

# 土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系

蔡守华<sup>1</sup>, 徐英<sup>1</sup>, 王俊生<sup>1</sup>, 张礼华<sup>1</sup>, 荆国芳<sup>2</sup>

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225009)

**摘要:** 精确农业使得农田土壤水分和养分的时空变异与产量关系的研究显得尤为重要, 这就要求在其研究方法上取得新的进展, 以加快精确农业的进程。该文运用传统统计理论和地质统计学理论结合分析了冬小麦苗期、灌浆期的土壤水分和养分变异与产量变异之间的关系。提出用“综合指示率”综合评价土壤的水分和养分状况, 并分析了综合指示率的变异与作物产量变异之间的关系。结果表明在 67.8 m 范围内综合指示率与产量之间存在很强的空间相关性, 综合指示率越大, 产量越高。Kriging 估计的空间分布图也表明综合指示率与产量有较好的对应关系, 综合指示率能解释产量变异的 58.4%, 比多元回归结果提高 17.4%。多元逐步回归分析和综合指示率与产量的两变量回归分析结果都表明, 同时考虑土壤水分和养分的变异能解释产量变异的 33.3%~58.4%, 比只考虑土壤养分变异时提高 0~5.2%, 同时考虑苗期和灌浆期土壤水分和养分变异能解释产量变异的 41.0%~58.4%, 比只考虑其中 1 个时期提高 4.3%~16.5%。综合指示率为表达农田土壤水分和养分时空变异性及其与作物产量的关系提供了一种思路和方法, 其分布图不仅是管理者综合评价土壤水分和养分状况的有利工具, 而且把它与产量分布图对比, 可以为精确农业的实施提供一定参考。

**关键词:** 土壤水分, 养分, 作物, 综合指示率, 时空变异性, 地质统计学

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.005

中图分类号: S153.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0026-06

蔡守华, 徐英, 王俊生, 等. 土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 26—31.

Cai Shouhua, Xu Ying, Wang Junsheng, et al. Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 26—31. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

20 世纪 90 年代以来, 精确农业已成为面向 21 世纪最富有吸引力的前沿性研究领域之一。精确农业强调通过对农田水土资源的分布式调控, 尽可能均衡、合理地利用其生产潜力, 获取尽可能高的经济产量或显著的社会效益。分布式调控是实现精确农业的关键所在, 要实现它有两步是很重要的: 一是土壤特性和作物信息(如产量)空间变异性的量化表达; 二是分析作物信息与土壤特性时空变异性之间的关系。关于这两方面都已有不少成果。如秦静等采用地统计学和 GIS 相结合的方法, 研究了 2 个阶段土壤有机质质量分数的时空变异特征, 结果表明土地利用类型及土地利用方式是土壤有机质质量分数时空变异的重要影响因素<sup>[1]</sup>; 徐海等研究了旱地小麦生育期间土壤剖面 0~100 cm 范围内土壤速效养分的动态变化特征, 表明各种养分具有明显不同的时间和空间变异特征<sup>[2]</sup>; Trangmar 等用地质统计学方法描述了新开垦的林地土壤养分与水稻产量的空间变异性, 指出作物的产量具有很强的空间相关性, 并用多元回归方法表达了土壤养分特性和作物产量之间的关系<sup>[3]</sup>; Stein 等<sup>[4]</sup>、

