植物营养与肥料学报 2000,6(1):18～23
Plant Nutrition and Fertilizer Science

土壤水氮资源的利用与管理①

Ⅲ.冬小麦-夏玉米水氮管理措施的优化

王凤仙　陈　研　李韵珠
(中国农业大学资源环境学院,北京 100094)

摘要:本文应用了非线性目标规划模型,用线性化逼近法求解,对冬小麦-夏玉米种植制度下,不同降雨年型的水氮管理措施进行了优化。以灌水和施氮总量为决策变量。以产量和土壤水和氮资源利用效率为优化目标,其中以经济产量为第一优先层,以土壤水、氮资源利用效率为第二优先层。根据作物-土壤联合模型模拟所得的目标函数,得到了不同降雨年型下小麦和夏玉米单季和中等降雨年型小麦-夏玉米周年的优化水氮管理措施方案。

关键词:冬小麦;夏玉米;小麦-玉米;优化;土壤水氮管理;非线性目标规划模型;线性化逼近法
中图分类号:S510.607;O221.2

现代农业生产的目标是多方面的,不仅要求具有很好的经济效益,同时也需要有一定的社会及生态效益。在生产过程中仅追求高的产量常导致土壤水氮资源的低效利用,并伴随环境污染问题;反之,若只重视土壤中水氮资源的高效利用又可能存在低产的现象。由此,按农业可持续发展的要求,应在达到一定目标产量的前提下,要求水氮资源利用效率尽可能提高,从而实现农业生产的高产高效。

对多效应指标的综合优化分析目前尚无统一规范[1],而一般水氮效应函数多为非线性函数,更增加了同时求解多目标的难度。因此,这方面的报道尚不多。本文以高产、高效为目标,根据作物经济产量和土壤水、氮资源利用效率与灌水量、施氮量的函数关系,选用非线性目标规划模型,用线性化逼近法优化冬小麦-夏玉米种植制度在不同降雨年型下的水、氮管理措施。

1　原理与方法

1.1　求解非线性目标规划模型的线性化逼近法

非线性目标规划模型(NGP)并不考虑对各目标进行极小化或极大化,而是希望在约束条件的限制下,每一目标都尽可能地接近事先给定的目标值。同时,决策者可把所考虑的目标按其重要性分成不同的优先层次,在达到第一优先层的基础上优化第二优先层,依此类推,实现满足上一级目标优化的前提下,各级目标尽可能达到预定值,其目标函数以及约束函数之一是非线性的。

线性化逼近法是求解非线性目标规划模型的有效方法。这是一种迭代算法,其求解思想是:首先选取一个可行解作为初始迭代解,并在每一轮迭代解的某邻域对非线性模型作线性近似,然后,用目标单纯形法求解;若所得结果有改进,则在新解处再作线性近似,再求解,否则,或缩小线性化邻域,或者停止计算输

① 国家自然科学基金"八五"重大项目:华北平原节水农业应用基础研究(49391600);国家攀登计划:农作物高产高效抗逆生理基础研究(9219)资助。
收稿日期:1998-08-18

出所得的解[2]。

1.2 优化目标和方案的确定

1.2.1　优化方案　应用《土壤水氮资源的利用与管理 Ⅱ．土壤水氮资源的利用．损失和周年利用效率模拟》一文[3]中所划分的典型降雨年型和部分模拟计算方案进行优化分析。有关的设计方案简述如下：

冬小麦：干旱、中等、湿润 3 种降雨年型；灌水处理为 5 个，即 40、140、240、340 和 440mm；施氮量也是 5 个处理，0、80、160、240、320kg/hm^2。

夏玉米：以前茬冬小麦为干旱年型、灌水量 240mm、施氮量 160kg/hm^2 为基础条件，夏玉米降雨年型分为干旱、中等及湿润 3 种；播前灌 40mm，无灌水处理；氮处理 5 个，数量与小麦同。

冬小麦-夏玉米周年：冬小麦、夏玉米均为中等降雨年型，两种作物的水氮处理同上，即周年灌水总量处理在 80 至 480mm 之间，施氮总量在 0 至 640kg/hm^2 之间。

1.2.2　优化目标　选择冬小麦、夏玉米产量(Y)、冬小麦-夏玉米周年相对产量 (RY_A)、1m 土体的土壤水资源利用效率(WUE)、土壤氮资源利用效率(NUE)、土壤水资源周年利用效率(WUE_A)、土壤氮资源周年利用效率(NUE_A)为优化目标。分两个优先层，产量(或周年相对产量)为第一优先层，土壤水、氮资源利用效率(或周年资源利用效率)为第二优先层。在此优化模型中的权重系数均为 1。

