

Gram - Schmidt 算法在加工番茄病叶水分估测中的应用

尹小君^{1,2}, 李满春¹, 赵思峰³, 王登伟³

(1. 南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210093; 2. 石河子大学 信息科学与技术学院, 新疆 石河子 832000; 3. 石河子大学 农学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: Gram—Schmidt 正交变换算法通过成分提取提高了非线性回归模型的精度。利用 Gram—Schmidt 正交变换算法, 对加工番茄病叶相对水分含量进行了高光谱估测。研究结果表明, 病叶相对水分含量的敏感波段为可见光波段 R_{695} 以及近红外波段 R_{761} , R_{1446} , R_{1940} 和 R_{2490} 。对敏感波段进行正交变换, 得到相对水分含量与 R_{1940} 和 R_{2490} 的非线性回归模型, 相关系数为 0.724, 相对误差为 0.52%, 标准误差 (RMSE) 为 0.13, 真实值与预测值拟合的相关系数为 0.623, 表明该方法优于传统相对水分含量的线性模型。研究结果可为加工番茄病害胁迫下品质的精确诊断提供了技术支撑。

关键词: Gram—Schmidt; 加工番茄; 病叶; 水分含量; 估测

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)02-0132-05

中图分类号: TP79, O212.3

Water Content Estimation in Processing Tomato Leaves Using Gram - Schmidt Algorithm

YIN Xiao-jun^{1,2}, LI Man-chun², ZHAO Si-feng³, WANG Deng-wei³

(1. The Institute of Geography Information, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. The Institute of Information Science and Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang

832000, China; 3. The Institute of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Based on measured water contents and spectral reflectance of the bacterial spots on tomato leaves, we attempted to estimate the water contents of diseased leaves using the Gram—Schmidt transformation algorithm. The results show R_{694} in visible and R_{761} , R_{1446} , R_{1940} , and R_{2490} in near-infrared wavelengths were the spectra sensitive to the variations of water contents. Non-linear regression models were then developed to predict water contents using reflectance at R_{1940} and R_{2490} using Gram—Schmidt orthogonal transformation algorithm, with high R^2 (0.724), low relative error (0.52%) and RMSE (0.13). This model was proved superior to the traditional linear model. The findings of this research can provide technical supports for diseases diagnosis of tomato plants under stress.

Keywords: Gram - Schmidt; processing tomato; diseased leaves; water content; estimation

水分是作物的重要组成部分, 水分缺失直接影响作物的生理生化过程和光合作用, 从而影响作物的品质和产量^[1]。用光谱反射率诊断作物水分含量具有可行性^[2], 目前病害胁迫下加工番茄病叶水分含量的研究比较少。部分学者研究了健康状态下作物的水分含量, 如小麦、冬小麦、水稻、棉花, 但大都是人为控制作物的水分, 使用经验统计模型反演作物水分含量^[3-7]。然而, 作物生长过程中, 病害胁迫下水分含量变化相对来说比较小, 光谱反射率与水分含量之间存在非线性的微小变化。因此, 如何更精确地对病害胁迫下作物微量水分含量进行估算已是急需解决的问题。

利用多元线性回归法建立光谱反射率或植被指数与水分含量的关系模型^[3-6], 忽略了入选波段与水

分含量的非线性关系, 同时忽略了入选波段之间的多重相关性。本研究提出一种新的方法, Gram—Schmidt 正交变换算法, 不仅提取了对水分有最佳解释能力的光谱反射率, 而且将光谱反射率集合变换成直角变量, 克服了光谱反射率之间的多重相关性对水分含量估测的不良影响, 同时进行了信息优选, 有效提取了有显著解释作用的波段。Gram—Schmidt 正交变换分解结构清晰^[17-18], 能够充分解释水分含量与光谱反射率的非线性关系。本研究以加工番茄细菌性斑点病病叶为研究对象, 在其生长期不同阶段测定病叶高光谱反射率和水分含量, 分析不同病害等级加工番茄病叶高光谱反射率与水分含量的非线性关系, 通过 Gram—Schmidt 算法建立多元非线性模型,