Walley 等<sup>[5]</sup>和 Sawchil 等<sup>[6]</sup>也先后分析了土壤物理组成(黏土、沙土含量等)和养分质量分数(有机质、电导率等)的空间变异特性及其与作物产量变异的关系; 杨玉玲等、高祥照等、杨志彬等分别研究了土壤有机质、全氮、速效养分等与作物产量的空间变异性及其关系<sup>[7-9]</sup>。总而言之, 研究土壤养分、作物产量的空间变异性或二者关系的成果较多, 涉及土壤水分与作物信息关系的成果较少<sup>[10]</sup>, 研究两个及两个以上生育阶段土壤水分和养分与产量的空间变异关系的报告尚未见报道。然而, Li 等<sup>[11]</sup>认为地势、土壤质地(影响土壤的持水性和排水性)是影响作物产量变异主要因素之一; Paz 等<sup>[12]</sup>和 Terra 等<sup>[13]</sup>的研究表明即使在 Alabama 沿海平原(年降雨量大约 1 350 mm)这样的湿润地区作物产量与土壤水分变异也有很大关系。再者, 现有的成果大多只考虑播前或作物苗期的土壤特性, 国内外研究表明, 播前或作物苗期土壤特性(即初始土壤肥力状态)的空间变异性依水文年和管理水平不同大约能解释作物产量变异性的 15%~54%<sup>[4,13-14]</sup>。而作物的产量(以冬小麦为例)是由穗粒数、穗数、千粒质量构成, 穗数、穗粒数、千粒质量的大小又分别受不同生育阶段土壤水分和养分状况影响, 亦即不同生育阶段的土壤水分和养分状况都会影响作物产量。如果同时考虑不同生育阶段的土壤水分及养分状况, 在相同的水文年和管理水平下有可能改善产量的估计精度。故此, 本文目的是提出用“综合指示率”综合评价湿润地区冬小麦不同生育阶段土壤的水分和养分状况; 分析综合指示率的变异与产量变异之间的关系。

收稿日期: 2008-05-27 修订日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609023); 扬州大学“新世纪人才工程”优秀青年骨干教师科研经费。

作者简介: 蔡守华(1964—), 男, 江苏如东人, 副教授, 工学博士, 主要从事灌溉排水理论与应用研究。扬州 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: caishouhua@yahoo.com.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于江苏省扬州市区北部, 该地区处于长江中下游段, 属亚热带湿润气候区。年太阳辐射量为 464~489 J/cm<sup>2</sup>, 年日照时数为 2 176.7 h, 年平均气温为 15℃, 无霜期达 222 d, 年平均降水量为 1 030 mm, 主要集中在 5—9 月份, 约占全年总雨量的 60%~66%。研究区土质为黏壤土, 保水保肥性能较好, 地形呈较缓的坡度 (小于 2°), 多年以来稻麦轮作。

### 1.2 试验方案及测定项目

当季种冬小麦, 品种为扬麦 12 号, 2006 年 10 月 23 日播种, 2007 年 6 月 1 日收获。基肥每公顷施复合肥 (N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O≥40% (15-15-10)) 300 kg, 2007 年 2 月 15 日追尿素 (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) 300 kg/hm<sup>2</sup>。冬小麦整个生育期内无灌水, 苗期采样 10 d 前有 1 次降雨 (雨量 79.5 mm), 但由于降雨历时较短, 且地面具有一定坡度, 排水条件好, 因此, 本次采样的土壤水分分布能较好代表这一阶段的土壤水分分布情况; 灌浆期无有效降雨, 土壤水分空间分布基本不受降雨影响。

试验区面积为 4 600 m<sup>2</sup> (115 m×40 m), 在其内按 5 m×5 m (指水平距离) 规则布置采样网格, 于冬小麦苗期及灌浆期在结点处采集耕层 (0~20 cm) 范围内的土样, 样品分析成果包括土壤含水率 (烘干法测质量含水率)、有机质质量分数 (重铬酸钾容量法-外加热法)、全氮质量分数 (硫酸催化剂消煮-靛酚蓝比色法)、碱解氮质量分数 (1.8 mol/L 氢氧化钠碱解扩散法测定)、速效磷质量分数 (0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼蓝比色法测定)、速效钾质量分数 (1 mol/L NH<sub>4</sub>OA<sub>c</sub> 浸提-火焰光度计法测定)。小麦收获时每一结点取 1 m×1 m 样方测产。