上述 RY_A、WUE、NUE、WUE_A、NUE_A 的具体含义与表达式见有关文献[3,4]。设北京地区冬小麦潜在产量为 7000kg/hm^2，夏玉米为 9750kg/hm^2。参考有关文献[5]及调查结果，确定优化目标的范围见表 1。表中 WUE、NUE、WUE_A、NUE_A 的目标值分别取大于目标产量下限的所有处理相应值的平均值，若所有处理产量均低于所规定的目标产量下限则取最高产量所对应的值为目标值。

表 1　不同种植状况及年型下的优化目标范围

Table 1　The range of values for the optimal objectives under various rainfall year types and cropping condition

种植状况 Cropping condition	RYT	优化目标范围 Range of optimal objectives					
		Y kg/hm^2	RY_A	WUE kg/m^3	NUE kg/kg	WUE_A 10^{-4}hm^2/m^3	NUE_A 10^{-4}hm^2/kg
WW	G	5000～6000	—	1.38	31.28	—	—
	Z	5000～6000	—	1.10	29.61	—	—
	S	5000～6000	—	1.23	28.50	—	—
SC	G	7000～8500	—	2.19	24.27	—	—
	Z	7000～8500	—	1.97	21.55	—	—
	S	7000～8500	—	1.72	12.96	—	—
冬小麦-夏玉米 WW-SC	中等＋中等 Z＋Z		0.7160～0.8644			0.86	14.31

注：RYT－降雨年型 rainfall year type；G－干旱年型 dry year；Z－中等年型 normal year；S－湿润年型 wet year；WW－冬小麦 winter wheat；SC－夏玉米 summer corn。

1.2.3　决策变量和目标函数的确定　以冬小麦、夏玉米生长过程中的灌水总量(I)，施氮总量(N)为决策变量，约束条件为：

冬小麦：灌水总量为 40～440mm；施氮总量为 0～320kg/hm^2

夏玉米：灌水总量为 40mm；施氮总量为 0～320kg/hm^2

冬小麦-夏玉米周年：灌水总量为 80～480mm；施氮总量为 0～640kg/hm^2

通过作物-土壤联合模型[3]计算上述设计方案，得到一定水、氮管理措施下的各项目标值，用回归分析的方法可得到各项目标函数的系数。各种条件下的目标函数表达式及 F 检验结果见表 2。

表2 不同条件下的目标函数

Table 2 the objective functions under various conditions

种植情况 Cropping condition	降雨年型 RYT	处理数 Treat. (n)	目标函数 Objective functions	F检验 F test
冬小麦 WW	干旱 G	25	$Y=6.248\times10^{2}+1.116\times10N+2.406\times10I+1.825\times10^{-2}NI-3.338\times10^{-2}N^{2}-4.163\times10^{-2}I^{2}$	**
			$WUE=3.808\times10^{-1}+2.890\times10^{-3}N+4.478\times10^{-3}I+4.087\times10^{-6}NI-8.348\times10^{-6}N^{2}-9.042\times10^{-6}I^{2}$	**
			$NUE=1.664\times10+2.475\times10^{-3}N+1.573\times10^{-1}I+6.107\times10^{-5}NI-8.506\times10^{-5}N^{2}-3.297\times10^{-4}I^{2}$	**
	中等 Z	25	$Y=1.236\times10^{2}+1.124\times10N+2.985\times10I+1.444\times10^{-2}NI-3.134\times10^{-2}N^{2}-5.11\times10^{-2}I^{2}$	**
			$WUE=1.697\times10^{-1}+2.545\times10^{-3}N+5.498\times10^{-3}I+2.487\times10^{-6}NI-6.718\times10^{-6}N^{2}-9.999\times10^{-6}I^{2}$	**
			$NUE=1.119\times10+1.041\times10^{-2}N+2.029\times10^{-1}I+2.487\times10^{-6}NI-8.451\times10^{-5}N^{2}-3.975\times10^{-4}I^{2}$	**
	湿润 S	25	$Y=2.626\times10^{3}+1.308\times10N+9.487I+1.278\times10^{-2}NI-3.253\times10^{-2}N^{2}-1.858\times10^{-2}I^{2}$	**
			$WUE=8.113\times10^{-1}+3.161\times10^{-3}N+3.982\times10^{-4}I+2.287\times10^{-6}NI-7.545\times10^{-6}N^{2}-1.600\times10^{-6}I^{2}$	**
			$NUE=3.261\times10+1.592\times10^{-2}N+1.664\times10^{-2}I+3.925\times10^{-5}NI-1.063\times10^{-4}N^{2}-1.031\times10^{-4}I^{2}$	**
夏玉米 SC	干旱 G	5	$Y=4.052\times10^{3}+2.516\times10N-4.427\times10^{-2}N^{2}$	**
			$WUE=1.212+7.441\times10^{-3}N-1.306\times10^{-5}N^{2}$	**
			$NUE=1.925\times10+5.225\times10^{-2}N-1.233\times10^{-4}N^{2}$	**
	中等 Z	5	$Y=4.792\times10^{3}+2.242\times10N-3.541\times10^{-2}N^{2}$	**
			$WUE=1.182+5.513\times10^{-3}N-8.594\times10^{-6}N^{2}$	**
			$NUE=1.721\times10+3.901\times10^{-2}N-8.069\times10^{-5}N^{2}$	**
	湿润 S	5	$Y=3.493\times10^{3}+1.348\times10N-1.576\times10^{-2}N^{2}$	**
			$WUE=9.689\times10^{-1}+3.779\times10^{-3}N-4.464\times10^{-6}N^{2}$	**
			$NUE=1.126\times10+1.530\times10^{-2}N-3.426\times10^{-5}N^{2}$	**
冬小麦 WW + 夏玉米 SC	中等 + 中等 Z+Z	125	$RY_{A}=2.272\times10^{-1}+7.099\times10^{-4}N+1.986\times10^{-3}I+7.494\times10^{-7}NI-6.717\times10^{-7}N^{2}-3.278\times10^{-6}I^{2}$	**
			$WUE_{A}=3.862\times10^{-5}+8.598\times10^{-8}N+1.422\times10^{-7}I+6.113\times10^{-11}NI-7.5\times10^{-11}N^{2}-2.666\times10^{-10}I^{2}$	**
			$NUE_{A}=8.265\times10^{-4}+4.476\times10^{-8}N+4.9\times10^{-6}I+1.724\times10^{-10}NI-4.915\times10^{-10}N^{2}-8.091\times10^{-9}I^{2}$	**