收稿日期: 2011-08-30

修回日期: 2011-11-23

资助项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目“干旱半干旱区土壤农药污染控制关键技术研究示范”(2007BAC20B04); 国家自然科学基金项目(30800733)

作者简介: 尹小君(1977—), 女(汉族), 四川省射洪县人, 博士研究生, 主要研究方向为遥感应用研究。E-mail: pensesyinxj@163.com。

以期能更准确地反映病叶微弱的水分含量变化,为加工番茄病害胁迫下品质的精确诊断提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验区及样本获取

试验于 2010 年在天山北坡进行。试验病圃区设在石河子大学试验站(44°18'N 88°03'E),土壤类型为壤质灰漠土,其有机质含量 19.2 g/kg、碱解氮 77.3 mg/kg、速效钾 313 mg/kg、速效磷 92 g/kg。大田试验设在农八师 143 团 10 连和 11 连,选用的品种为有里格尔 87-5 和石番 28。采样的时间为 2010 年 8 月 3 日(果实膨大期),品种里格尔 87-5 0 级 30 个叶片,1 级 100 个叶片,2 级 100 个叶片,3 级 40 个叶片,4 级 10 个叶片;2010 年 8 月 8 日(果实膨大期),品种石番 28,1 级 60 个叶片,2 级 90 个叶片,3 级 30 个叶片;8 月 16 日(果实膨大期),品种石番 28,0 级 20 个叶片,1 级 80 个叶片,2 级 60 个叶片,3 级 70 个叶片,4 级 70 个叶片;8 月 19 日(果实膨大期),品种里格尔 87-5,1 级 90 个叶片,2 级 60 个叶片,3 级 100 个叶片,4 级 60 个叶片。采取加工番茄细菌性斑点病第 3 层、大小近似相等的病叶,10 个叶片为 1 个样本,共 107 个样本。

1.2 水分含量分析

病叶用电子天平称其鲜重,在烘箱 100 ℃杀青,于 80 ℃烘到恒重。利用公式(1)计算病叶相对水分含量:

$$W_R = (W_f - W_d) / W_f \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_R ——相对水分含量; W_f ——叶片鲜重;

W_d ——叶片干重。

1.3 病叶光谱测定及病情分级

采用美国 ASD Field Spec Pro FR2500 便携式光谱仪与 ASD Leaf Clip 测试夹耦合测定。ASD Leaf Clip 测试夹本身带有模拟光源,可在密闭环境下测定,操作稳定,测量误差小。Pro FR 2500 便携式光谱仪有 512 个光谱波段,波段范围为 350 ~ 2 500 nm,采用波段宽在 350 ~ 1 000 nm 范围为 1.4 nm;在 1 000 ~ 2 500 nm 范围为 2 nm。光谱分辨率在 350 ~ 1 000 nm 为 3 nm,1 000 ~ 2 500 nm 为 10 nm。在加工番茄病叶左基部、右基部和中上部各测 2 次。每次测定 2 条光谱曲线,每条光谱曲线时间间隔 0.2 s,取平均值作为该叶片的光谱反射率。

从加工番茄得病开始每隔 3 ~ 7 d 在试验田小区内和大田中分别采用网格法和 S 法进行采样。病害等级 I_s (severity index)按照受害面积百分比 0%、0% ~ 10%、10% ~ 30%、30% ~ 50%、> 50%,分别分为 0 级、1 级、2 级、3 级、4 级、5 级,计算公式为:

$$\text{病叶严重度指数}(I_s) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{病害面积}(S_i)}{\text{叶片面积}(S)} \quad (2)$$

