑制造偏差等因素的灌水小区综合流量偏差率公式直接用于滴灌工程设计中。

1 现有的基础与进一步推导

文献[10]推导出的均匀坡度下滴灌系统灌水小区综合流量偏差率计算式为

$$q_v = (1 - u_1 c_v) q_{hv} + 2u_1 c_v \left(\frac{h_{\max}}{h_d} \right)^x \quad (1)$$

式中 q_v ——考虑水力、地形和制造偏差的灌水小区综合流量偏差率, %

u_1 ——服从均值为0、标准差为1的正态分布的随机数

c_v ——制造偏差系数, %

q_{hv} ——考虑水力偏差的灌水小区流量偏差率, %

h_{\max} ——灌水小区中灌水器最大工作压力水头, m

h_d ——灌水器设计工作压力水头, m

x ——灌水器流态指数

灌水小区中灌水器最大工作压力水头可用经验公式计算^[12]

$$h_{\max} = (1 + 0.65q_{hv})^{\frac{1}{x}} h_d \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$q_v = q_{hv} + 2u_1 c_v + 0.3u_1 c_v q_{hv} \quad (3)$$

正如文献[10]中所述,式(3)中包含一个随机数 u_1 , u_1 的取值与滴灌系统流量偏差率的保证率(即:滴灌系统中实际流量偏差率小于式(3)计算值的保证概率)有关。

当滴灌系统流量偏差率的保证率取0.999(近似为1,意为100%的保证)时, u_1 为3.08;在实际情况中,一般认为制造偏差系数 c_v 小于5%的灌水器为合格产品;另外,按照《微灌工程技术规范》中的规定,在实际滴灌工程设计中 q_{hv} 不能超过20%。将

u_1 、 c_v 和 q_{hv} 取极值,即 $u_1 = 3.08$ 、 $c_v = 5\%$ 、 $q_{hv} = 20\%$ 代入 $0.3u_1 c_v q_{hv}$ 中: $0.3u_1 c_v q_{hv} = 0.3 \times 3.08 \times 5\% \times 20\% = 0.924\%$, 由于 $0.3u_1 c_v q_{hv} < 1\%$, 所以式(3)中 $0.3u_1 c_v q_{hv}$ 这一项可以忽略不计,则 q_v 可近似为

$$q_v = q_{hv} + 2u_1 c_v \quad (4)$$

2 灌水小区流量偏差率数值模拟

滴灌灌水小区内任何一个灌水器的流量均可表示为

$$q_{ji} = k_{ji} (h_{ji} + z_{ji})^x \quad (5)$$

式中 q_{ji} ——第 j 条毛管上第 i 个灌水器流量, L/h

k_{ji} ——第 j 条毛管上第 i 个灌水器流量系数

h_{ji} ——第 j 条毛管上第 i 个灌水器工作压力水头, m

z_{ji} ——第 j 条毛管上第 i 个灌水器的田面局部高差, m

对同一批灌水器,流量系数 k_{ji} 可以看作是服从正态分布的随机数^[13], 可表示为

$$k_{ji} = k_{\text{avg}} (1 + w_{ji} c_v) \quad (6)$$

式中 k_{avg} ——灌水器流量系数 k 的平均值

w_{ji} ——服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数

在灌水器流量计算时, w_{ji} 可通过计算机程序自动生成,并随机赋给支管单元内的每一个灌水器。

将式(6)代入式(5)得滴灌灌水小区内任一灌水器流量为

$$q_{ji} = k_{\text{avg}} (1 + w_{ji} c_v) (h_{ji} + z_{ji})^x \quad (7)$$

根据水力学知识,忽略流速水头,第 j 条毛管上第 i 个灌水器工作压力水头为

$$h_{ji} = h_{j(i-1)} + h_{fj(i-1)} - J_L S_e \quad (8)$$

式中 $h_{fj(i-1)}$ ——第 j 条毛管上第 $i-1$ 管段水头损失, m

J_L ——沿毛管方向地面坡度,顺坡取正值,逆坡取负值

S_e ——灌水器间距, m

毛管水头损失计算式为

$$h_{fj} = f \nu^{0.25} \frac{Q_{ji}^{1.75}}{D_L^{4.75}} S_e \left(1 + \frac{S_o}{S_e} \right) \quad (9)$$