### 1.3 综合指示率原理

主成分分析或因因子分析、聚类分析、逐步回归分析等多元统计分析技术, 在研究土壤特性对作物产量变异影响中, 已经得到了广泛应用<sup>[4,6,11]</sup>。这些方法虽然在一定程度上表达了不同时期土壤水分和养分因子与作物产量的关系, 但存在两方面缺点: 1) 把土壤特性和作物产量信息作为独立随机变量考虑, 完全忽略了它们在空间上的变异性; 2) 回归模型不能表达土壤水分和养分综合状况与产量的关系, 且具体的表达式难于指导土壤分区管理或精确农业的实施。基于以上原因, 本文提出用“综合指示率”表示土壤水分和养分的综合状况, 然后分析综合指示率与作物产量间的关系。下面介绍综合指示率的原理和实现步骤:

1) 参考指示 Kriging 法思想, 将冬小麦苗期和灌浆期各土壤水分和养分指标 (苗期 6 个, 灌浆期 6 个, 所以可视为 12 个变量) 进行二态指示变换<sup>[15-16]</sup>。假设在时空域  $D$  上采样测定了某变量, 若该变量在时空域  $D$  上的阈值 (即临界值) 或边界值为  $z$ , 则在  $(x, t) \in D$  处可定义如下阶梯函数 (即指示函数)<sup>[16]</sup>

$$I(x, t, z) = \begin{cases} 1 & \text{预期结果出现} \\ 0 & \text{预期结果不出现} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x$ ——空间位置;  $t$ ——冬小麦生育阶段。预期结果出现指出现高产的情况, 反之则不出现高产, 如某时期某土壤养分或水分与产量呈正相关, 则其指示函数为

$$I(x, t, z) = \begin{cases} 1 & Z(x, t) \geq z \\ 0 & Z(x, t) < z \end{cases} \quad (2)$$

否则, 上式中不等号方向相反。指示变换的关键是为各变量独立地确定阈值, 组成阈值集合。为了分析土壤因子与产量的关系, 本文先根据土壤水分和养分因子与产量的逐步回归结果将各自变量分为重要 (即逐步回归模型中保留的变量) 和不重要变量 (即被剔除的变量), 然后将重要变量的中值或近似中值 (结合土壤养分分级标准<sup>[17]</sup>) 取为阈值, 不重要变量的阈值一般选取小于均值的数值 (表明试验田中大部分区域此土壤养分或水分不缺乏)。

2) 求该阈值集合下,  $(x, t) \in D$  处不同生育阶段各变量 (本例共 12 个) 的二态指示函数值之和, 该值就是不同生育阶段土壤水分和养分状况的综合指示值。

3) 用综合指示值除以变量个数 (本例为 12 个), 可得该阈值集合下出现预期结果的变量所占的比率, 称其为综合指示率。综合指示率的意义在于它不仅具有随机性特征, 而且具有结构性特征, 因而可以对其进行变异函数、普通 Kriging、Co-Kriging 等计算。因为它可以同时考虑作物若干个生育阶段土壤水分和养分的空间变异, 因而用普通 Kriging 插值得到的综合指示率分布图可近似表达作物生育期内或某一时期内土壤水分和养分综合分布状况, 且如果取不同的阈值, 可得到不同的分布图, 有利于管理者根据不同管理要求 (在时空域上) 综合评价农田土壤水分和养分状况。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦产量与土壤水分和养分特性的统计分析

表 1 是冬小麦产量及苗期和灌浆期土壤水分和养分的统计特征参数。苗期和灌浆期土壤含水率变异均不大, 属弱变异性 ( $C_v \leq 0.1$ )<sup>[18]</sup>, 且灌浆期变异大于苗期、均值大幅度低于苗期, 这是由于灌浆期降雨偏少、坡地上田块高低不同引起土壤水分重新分配, 变异加大。从土壤养分各指标平均值来看, 研究区土壤肥力中等<sup>[17]</sup>, 且苗期平均都高于灌浆期, 其中全氮、速效氮及有机质质量分数两个时期变异都是中等偏弱, 速效磷和速效钾属中等变异性 ( $C_v > 0.1$ )。冬小麦产量平均值 5 023.6 kg/hm<sup>2</sup>, 变异性中等偏弱。

表 1 冬小麦产量及土壤水分和养分特性统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of winter wheat yield and soil moisture and nutrients