式中: S ——叶片面积; i ——病斑个数。

1.4 数据分析方法

利用 Viewspec Program 软件处理得到病叶的光谱反射率值,结合前人研究的植被水分含量指数和新建的加工番茄细菌性斑点病病叶水分含量指数生成水分含量光谱指数表(表 1)。统计分析采用 Excel 和 SPSS 17.0 软件进行。

表 1 水分含量光谱指数表^[10-16,19]

光谱指数	定义	光谱指数	定义
NDWI	$(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$ 反射率	R_{1100} / R_{1200}	R_{1100} / R_{1200} 比值反射率
R_{1930}	R_{1930} 反射率	R_{1300} / R_{1450}	R_{1300} / R_{1450} 比值反射率
R_{1450}	R_{1450} 反射率	R_{1070} / R_{1200}	R_{1070} / R_{1200} 比值反射率
NDVI _[800,670]	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$ 反射率	R_{1300} / R_{1200}	R_{1300} / R_{1200} 比值反射率
R_{970}	R_{970} 反射率	R_{695}	R_{695} 反射率
R_{2500}	R_{2500} 反射率	R_{761}	R_{761} 反射率
WI	R_{900} / R_{970} 比值反射率	R_{1446}	R_{1446} 反射率
WI/NDVI	$(R_{900} / R_{970}) / [(R_{900} - R_{680}) / (R_{900} + R_{680})]$ 反射率	R_{1940}	R_{1940} 反射率
R_{1148} / R_{1088}	R_{1148} / R_{1088} 比值反射率	R_{2490}	R_{2490} 反射率

2 Gram - Schmidt 算法

2.1 Gram - Schmidt 正交变换

Gram—Schmidt 算法是应用于线性代数中的正交化无关向量组中和信号处理中的正交信号的空域谱估计。

Gram—Schmidt 正交变换算法总可以使任意一组线性无关向量成为正交向量集合。定理为:设自变量 X 和因变量 Y ,自变量 x_1, x_2, \dots, x_n ,经过 Gram—Schmidt 正交变换成为正交集:

$$X = ZR$$

式中: $\{Z = (z_1, z_2, \dots, z_s)\}$; $z_1 = x_1$; $z_2 = x_2 - \frac{x_2 \cdot z_1}{z_1 \cdot z_1} z_1$;

$z_3 = x_3 - \frac{x_3 \cdot z_1}{z_1 \cdot z_1} z_1 - \frac{x_3 \cdot z_2}{z_2 \cdot z_2} z_2$; \dots ; $z_s = x_s - \sum_{k=1}^{s-1} \frac{x_s \cdot z_k}{z_k \cdot z_k} z_k$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_2^1 & r_3^1 & \dots & \dots \\ 0 & 1 & r_3^2 & \dots & r_s^2 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & r_s^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_j^k = \frac{x_j \cdot z_k}{z_k \cdot z_k} \quad (j=2, 3, \dots, s; k=1, 2, \dots, s-1)$$

R 为可逆矩阵, 则 $Z = XR^{-1}$

假设 Y 与 Gram—Schmidt 变量 Z 有线性关系, 并且线性回归方程为:

$$Y = Z\beta \quad \text{则} \quad Y = XR^{-1}\beta$$

因此, 利用 Gram—Schmidt 正交变换算法对自变量进行正交变换, 解决了自变量信息冗余的问题。通过对 Z 的优选可以完成对自变量的筛选, 在解释因变量的同时最大限度解释了自变量。

2.2 Gram—Schmidt 回归方法

自变量与因变量之间存在非线性关系, 假设

$$y = a_0 \cdot x_1 a_1 \cdot x_2 a_2 \dots x_n a_n \quad \text{两边取对数得:}$$

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x_1 + a_2 \ln x_2 + \dots + a_n \ln x_n + \varepsilon$$