其中

$$Q_{ji} = \sum q_{ji}$$

式中 f ——摩阻系数

Q_{ji} ——第 j 条毛管上第 $i-1$ 管段流量, L/h

ν ——水的运动黏度, cm^2/s

D_L ——毛管管径, mm

S_o ——考虑局部水头损失的当量长度, m

应用步进法水力解析原理,在灌水小区进口压力给定条件下,对滴灌管网压力流量分布情况进行

计算分析,具体步骤如下:①给定第 1 条毛管(距灌水小区进口最远的毛管为第 1 条毛管,距灌水小区进口最近的毛管为最后 1 条毛管)上第 1 个灌水器(毛管最末端的灌水器为第 1 个灌水器,毛管进口处的灌水器为最后 1 个灌水器)工作压力 H_{11} ,通过式(7)得到第 1 条毛管上第 1 个灌水器流量 q_{11} 及第 1 条毛管上第 1 管段中的流量 Q_{11} ,通过式(8)和式(9)得到第 1 条毛管上第 2 个灌水器工作压力 H_{12} ;再依此计算第 3 个直至第 i 个灌水器工作压力及流量。②确定第 1 条毛管进口压力与流量后,可得到第 2 条毛管进口压力,假定第 2 条毛管上第 1 个灌水器工作压力为 H_{21} ,通过步骤 1 的方法迭代试算,当与入口压力吻合时即可确定 H_{21} 的实际值。③依据同样原理,确定第 3 条毛管至第 j 条毛管上各灌水器工作压力与流量。④比较推算得到的支管进口压力与给定的进口压力,不相等时重新赋值 H_{11} ,重复上述步骤,直到相等时停止。

通过以上步进法水力解析,可得到灌水小区内每个灌水器的流量,再通过微灌工程技术规范中的流量偏差率和均匀系数计算公式即可得到该灌水小区的流量偏差率和均匀系数。

3 制造偏差对灌水小区综合流量偏差率的影响

给定灌水小区,通过上述数值模拟的方法可以分析不同灌水器制造偏差对综合流量偏差率的影响。灌水小区参数为:支管长度 60 m,管径 50 mm,毛管长度 80 m,管径 16 mm,毛管间距和灌水器间距 1 m,毛管单向布置,支、毛管铺设坡度均为平坡,灌水小区支管进口压力水头 12 m,灌水器压力-流量公式为 $q = 1.22 h^{0.5}$ 。

图 1 为制造偏差与综合流量偏差率之间的关系。从图中可以看出,综合流量偏差率 q_v 与制造偏差系数 c_v 呈线性关系,即

$$q_v = 5.6047c_v + 16.66 \quad (10)$$

式(10)的决定系数 R^2 达到 0.984 3,说明 q_v 与 c_v 的相关性很高。当 c_v 取 0(不考虑制造偏差)时,

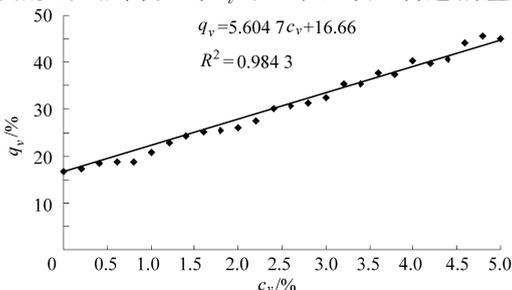


图 1 制造偏差与综合流量偏差率之间的关系

Fig. 1 Relationship between emitter manufacturing variation and integrated flow deviation rate

q_v 为 16.66%,即为水力流量偏差率 q_{hv} 。式(10)中 c_v 的系数 5.604 7 相当于式(4)中的 $2u_1$,即 u_1 为 2.802 4。对灌水小区综合流量偏差率的统计分析,可说明由理论推导出的式(4)基本能够反映综合流量偏差率与水力流量偏差率及灌水器制造偏差之间的本质联系。