2 结果与分析

根据给定的优化目标范围、决策变量及其约束条件、相应的若干目标函数,用线性化逼近法求解,可得不同种植情况、降雨年型的合理灌水、施氮决策方案,优化结果见表 3。

表 3　不同种植条件及降雨年型下灌水量、施氮量的优化结果

Table 3　The results for the optimal amount of irrigation and N application under various rainfall year types and cropping condition

种植情况 Cropping condition	年型 Rainfall year type	灌水总量 Irrigation (mm)	施氮总量 N application (kg/hm^2)	第一优先层的最优最大相对偏差 Opti. and max. relative deviation for 1st opti. goal
冬小麦 WW	干旱 G	213.1～269.6	134.4～215.2	3%～3%
	中等 Z	160.5～245.3	163.0～195.2	3%～3%
	湿润 S	162.6～232.6	144.5～248.4	3%～5%
夏玉米 SC	干旱 G	—	164.7～288.6	3%～3%
	中等 Z	—	136.4～266.3	3%～3%
	湿润 S	—	320.0～320.0	10%～26%
冬小麦-夏玉米 WW-SC	中等+中等 Z+Z	228.1～326.4	304.2～514.5	3%～5%

注:上表中后三列的第一个值对应目标产量下限,第二个值对应目标产量上限。

2.1 冬小麦单季的优化土壤水氮管理措施

由表 3 可见,冬小麦首先欲达到 5000kg/hm^2 的目标产量下限及尽可能达到不同降雨年型下相应的 WUE、NUE,所需总灌水量在干旱年型下最高,为 213.1mm,中等及湿润年型相近,分别为干旱年型的 75.3%、76.3%;所需的施氮总量在中等年型下最高,为 163.0kg/hm^2,干旱年型下最低,为中等年型的 82.5%。欲达 6000kg/hm^2 的目标产量上限及相应的 WUE、NUE 所需总灌水量,干旱年型下最高为 269.6mm,中等及湿润年型下分别为干旱年型的 90.9%、86.3%;所需的施氮总量,湿润年型下最高,为 248.4kg/hm^2,干旱及中等年型次之,依次为湿润年型的 86.7%、78.6%。

从上述优化结果看,冬小麦所需灌水量的变化在不同年型间比较有规律,与实际生产情况吻合较好。而需氮量变化趋势却比较复杂,水、氮之间存在着明显的边界效应,例如,灌水量减少,需氮量有增加的趋势。另外,不同年型下降水对土体氮素的淋洗程度不同也是引起不同年型下氮素优化结果变化复杂的原因之一。