在对自变量进行 Gram—Schmidt 的正交化分析, 由此把非线性转化为线性问题。

具体估测算法为首先对自变量作中心化处理, 因变量与自变量进行一元线性回归, 通过 t 值检验自变量, 选 t 值检验值绝对值最大的自变量作为 Gram—Schmidt 变量 Z_1 。因变量与选中的 Gram—Schmidt 变量 Z_1 和剩余的自变量作二元线性回归, 直到 t 值都不通过检验, 再做 y 与 Gram—Schmidt 变量 Z 的多元回归。最后进行 Gram—Schmidt 反变换, 得到自变量与因变量的非线性模型。

多项式回归模型采用最小二乘法用适当项数的多项式逼近来解决非线性关系。当自变量之间有较强的相关关系时, 最小二乘法估计变量的回归系数时, 采用总体参数的最小方差无偏估计, 导致较大的

误差。主成分分析和偏最小二乘法是提取原始自变量集合大部分信息量的新变量, 由于新变量之间是互相正交的, 避免了最小二乘法遇到的总体参数问题。但是主成分分析缺乏对因变量的解释能力。偏最小二乘法在概括自变量系统的同时, 最好的解释了因变量, 却包含了所有自变量, 对自变量不能进行优选。而 Gram—Schmidt 正交变换算法, 把自变量变换成直角变量, 克服了自变量集合的多重相关关系的不良影响, 同时对自变量进行优选, 提取对因变量有显著解释作用的自变量。该方法应用于加工番茄病害水分含量估测, 可以反映水分含量微弱变化与高光谱反射率之间的非线性关系, 并对高光谱变量进行优选, 得到解释性较强的估测模型。

3 结果分析

3.1 加工番茄细菌性斑点病病叶相对含水量分析

3.1.1 加工番茄细菌性斑点病病叶 W_R 的光谱反射率分析
在图 1a 中, 序号中 0 级样本序号为 1~15, 1 级样本序号为 16~38, 2 阶样本序号为 39~69, 3 级样本序号为 70~93, 4 级样本序号为 94~107。病害严重程度随着序号增加而增加, 总体上病叶 W_R 随着病叶严重程度加重而减少。这主要是因为加工番茄发病以后, 大量叶片病菌孢子突破叶片表皮, 加速蒸腾速率, 导致水分的大量缺失。从图 1b 可以看出, 不同病叶 W_R 的变化微弱, 最大差值变化率为 1.3%, 但响应光谱差距相对来说比较大。在可见光波段随着病叶严重度的增加光谱反射率也增加。病叶 W_R 的光谱响应曲线图中, 病叶严重度的 5 个等级在可见光区分比较明显, 在近红外波段严重度最大等级表现最明显, 曲线位于上方。当病叶严重程度等级最大时病害面积大于 50%, 叶片呈现枯萎基本上没有水分, 导致病叶反射率增高。近红外波段是植被水分光谱反射率特征显著的区域, 因此 W_R 光谱反射率随着病叶严重程度增加而降低。图内近红外反射平台, 不同含水量病叶光谱反射率的差异性比较明显, 病叶光谱反射率是随着 W_R 的增加而降低。

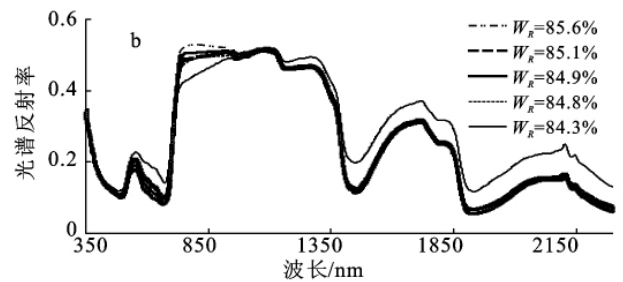
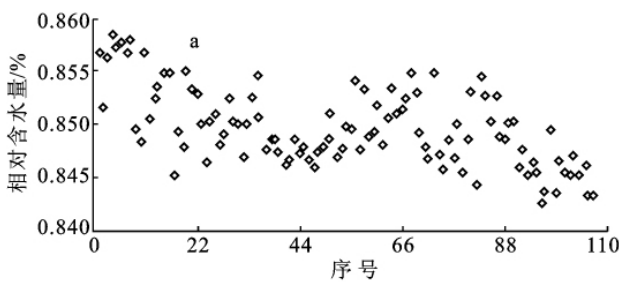