变量	采样数 $n$	最小值	最大值	均值	标准差	变差系数
$Y$ /(kg·hm <sup>-2</sup> )	155	4 083.6	6 665.6	5 023.6	562.67	0.112
$MC_1$ /%	155	29.51	40.41	34.97	2.38	0.068
$TN_1$ /(g·kg <sup>-1</sup> )	155	1.03	1.75	1.38	0.16	0.114
$OM_1$ /(g·kg <sup>-1</sup> )	155	17.9	33.21	24.94	3.34	0.134
$AN_1$ /(mg·kg <sup>-1</sup> )	155	79.07	136.02	105.21	12.61	0.12
$AK_1$ /(mg·kg <sup>-1</sup> )	155	56.52	207.94	100.28	29.46	0.294

接上页

变量	采样数 $n$	最小值	最大值	均值	标准差	变差系数
$AP_1/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	155	10.13	62.99	24.22	11.48	0.474
$MC_2/\%$	155	17.02	30.48	24.01	2.163	0.09
$TN_2/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	155	0.99	1.81	1.42	0.17	0.119
$OM_2/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	155	17.6	33.25	25.16	3.13	0.124
$AN_2/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	155	82.64	143.81	111.34	12.1	0.109
$AK_2/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	155	55.08	219.12	91.77	26.03	0.284
$AP_2/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	155	8.84	58.62	23.93	10.57	0.442

注：下标 1 表示苗期土壤水分和养分特征；下标 2 表示灌浆期土壤水分和养分特征； $Y$ —产量； $MC$ —土壤含水率； $TN$ —全氮； $OM$ —有机质； $AN$ —碱解氮； $AK$ —速效钾； $AP$ —速效磷。下同。

## 2.2 土壤水分和养分与作物产量之间的逐步回归分析

为给综合指示率法阈值的选择提供一定依据，并与综合指示率分析结果进行对比，本文先用 SPSS14.0 将冬

小麦苗期、灌浆期土壤水分、养分特性与产量进行了逐步回归分析，表 2 提供了有关回归系数及决定系数（提取和剔除变量的显著水平都取 0.1）。决定系数  $R^2$  是回归平方和占总平方和的百分数，用来表示自变量与因变量的相关程度，如，因变量  $y$  与自变量  $x$  的回归决定系数  $R^2=0.6$ ，说明  $y$  的变异有 60% 是由  $x$  的变异引起的，或者说， $x$  的变异可解释  $y$  变异的 60%。表 2 表明：苗期土壤养分特性的变动能解释产量变异的 34.4%，苗期水分变异能解释产量变异的 28.0%，而同时考虑苗期水分和养分变异，可解释产量变异的 36.7%；灌浆期土壤养分特性变异能解释产量变异的 33.3%，该时期水分变异仅仅能解释产量变异的 2.8%，同时考虑水分和养分时，解释的产量变异比例与仅考虑养分时相同，说明这一时期的水分与产量的关系不密切；同时考虑两个时期土壤水分和养分特性时，可解释产量变异的 41.0%，比其他情况都有所提高。

表 2 冬小麦苗期、灌浆期土壤水分和养分特性与产量逐步回归的偏回归系数及决定系数

Table 2 Partial regression coefficients and coefficients of determination from stepwise regression relating yield and soil moisture and nutrients at the seedling stage and grain-filling stage of winter wheat

变量	苗 期			灌 浆 期			两个时期		
	养分	水分	水分和养分	养分	水分	水分和养分	养分	水分	水分和养分
$MC_1$	-	12.98	5.652	-	-	-	-	12.99	4.305
$TN_1$	EX	-	EX	-	-	-	66.202	-	EX
$OM_1$	6.85	-	3.912	-	-	-	5.366	-	5.206
$AN_1$	1.483	-	1.406	-	-	-	EX	-	EX
$AK_1$	-0.383	-	-0.352	-	-	-	EX	-	EX
$AP_1$	EX	-	EX	-	-	-	EX	-	EX
$MC_2$	-	-	-	-	4.46	EX	-	-	EX
$TN_2$	-	-	-	129.05	-	129.05	112.35	-	110.18
$OM_2$	-	-	-	6.12	-	6.12	EX	-	EX
$AN_2$	-	-	-	EX	-	EX	EX	-	EX
$AK_2$	-	-	-	-0.544	-	-0.544	-0.612	-	-0.497
$AP_2$	-	-	-	EX	-	EX	EX	-	EX
Const	213.32	47.58	93.99	214.31	394.60	214.31	172.97	47.59	110.59
$R^2$	0.344	0.28	0.367	0.333	0.028	0.333	0.399	0.28	0.410