4 灌水小区灌水均匀性保证率分析

式(4)可直接应用于滴灌系统设计,但是 u_1 的取值尚未确定。 u_1 的取值与滴灌系统流量偏差率的保证率有关。为了充分保证系统灌水质量,式(4)流量偏差率的计算值应大于系统流量偏差的真实值;同时,为了最大限度地节约系统成本,计算值应充分接近真实值。流量偏差率是衡量滴灌系统灌水质量的一个重要指标,因此滴灌系统流量偏差率的保证率事实上也就是反映了灌水均匀性的保证率。为了表述更清晰,下文涉及到的滴灌系统流量偏差率的保证率全部用灌水均匀性保证率来表述。

文献[10]给出了 u_1 与灌水均匀性保证率 P 的关系

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u_1} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (11)$$

当给定 P 值,由式(11)可以计算出 u_1 。

给定一系列滴灌灌水小区,依据上述流量偏差率数值模拟方法,可获得相应的流量偏差率和均匀系数;已知给定灌水小区的流量偏差率,通过式(4)反算 u_1 ,再利用式(11)就可得到相对应的灌水均匀性保证率 P 。

参照实际滴灌工程情况,模拟的灌水小区参数如表 1 所示,共 180 个灌水小区。每个灌水小区支管进口压力水头均为 12 m,毛管管径为 16 mm,毛管间距为 1 m,支、毛管铺设坡度均为平坡,灌水器压力-流量公式为 $q = 1.22h^{0.5}$,灌水器间距为 1 m。在模拟计算灌水小区压力-流量分布前,将灌水器制造偏差看作是一个服从正态分布的随机变量,通过编写的计算机程序自动生成一系列随机数(随机数个数应与灌水小区内灌水器数目一致),随机分配给灌水小区内每个灌水器。对每个灌水小区,制造偏差随机分布 3 次,重复计算 3 次灌水小区的灌水器压力流量分布情况。

为保证滴灌系统的灌溉质量,灌水小区的灌水均匀系数一般应大于 0.8^[14],因此在下文数据分析中剔除均匀系数小于 0.8 的灌水小区。图 2 为不同制造偏差系数下 P 的累计频率曲线。经计算,当 c_v 为 5%、3% 和 1% 时, P 曲线的偏态系数^[15] 分别为 -1.87、-1.71 和 -1.65。由此可见,3 种不同制造

偏差系数下的 P 曲线均呈负偏或左偏,且偏斜程度较大,说明 P 的平均值偏向数据低端,多数数据大于平均值。由于偏态分布数据的平均值代表性较差,因此在确定 P 时不宜采用平均值;否则,会造成设计出的滴灌系统,其灌溉质量难以得到保证。

表1 模拟的滴灌小区参数与水平

Tab.1 Parameters and levels of simulated drip irrigation submain units

支管长度/m	支管管径/mm	毛管长度/m	灌水器制造偏差系数/%
60	40	80	1
80	50	100	3
100	63	120	5
120		140	
		160	

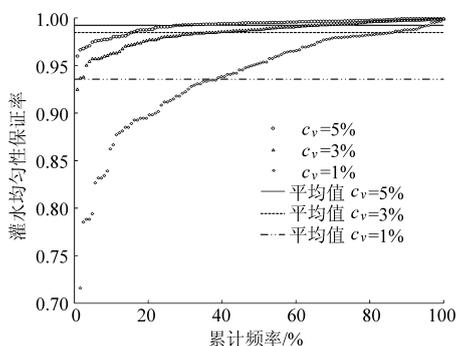


图2 不同制造偏差系数下滴灌小区灌水均匀性保证率 P 累计频率曲线

Fig.2 Accumulative frequency curves of P at different emitter coefficients of manufacturing variation for drip irrigation submain unit

从系统灌溉质量角度讲,滴灌工程设计时 P 越高越好,如果 P 取 1,就可以 100% 保证系统的灌溉质量;但是从系统经济性角度出发, P 偏小较好,这是一对矛盾,因此 P 在选取时需要同时兼顾系统灌溉质量和经济性两个方面。