图 1 相对含水量随病叶严重程度变化和响应

在近红外(1 041 ~ 2 500 nm) 中最严重病叶光谱反射率高于其它。在 972 ,1 171 ,1 460 ,1 940 和 2 500 nm 周围出现了 W_R 共 5 个吸收带,因为植被光谱反射率的特征,在 970 ,1 200 ,1 450 ,1 930 和 2 500 nm 周围,是由水分引起 5 个吸收带。 W_R 的变化在光谱上表现明显,说明利用光谱对 W_R 进行估测具有可行性。

3.1.2 加工番茄细菌性斑点病病叶 W_R 与光谱反射率相关分析 从图 2 可以得出,在可见光波段,加工番茄叶片 W_R 与光谱反射率相关性在 350 ~ 360 nm 呈正相关,361 ~ 718 nm 呈负相关,在 718 ~ 760 nm 相关系数近似呈垂直上升趋势。在近红外 761 nm 达到相关性最大,761 ~ 2 500 nm 相关性依次递减。依据相关分析和 W_R 光谱曲线选取可见光 695 nm,近红外 761 nm 反射率作为新建病叶 W_R 光谱指数,根据植被光谱特征水分的 5 个吸收带,选取近红外波段 1 446 , 1 940 和 2 490 nm 反射率作为新建病叶 W_R 光谱指数。

3.1.3 加工番茄细菌性斑点病病叶 W_R 与光谱指数的分析 由表 2 可以看出,病叶 W_R 与光谱指数的一元回归分析,均通过了 0.01 极显著水平检验。其中与 NDWI ,NDVI_[800 670] , R_{970} ,WI , R_{1100}/R_{1200} , R_{1300}/R_{1450} ,

R_{1070}/R_{1200} , R_{761} 呈正相关。NDWI 线性回归的决定系数 R^2 最大。这与 Gao^[9] 的研究结果一样,NDWI 指数对 W_R 的回归效果理想。在 R_{970} 与 W_R 呈正相关,相关系数最小。病叶在 970 nm 反射率随病叶严重度等级加重波动比较大,而 W_R 随着病情的加重呈下降趋势,两者规律性比较弱。NDVI_[800 670] 检验 R^2 为 0.734 相对较高, R_{800} 和 R_{670} 位于红边范围内,“红边”对水分含量的区分能力比较强。WI , R_{1300}/R_{1450} 和 R_{2500} 回归的决定系数比较高,因为 WI , R_{1300}/R_{1450} 和 R_{2500} 位于水分的吸收带,光谱反射率变化规律比较强,都呈下降趋势。因此,优选 NDWI ,NDVI_[800 670] , R_{2500} ,WI , R_{1300}/R_{1450} , R_{695} , R_{761} , R_{1446} , R_{1940} 和 R_{2490} 作为加工番茄细菌性斑点病病叶敏感波段。