注：EX 表示逐步回归分析中被拒绝的变量，Const 表示回归方程中的常数项； $R^2$  表示决定系数。

## 2.3 土壤水分和养分的综合指示率及其与产量的关系

根据土壤水分、养分与产量的逐步回归分析结果，确定苗期和灌浆期土壤水分和养分特性的阈值（见表 3）。在土壤水分、养分与产量逐步回归模型中出现的变量，即认为是对产量变异重要的变量，结合土壤养分分级标准<sup>[17]</sup>，将其均值或近似均值设为阈值，例如苗期有机质均值是 24.94 g/kg，而大于 25 g/kg 属中等偏上水平，小于 25 g/kg 属中等偏下水平，结合二者阈值取 25 g/kg。其他对产量变异不重要的变量参考土壤养分分级标准选取小于均值的数值为阈值，例如逐步回归表明速效磷对产量的作用较小，虽然苗期速效磷质量分数均值为 24.22 mg/kg，灌浆期为 23.93 mg/kg，但由于速效磷质量分数大于 10 mg/kg 属中等水平以上，因此速效磷阈值取为 10 mg/kg。另外，逐步回归分析结果反应两个时期的速效钾与产量都呈负相关（负相关不是说增施钾肥会降低产量，而是说明高产区速效钾消耗大，低产区消耗小，

甚至会积累），所以对速效钾，计算指示函数时不等号方向与式（2）相反，其他变量则与式（2）中不等号方向相同。

表 3 冬小麦苗期和灌浆期土壤水分和养分特性的阈值

Table 3 Threshold of soil moisture and nutrients at the seedling stage and grain-filling stage of winter wheat

变量	苗期	灌浆期
$MC/\%$	35	22
$TN/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.25	1.25
$OM/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	25	25
$AN/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	105	90
$AK/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	100	90
$AP/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	10	10

图 1 给出了冬小麦苗期和灌浆期土壤水分和养分状况整合后所得综合指示率的变异函数图及其理论模型参数，其中  $a$  为变程， $C_0$  为块金值， $C+C_0$  为基台值。图 1

表明结构变性能解释其总变异的 90.7%, 可见, 综合指示率具有很强的空间相关性。图 2 是用 Surfer8.0 绘制的综合指示率分布图, 它可近似表达冬小麦生育期内土壤水分和养分综合分布状况。

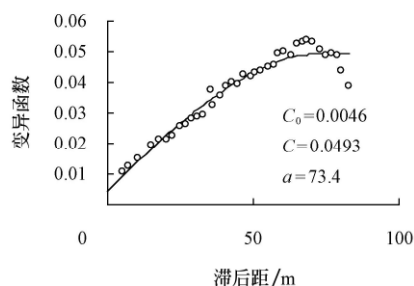


图 1 冬小麦苗期和灌浆期土壤水分和养分综合指示率变异函数

Fig.1 Semivariogram of integrated indicator rate of soil moisture and nutrients at the seedling stage and grain-filling stage of winter wheat

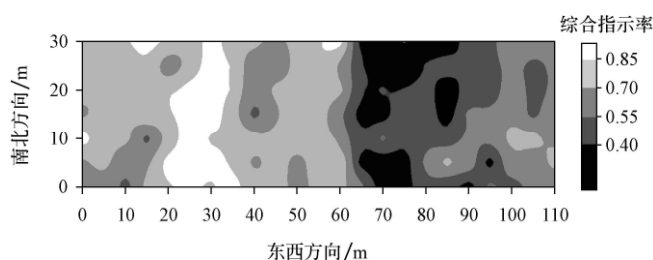


图 2 冬小麦苗期和灌浆期土壤水分和养分综合指示率分布  
Fig.2 Integrated indicator rate distribution of soil moisture and nutrients at the seedling stage and grain-filling stage of winter wheat