正如文献[10]中所述,我们提出的流量偏差率计算公式偏于保守,因此可暂取累计频率达到 80% 时的 P 为实际滴灌工程设计的推荐值。不同灌水器制造偏差下的 P 推荐结果如表 2 所示。从表 2 和图 2 中均可看出, c_v 越大,在滴灌工程设计时 P 的取值越高,这与实际情况是相符的。尽管表 2 中的 3 种不同灌水器制造偏差系数(5%、3%和 1%)下 P 的取值分别高达 0.997 4、0.996 1 和 0.982 1,但其对应的 u_1 值差异很大,分别为 2.80、2.66 和 2.10,说明灌水均匀性保证率较高的情况下, P 的微小变化即能造成 u_1 发生较大的改变,从而影响滴灌系统设计和工程成本。因此根据不同的灌水器制造偏差,选取适宜的灌水均匀性保证率 P ,对于兼顾灌溉质量和系统的经济性尤为重要。

表2 不同灌水器制造偏差下的 P 值和 u_1 值

Tab.2 Values of P and u_1 for different emitter manufacturing variation

参数	c_v /%		
	5	3	1
P	0.997 4	0.996 1	0.982 1
u_1	2.80	2.66	2.10

5 灌水小区综合流量偏差率的允许值

按照现行的《微灌工程技术规范》,灌水小区综合流量偏差率 q_v 的允许值为 20%,但规范中未考虑制造偏差的影响,20%的 q_v 允许值仅为水力流量偏差率的限定值。与规范相比,灌水器制造偏差在式(4)中得以体现,在应用式(4)进行微灌工程设计时,如果将 q_v 的允许值再限定为 20%,那么留给水力流量偏差率的空间就较小,从而增加了系统成本。因此,需要重新规定综合流量偏差率 q_v 的允许值,而水力流量偏差率 q_{hv} 的允许值不需要再规定了,可由式(4)直接计算得到。

由式(4)可知, q_v 的允许值和 q_{hv} 的允许值存在如下关系

$$[q_v] = [q_{hv}] + 2u_1c_v \quad (12)$$

式中 $[q_v]$ ——灌水小区综合流量偏差率允许值, %

$[q_{hv}]$ ——灌水小区水力流量偏差率允许值, %

从式(12)可以看出, q_v 的允许值只是在 q_{hv} 允许值的基础上增加了一项 $2u_1c_v$,制造偏差对 q_v 的影响较大。当 q_{hv} 为规范规定的 20% 时,如果 c_v 从 1% 增大到 5% 时,则 q_v 将从 24.2% 增加到 48%。

如果 q_v 允许值取 24.2%,当灌水器制造偏差较大时,留给 q_{hv} 的空间可能非常小,甚至完全没有,比如:当 c_v 取 5% 时, q_{hv} 为 -3.8%,显然不符合实际,说明 q_v 允许值取 24.2% 无疑是偏低的。如果 q_v 允许值取 48%,当灌水器制造偏差较小时,留给 q_{hv} 的空间可能过大,比如:当 c_v 取 1% 时, q_{hv} 为 43.8%,这远远大于规范中 20% 的限定值,说明 q_v 允许值取 48% 是偏高的。因此, q_v 允许值选取仍需同时兼顾系统经济性和灌溉质量两个方面。若 q_v 允许值取值偏小,就会增加系统成本,甚至某些时候,会造成系统无法设计;若 q_v 允许值取值偏大,就会造成灌溉质量难以保证。为此,需要选择一个适中的 q_v 允许值。本文暂取 c_v 为 3% 时的 q_v 值为允许值,即: $q_v = q_{hv} + 2u_1c_v = 20\% + 2 \times 2.66 \times 3\% = 36\%$ 。这与张国祥基于工程实践经验提出的较高档的 q_v 允许值 32% 较为接近^[5]。

6 结论

(1) 简化了文献[10]提出的流量偏差率计算公式,建立了综合流量偏差率 q_v 与水力流量偏差率 q_{hv} 及灌水器制造偏差系数 c_v 之间的函数关系,并通过对灌水小区综合流量偏差率的统计分析,对理论公式进行了验证,结果表明由理论推导出的公式基