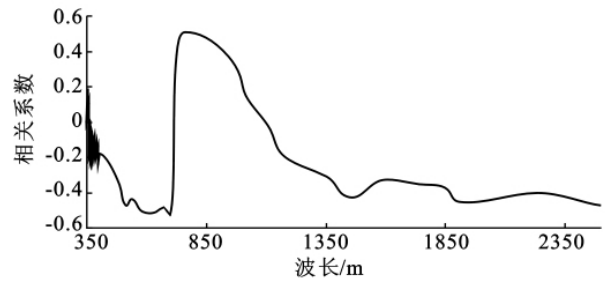


图 2 病叶 W_R 与光谱反射率的相关曲线

表 2 病害胁迫下加工番茄叶片 W_R 与光谱指数分析

光谱指数	相对含水量			光谱指数	相对含水量		
	R	R ²	F		R	R ²	F
NDWI	0.765**	0.719**	148.695	R_{1100}/R_{1200}	0.658**	0.609**	127.534
R_{1930}	-0.719**	0.669**	138.301	R_{1300}/R_{1450}	0.758**	0.712**	147.108
R_{1450}	-0.713**	0.664**	137.215	R_{1070}/R_{1200}	0.680**	0.631**	131.156
NDVI _[800 670]	0.734**	0.585**	141.468	R_{1300}/R_{1200}	-0.697**	0.647**	134.071
R_{970}	0.597**	0.558**	119.488	R_{695}	-0.661**	0.613**	128.070
R_{2500}	-0.731**	0.682**	140.938	R_{761}	0.762**	0.716**	148.035
WI	0.736**	0.688**	141.998	R_{1446}	-0.714**	0.664**	137.257
WI/NDVI	-0.684**	0.634**	131.780	R_{1940}	-0.719**	0.670**	138.411
R_{1148}/R_{1088}	-0.659**	0.611**	127.783	R_{2490}	-0.736**	0.687**	141.942

注: * 表示 0.05 显著水平, ** 表示 0.01 极显著水平。下同。

3.2 Gram - Schmidt 算法优选新建光谱参数

3.2.1 Gram—Schmidt 算法估测加工番茄细菌性斑点病病叶水分含量 如表 3 所示,利用 Gram—Schmidt 算法估测病叶水分含量 y , 设自变量 R_{695} , R_{761} , R_{1446} , R_{1940} , R_{2490} 分别为 x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 。对应变量和自变量取对数,分别为 $\ln y$, $\ln x_1$, $\ln x_2$, $\ln x_3$, $\ln x_4$, $\ln x_5$ 。再对自变量中心化 Z_1^1 , Z_1^2 , Z_1^3 , Z_1^4 , Z_1^5 。 $\ln y$ 与新建的 5 个自变量进行回归分析, t 值进行检验,选取 t 值绝对值最大的 Z_1^5 作为新的自变量 Z_1 。 Z_1 代替 Z_1^5 再进行回归分析,取 t 值绝对值最大的 Z_4^2 作为 Z_2 。 Z_2 代替 Z_4^2 进行回归分析,均没有通过 t 值检验,最终

作 y 与 Z_1 , Z_2 的回归方程:

$$y = -0.071 + 0.009Z_2 - 0.008Z_1$$

根据 Gram—Schmidt 正交变换的反变换,得到 $\ln y$ 与 x_4 , x_5 的回归模型为:

$$\ln y = 0.964 \times 0.009x_4 / 0.017x_5$$

最终得到 y 与光谱反射率的回归模型:

$$y = 0.964 \times R_{1940}^{0.009} / R_{2490}^{0.017}$$

Gram—Schmidt 算法解决光谱指数的多重相关性,从 5 个光谱指数中提取了对水分含量最佳解释能力的两个光谱指数,建立水分含量与光谱指数的非线性估测模型。

表 3 Gram - Schmidt 算法中自变量 t 值

变量	Z_1^1	Z_1^2	Z_1^3	Z_1^4	Z_1^5	
$t_{0.025}(107-1-1) = 1.983$	-0.504	6.885	-6.500	-6.789	-7.015	$Z_1 = z51$
变量	Z_1^2	Z_2^2	Z_3^2	Z_4^2	Z_1	
$t_{0.025}(107-2-1) = 1.983$	-0.816	1.417	0.206	0.885		$Z_2 = z42$
变量	Z_1^3	Z_2^3	Z_3^3	Z_1	Z_2	
$t_{0.025}(107-3-1) = 1.983$	-0.827	1.756	0.216			