以上计算的综合指示率(变异函数图如图 1)与冬小麦产量显著相关( $r=0.76$ ), 为了进一步了解土壤综合肥力与作物产量之间的关系, 图 3 给出了以上综合指示率与产量的交叉变异函数图及其理论模型参数。图 3 表明综合指示率和产量之间存在很强的协变异特征( $C_0/(C+C_0) \approx 100\%$ ), 二者在空间上的协方差几乎都是由二者在空间上的协同相关性引起的, 且在 67.8 m 范围内综合指示率越大, 产量越高。

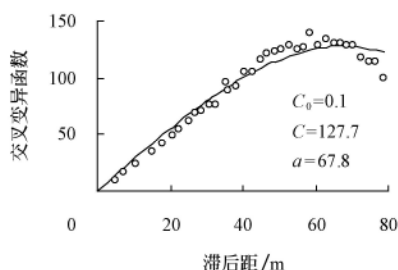


图 3 土壤水分和养分综合指示率与冬小麦产量交叉变异函数  
Fig.3 Cross-variogram of integrated indicator rate of soil moisture and nutrients and winter wheat yield

图 4 是以综合指示率为协同变量, 用 Co-Kriging 估计的产量分布图。与普通 Kring 估计结果相比, 该分布图的估计方差缩小 5.1%。将图 4 与图 2 比较, 可看出综合

指示率与产量分布图都有一定的对应关系, 即高产区的综合指示率较大, 低产区则偏小。实际上, 为了便于分析, 图 2 中已根据综合指示率将土壤水分和养分状况分为 5 个区, 第 1 区综合指示率为 0.15~0.40, 对应的图 4 中产量大部分处于最低水平, 第 2 区综合指示率为 0.40~0.55, 该区产量大部分较低, 第 3 区综合指示率为 0.55~0.70, 该区对应产量中等或偏低, 第 4 区综合指示率为 0.70~0.85, 产量大部分中等以上, 第 5 区综合指示率大于 0.85, 产量最高的区域分布在该区。这样的分布图对土壤管理有一定的指导作用。但应注意的是由于影响产量的因素除了土壤水分及本文测定的大量元素外, 还有微量元素、作物种植及管理等方面的因素, 两图不可能完全对应。对二者的回归决定系数表明, 同时考虑两个时期土壤水分和养分特性所得综合指示率能解释产量变异的 58.4%, 高出于相应的逐步回归分析结果(表 2) 17.4%。此外, 本文也分别计算了苗期和灌浆期土壤水分和养分的综合指示率与产量的回归决定系数, 结果表明苗期土壤水分和养分的综合指示率可解释冬小麦产量变异的 50.8%, 灌浆期可解释 41.9%, 分别比相应的逐步回归分析结果(表 2) 高 14.1% 和 8.6%。对两个时期的土壤养分综合指示率与产量关系进行分析, 得到苗期、灌浆期及同时考虑两个时期的土壤养分特性 3 种情况下, 综合指示率分别能解释产量变异的为 45.6%、39.82%、53.5%, 都小于同时考虑土壤水分时的相应值(分别小 5.2%、2.08% 和 4.9%), 这与逐步回归分析结果是一致的。但从其  $R^2$  值来看, 考虑土壤水分情况下  $R^2$  提高并不多, 说明该地区土壤水分对产量影响要显著小于养分。

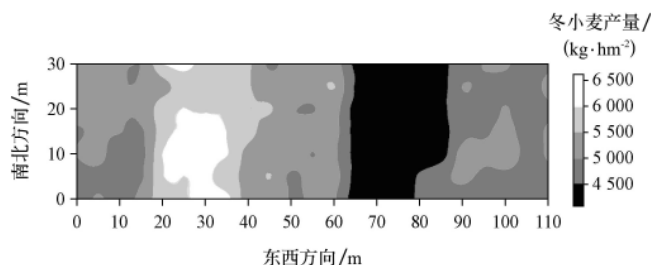


图 4 Co-Kriging 插值后的冬小麦产量分布  
Fig.4 Yield distribution of winter wheat after Co-Kriging interpolation