2.2 夏玉米单季的优化土壤水、氮管理措施

夏玉米没有灌水处理,仅对总的施氮量进行优化,总的施氮趋势是:湿润年型>干旱年型>中等年型,其原因主要由降雨对土体的淋洗程度及水、氮对产量的交互效应造成的。干旱年型降雨少,干旱对作物产量的影响程度较中等年型大,要取得同样的目标产量及相应的土壤水、氮资源利用效率,只有通过增加一定氮肥的投入来弥补。而湿润年型,降雨过多,造

成根层无机氮的大量淋失，易引起作物氮素亏缺，使产量降低，从而亦使水、氮的利用效率降低。欲达高产则需增大施氮量。

需特别说明的是，夏玉米在模拟计算湿润年型时，产量不能达到 7000kg/hm^2，因而，按 7000kg/hm^2～8500kg/hm^2 的目标产量来优化，第一优先层最优最大偏差高达 10%～26%，除降雨过多使 1m 土体无机氮大量淋失的原因外，阴天雨天多，光照不足，光合作用较弱，干物质积累少也是使该条件下的模拟产量不能达到一般目标产量的重要原因。

2.3 冬小麦-夏玉米周年的优化土壤水、氮管理措施

冬小麦-夏玉米轮作制度下，仅对两季均为中等降雨年型的总灌水量、施氮量做了优化处理。因夏玉米仅灌播前水 40 mm，无灌水处理，冬小麦的优化灌水量则为 188.1～286.4 mm，两茬作物为 228.1～326.4mm；施氮量的分配各季分别占全年总量的 50%，于是，冬小麦、夏玉米各季优化施氮量均为 152.1～257.3kg/hm^2，两茬作物为 304.2～514.5kg/hm^2。

用周年相对产量 RY_A 及相应的 WUE_A、NUE_A 为目标及上述所给定的全部的水、氮在各季的分配比例所得优化结果与上述单季独立优化的结果相比：冬小麦所需灌水量用周年的方法比仅用单季的上、下限都高，施氮量欲达产量下限用周年的方法低于单季，而欲达产量上限却比单季高 62.1kg/hm^2，相当于所需施氮量的 24.1%。夏玉米所需施氮量的变化趋势与冬小麦正相反，但相差的幅度均低于 10.3%。总的来看，中等年型下，麦季适当提高灌水量，夏玉米适当增加施氮量是综合统筹，使周年达到高产高效的手段之一。

3 小结

从优化的结果来看，把求解非线性多目标规划模型的线性化逼近法引入农业生产的水氮管理体系是可行的。它可综合考虑在产量、土壤水、氮资源利用效率较佳情况下的优化水、氮措施指标。此方法在该领域有着广阔的应用前景。上述结果仅代表给定的优化目标范围、优先层次、灌水、施氮时间、分配比例等条件下对水氮总量进行优化。若能根据土壤水、氮动态状况进行优化，可进一步提高水、氮资源利用效率。此外，不同领域的研究者可根据不同的研究目的改变优先层次进行优化。这方面的研究有待扩展。

参考文献

1 王兴仁，张福锁等．现代肥料实验设计．北京：中国农业出版，1996．

2 胡毓达．实用多目标最优化．北京：科学技术出版社，1990．

3 王凤仙，李韵珠．土壤水氮资源的利用和管理Ⅱ．土壤水氮资源的利用、损失和周年利用效率模拟．植物营养与肥料学报，1999，5(4)：297～306．

4 李韵珠，王凤仙．提高土壤水分/养分资源利用效率．中国农业大学学报，1997，No.2(增刊)：8～13．

5 石元春、辛德惠．黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理．石家庄：河北人民出版社，1983．

USE AND MANAGEMENT OF SOIL WATER AND NITROGEN RESOURCES

Ⅲ. The optimal management of soil water and nitrogen resources

Wang Fengxian Chen Yan Li Yunzhu

(*College of Resources and Environment, China Agri. Univ., Beijing* 100094)

Abstract: On the condition of winter wheat-summer corn cropping system in Beijing, the nonlinear goals programming model was used to optimize the water and nitrogen management under various rainfall year types. A linear approaching method was chosen to solve the above model. The total amounts of irrigation and nitrogen applied was employed as the programming variables. Grain yield was set as the first preferential goal, and the use efficiency of water and nitrogen resources within 1 m soil depth as the second preferential goal. The objective functions were obtained from the simulation results of grain yield and use efficiency of soil water and nitrogen resources under different conditions by applying the crop-soil combined model in this study. Finally, the optimal ranges of irrigation and nitrogen application rates were obtained for both single growth season of winter wheat or summer corn at different rainfall year types and annual of winter wheat-summer corn at normal rainfall year type.

Key words: winter wheat; summer corn; wheat-corn; optimization; management of soil water and nitrogen; nonlinear goals programming model; linear approaching method