3.2.2 加工番茄病叶水分含量估算模型及检验 利用线性回归方法和非线性回归对病叶水分含量(W_R)估测,如表 4 所示,所有模型 R^2 都通过极显著水平检验,相对误差不到 5%,RMSE 不到 0.2,说明模型都能很好地估算病叶的 W_R 。但 W_R 值的变化微弱,取值范

围相对比较小,很小的误差导致 W_R 值差别比较大。对 6 个模型的真实值与预测值的比较结果显示,非线性模型 R_{1940} 和 R_{2490} 真实值与预测值的拟合效果最好,其次为 NDWI, R_{1300}/R_{1450} 模型。因此,非线性模型 R_{1940} 和 R_{2490} 组合为最佳病叶 W_R 估测模型。

表 4 加工番茄病叶水分含量估算模型及检验

光谱指数	估算模型	R^2	相对误差%	标准误差
$R_{1940} R_{2490}$	$y = 0.964 \cdot R_{1940}^{0.009} / R_{2490}^{0.017}$	0.724 **	0.52	0.13
NDWI	$y = 0.848 + 0.067NDWI$	0.717 **	0.71	0.12
$NDVI_{[800,670]}$	$y = 0.833 + 0.026NDVI_{[800,670]}$	0.688 **	0.83	0.10
R_{2500}	$y = 0.855 - 0.071R_{2500}$	0.682 **	0.65	0.15
WI/NDVI	$y = 0.867 - 0.011WI/NDVI$	0.636 **	0.52	0.16
R_{1300}/R_{1450}	$y = 0.838 + 0.003R_{1300}/R_{1450}$	0.705 **	0.53	0.14

4 结论

(1) 加工番茄病叶水分含量随病情严重度的加重呈下降趋势。

(2) 加工番茄病叶不同等级水分含量的光谱反射率特征为:在近红外反射平台,随水分含量的降低反射率下降,在水分吸收带,病害等级 5 级水分含量的光谱反射率最高。

(3) Gram-Schmidt 算法对加工番茄水分含量估测 R_{1940} 和 R_{2490} 组合为最佳估测模型,其次是 NDWI 和 R_{1300}/R_{1450} 模型。研究结果可为加工番茄病害胁迫下品质的精确诊断提供技术支撑。

[参 考 文 献]

[1] 赵思峰. 加工番茄高产优质栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
 [2] 田庆久, 宫鹏, 赵春江, 等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. 科学通报, 2000, 45(24): 2645-2659.
 [3] 蒋金豹, 黄文江, 陈云浩. 用冠层光谱比值指数反演条锈病胁迫下的小麦含水量[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1939-1943.
 [4] 孙俊, 毛罕平, 羊一清, 等. 基于冠层光谱特性的水稻叶片含水率模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 133-136.
 [5] 吉海彦, 王鹏新, 严泰来. 冬小麦活体叶片叶绿素和水

分含量与反射光谱的模型建立[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 514-516.

[6] 田永超, 杨杰, 姚霞, 等. 利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1529-1537.
 [7] 冯先伟, 陈曦, 包安明, 等. 水分胁迫条件下棉花生理变化及其高光谱响应分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 250-255.
 [8] Colomb R, Meroni M, Marchesi, et al. Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1820-1834.
 [9] Gao B C. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257-266.
 [10] Thomas J R, Namken L N, Oerther G F, et al. Estimating leaf water content by reflectance measurement[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(6): 845-847.
 [11] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[R]. NASA, Greenbelt, MD, USA: NASA/GSFC Final Report, 1974.
 [12] Penuelas J, Filelall, Biel C, et al. The reflectance at the 950~970 nm region as an indicator of plant water status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(10): 1887-1889.