### 3 结论

研究区冬小麦苗期和灌浆期土壤含水率都属弱变异性, 有机质、全氮及速效养分质量分数均属中等变异性。

本文提出用综合指示率评价土壤水分和养分的综合分布状况; 冬小麦苗期、灌浆期水分和养分的综合指示率与产量的交叉变异函数表明二者有很强的空间相关关系; 综合指示率在表达土壤水分、养分变异与产量关系方面比多元逐步回归有大幅提高, 其分布图不仅能为管理者综合评价土壤水分和养分状况提供有利的工具, 而且把它与产量分布图对比, 可以为(特别是乡或县级区域)精确农业的实施提供一定参考。

综合指示率与产量的两变量回归分析及土壤水分和

养分与产量的逐步回归分析表明:同时考虑土壤水分和养分的变动能解释产量变异的 33.3%~58.4%,比只考虑土壤养分变异时提高 0~5.2%;同时考虑苗期和灌浆期土壤水分和养分特性空间变异性时,可解释冬小麦产量变异的 58.4%或 41.0%,既大于只考虑土壤养分变异(对产量影响)的情况(高出约 1.1%~4.9%),也大于只考虑其中某一时期的土壤水分与养分变异(对产量影响)的情况(高出约 4.3%~16.5%)。说明即使像本研究区这样的湿润地区冬小麦产量仍与土壤水分含量有关系,且呈一定正相关,要说明的是,本文对水分和养分交互作用考虑不够,水分和养分交互作用对产量影响可能比水分更大,这在今后研究中须进一步讨论。另外,研究结果也表明考虑冬小麦不同生育阶段土壤水分和养分变异将更有利于分析作物产量变异的形成原因。