本能够反映综合流量偏差率与水力流量偏差率及灌水器制造偏差之间的本质联系。

(2) 对 180 个不同灌水小区的流量偏差率进行了模拟计算,通过统计分析初步确定了不同灌水器制造偏差下的灌水均匀性保证率 P ;分析了制造偏差对综合流量偏差率的影响,提出了灌水小区综合流量偏差率允许值的建议。

参 考 文 献

- Zhang L, Merkley G P. Relationships between common irrigation application uniformity indicators[J]. Irrigation Science, 2012, 30(2):83~88.
- Styles S W, Burt C M, Gaudi F, et al. Accuracy of global microirrigation distribution uniformity estimates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(3):292~297.
- GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 2009.
GB/T 50485—2009 Technical code for microirrigation engineering[S]. 2009. (in Chinese)
- Keller J, Bliesner R D. Sprinkler and trickle irrigation[M]. New York: van Nostrand Reinhold, 1990.
- 张国祥. 考虑三偏差因素的滴灌系统流量总偏差率[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11):27~29.
Zhang Guoxiang. Calculating the total flow deviation rate of drip-irrigation system based on three deviation rates [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11):27~29. (in Chinese)
- 牛文全, 吴普特, 范兴科. 微灌系统综合流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6):85~88.
Niu Wenquan, Wu Pute, Fan Xingke. Method for calculating integrated flux deviation rate of micro-irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6):85~88. (in Chinese)
- 朱德兰, 吴普特, 张青峰, 等. 微地形影响下滴灌均匀度设计指标研究[J]. 排灌机械, 2006, 24(1):22~26.
Zhu Delan, Wu Pute, Zhang Qingfeng, et al. Study on the emission uniformity for the emitter under the condition of farmland micro-terrain action[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(1):22~26. (in Chinese)
- Zhu D L, Wu P T, Merkley G P, et al. Drip irrigation lateral design procedure based on emission uniformity and field topography [J]. Irrigation and Drainage, 2010, 59(5):535~546.
- 张林, 吴普特, 牛文全, 等. 均匀坡度下滴灌系统流量偏差率的计算方法 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):40~44.
Zhang Lin, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Method for calculating flow deviation in drip irrigation system under uniform slope [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8):40~44. (in Chinese)
- 张林, 范兴科, 吴普特, 等. 均匀坡度下考虑三偏差的滴灌系统流量偏差率的计算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):7~14.
Zhang Lin, Fan Xingke, Wu Pute, et al. Calculation of flow deviation rate of drip irrigation system taking three deviation rates into account on uniform slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4):7~14. (in Chinese)
- Zhang Lin, Wu Pute, Zhu Delan. Hydraulic design procedure for drip irrigation submain unit based on relative flow difference [J]. Irrigation Science, 2013, 31(5):1065~1073.
- 张国祥. 微灌毛管水力设计的经验系数法[J]. 节水灌溉, 1991(1):4~8.
Zhang Guoxiang. Empirical coefficient method of hydraulic design for microirrigation lateral [J]. Water Saving Irrigation, 1991(1):4~8. (in Chinese)
- 郑耀泉, 宁堆虎. 滴头制造偏差的模拟与微灌系统随机设计方法的研究[J]. 水利学报, 1991, 22(7):1~6.
Zheng Yaoquan, Ning Duihu. Simulation of emitter manufacturing deviation and development of stochastic design method for trickle irrigation system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22(7):1~6. (in Chinese)
- 张志新. 滴灌工程规划设计原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- 卢黎霞, 陈云玲. 统计学原理[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2006.

(上接第 186 页)

- 方慧, 邹强, 何勇, 等. 基于高光谱的番茄叶片过氧化物酶活力测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8):2228~2233.
Fang Hui, Zou Qiang, He Yong, et al. Detection of activity of POD in tomato leaves based on hyperspectral imaging technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8):2228~2233. (in Chinese)
- 尹小君, 李满春, 赵思峰, 等. PLS 算法在高光谱估测加工番茄白粉病色素含量中的应用[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2):175~180.
Yin Xiaojun, Li Manchun, Zhao Sifeng, et al. PLS algorithm application in hyperspectral estimation of pigment contents in processing tomato leaves under powdery mildew [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):175~180. (in Chinese)