(下转第 153 页)

的减少,其中地表水和地下水减少的供水量较为明显。地表水源在2015年保证率为50%时减少的供水量最多,地下水源在2030年保证率为50%时减少的供水量最多。经过优化配置后减少的供水量有限,但提高了水资源的利用率。对于供需矛盾日益突出的西宁市来说,一定程度上缓解了该市的水资源压力。

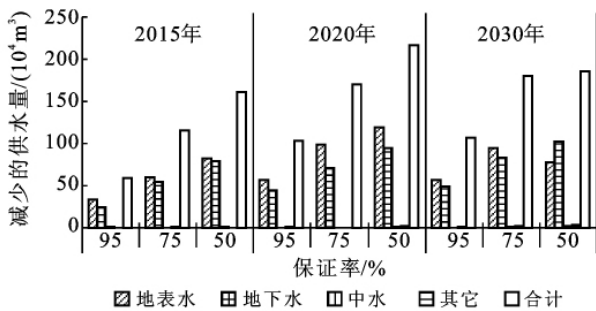


图1 西宁市水资源优化配置后减少的供水量

4 结论

(1) 经优化配置后的各水源供水量能够保证生活和生态用水,基本满足工业和农业用水,也使经济、社会与生态环境的综合效益达到最优,实现协调发展。与此同时各水源供水量均有所减少,促进了水资源的合理高效利用,为西宁市水资源可持续利用和管理提供指导依据。从而表明多目标遗传算法在水资源多目标优化配置中的应用效果较好,优化结果合理可靠。

(2) 西宁市水资源可供水量有限,水资源优化配置结果仅仅是在需水量上下限之间,并没有完全满足工业和农业用水,缺水量较大,供需矛盾突出。同时,

水污染形势严峻,生态环境不断遭到破坏。可以预见,在未来相当长一段时间内,水资源短缺、水污染仍将制约着西宁市经济社会的发展。

[参考文献]

- [1] 李力,沈冰.太原市水资源合理配置研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(2):199-204.
- [2] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光.基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J].水利学报,2006,37(3):308-313.
- [3] 李丽荣.求解 Pareto Front 多目标遗传算法的研究[D].湖南湘潭:湘潭大学,2003.
- [4] Fonseca C M, Fleming P J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization [J]. Evolutionary Computation, 1995, 3(1): 1-16.
- [5] 赵瑞.多目标遗传算法应用的研究[D].天津:天津大学,2005.
- [6] 何俊仕,栗晓玲.水资源规划与管理[M].北京:中国农业出版社,2006:203-204.
- [7] 黄强,杨建霞.水资源系统多维临界调控的理论和方法[M].北京:中国水利水电出版社,2007:107-133.
- [8] 张鑫,蔡焕杰.区域生态环境需水量与水资源合理配置[M].陕西杨凌:西北农林科技大学出版社,2008:65-85.
- [9] 栗晓玲,康绍忠,石培泽.干旱区面向生态的水资源合理配置模型与应用[J].水利学报,2008,39(9):1111-1117.
- [10] 高佳,赵本龙,索惠霞.馆陶县水资源优化配置研究[J].海河水利,2008,13(4):7-9.
- [11] 安鑫.西安市节水型社会建设的水资源优化配置及评价研究[D].陕西西安:长安大学,2009.
- [12] 中华人民共和国建设部.GB50318—2000 城市排水工程规划规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2000.

(上接第136页)

- [13] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(13): 2869-2872.
- [14] Schlerf M, Atzberger C, Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 177-194.
- [15] Seeking H D, Hoehn A, Stodieck L S, et al. The assessment of leaf water content using leaf reflectance ratios in the visible, near, and short-wave-infrared [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(13): 3701-3713.
- [16] Hill M J, Held A A, Leuning R, et al. MODIS spectral signals at a flux tower site: Relationships with high-resolution data, and CO₂ flux and light use efficiency measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(3): 349-351.
- [17] 王惠文,陈梅玲. Gram—Schmidt 回归及在刀具磨损预报中的应用[J].北京航空航天大学学报,2008,34(6): 729-733.
- [18] 王惠文,郭丽娟.基于 Gram—Schmidt 过程的多项式回归建模方法[J].北京航空航天大学学报,2008,34(11): 1349-1352.