### [参 考 文 献]

- [1] 秦静,孔祥斌,姜广辉,等.北京典型边缘区 25 年来土壤有机质的时空变异特征[J].农业工程学报,2008,24(3): 124—129.  
Qin Jing, Kong Xiangbin, Jiang Guanghui, et al. Characteristics of spatio-temporal changes of soil organic matter in typical fringe in Beijing for 25 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐海,王益权,刘军,等.关中旱地小麦生育期土壤速效养分时空变异特征研究[J].干旱地区农业研究,2009, 27(1): 62—67.  
Xu Hai, Wang Yiquan, Liu Jun, et al. The spatio-temporal variability of soil available nutrients in the Guanzhong plain [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 62—67. (in Chinese with English abstract)
- [3] Trangmar B B, Yost R S, Wade M K et al. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land[J]. Soil Sci Soc Am J, 1987, 51: 668—674.
- [4] Stein A, Brouwe J, Bouma J. Method for comparing spatial variability patterns of millet yield and soil data[J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61: 861—870.
- [5] Walley F, Yates T, van Groenigen J W, et al. Relationships between soil nitrogen availability indices, yield, and nitrogen accumulation of wheat[J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 1549—1561.
- [6] Sawchil J, Mallarino A P. Variability of soil properties, early phosphorus potassium uptake, and incidence of pests and weeds in relation to soybean grain yield[J]. Agron J, 2008, 100: 1450—1462.
- [7] 杨玉玲,盛建东,田长彦,等.盐化灌淤土壤速效氮、磷、钾空间变异性与棉花生长关系初步研究[J].中国农业科学, 2003, 36(5): 542—547.  
Yang Yuling, Sheng Jiandong, Tian Changyan, et al. A study on relationship between the spatial variability of saline anthropogenic alluvial soil available nitrogen, phosphorous, Potassium and cotton growth[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(5): 542—547. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高祥照,胡克林,郭焱,等.土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J].中国农业科学,2002,35(6): 660—666.  
Gao Xiangzhao, Hu Kelin, Guo Yan, et al. Spatial variability of soil nutrients and crop yield and Site-specific fertilizer management[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6): 660—666. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨志彬,陈兵林,周治国.花铃期棉田速效养分时空变异特征及对棉花产量品质的影响[J].作物学报,2008,34(8): 1393—1402.  
Yang Zhibin, Chen Binglin, Zhou Zhiguo. Spatial and temporal variability of available nutrient in cotton field at flower and boll stage and its effect on lint yield and fiber quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1393—1402. (in Chinese with English abstract)
- [10] Lamhamedi M S, Labbé L, Margolis H A, et al. Spatial Variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings[J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, 70: 108—126.
- [11] Li H R, Lascano J, Booker J, et al. Cotton lint yield variability in a heterogeneous soil at a landscape scale[J]. Soil Tillage Res, 2001, 58: 245—258.
- [12] Paz J O, Batchelor W D, Logsdon S D, et al. Analysis of water stress effects causing spatial variability in soybeans[J]. Trans ASAE, 1998, 41: 1527—1534.
- [13] Terra J A, Shaw J N, Reeves D W, et al. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity[J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, 70: 98—107.
- [14] Kravchenko A N, Bullock D G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties[J]. Agron J, 2000, 92: 75—83.
- [15] 徐英,陈亚新,王俊生,等.农田土壤水分和盐分空间分布的指示克立格分析评价[J].水科学进展,2006,17(4): 477—482.  
Xu Ying, Chen Yaxin, Wang Junsheng, et al. Using indicator kriging for analyzing and evaluating spatial distributions of soil water and salt in field[J]. Advance in Water Science, 2006, 17(4): 477—482. (in Chinese with English abstract)
- [16] 侯景儒.指示克立格的方法及原理[J].地质与勘探,1990, 26(3): 28—36.  
Hou Jingru. Theory and practice for indicator kriging[J]. Geology and Prospecting, 1990, 26(3): 28—36. (in Chinese with English abstract)
- [17] NY/T 309-1996, 全国耕地类型区、耕地地力等级划分[S].
- [18] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等.土壤特性空间变异性初步研究[J].水利学报,1985,(9): 10—19.  
Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xu Zhirong, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, (9): 10—19. (in Chinese with English abstract)

## Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield

Cai Shouhua<sup>1</sup>, Xu Ying<sup>1</sup>, Wang Junsheng<sup>1</sup>, Zhang Lihua<sup>1</sup>, Jing Guofang<sup>2</sup>

(1. College of Conservancy and Hydraulic Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** It is very important for the implementation of precision agriculture to study the relationship between crop yield and spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients, which requires improving the methods of studying such relationship to speed up the process of precision agriculture. The relationship between crop yield and spatial variability of soil moisture and nutrients at the seedling stage and grain-filling stage of winter wheat was analyzed with both geostatistics and traditional statistics, and a method to integratedly evaluate soil moisture and nutrient status through integrated indicator rate was proposed. The relationship between integrated indicator rate and crop yield showed integrated indicator rate was significantly correlated with crop yield in the range of 67.8 m, and the greater integrated indicator rate was, the greater yield was. Their kriging maps indicated the distribution of integrated indicator rate was similar to that of yield. Integrated indicator rate could explain 58.4% of yield variation which was 17.4% more than the result of multivariate step regression analysis. Both multivariate step regression analysis of soil moisture and nutrients and crop yield and simple regression analysis of integrated indicator rate and crop yield indicated that soil moisture and nutrients could explain 33.3%-58.4% of yield variation which was 0-5.2% more than only considering soil nutrients, and meanwhile soil moisture and nutrients of both seedling stage and grain-filling stage could explain 41%-58.4% of yield variation, 4.3%-16.5% more than considering soil moisture and nutrients of either seedling stage or grain-filling stage. Integrated indicator rate provides a method for describing spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and their relationships with crop yield. Its kriging map is a useful tool of integratedly evaluating soil moisture and nutrient status, and provides an available reference for implementation of precision agriculture by comparing with the kriging map of yield.

**Key words:** soil moisture, nutrients, crops, integrated indicator rate, spatio-temporal variability, geostatistics