

УДК 631.452.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ В МИКРОПОЛЕВОМ ОПЫТЕ

А. М. ЛЫКОВ, И. А. РУБАНОВ, Н. Н. КЛИМЕНКО
(Кафедра земледелия и методики опытного дела)

Плодородие — сложное свойство почвы, характеризующееся обменом веществ и энергии с культурными растениями. Урожайность последних поэтому может служить показателем эффективного плодородия.

В условиях интенсивного земледелия, когда общество имеет неограниченные возможности воздействовать на плодородие почвы, встает проблема целенаправленного создания различных искусственных моделей плодородия на огромных площадях [5]. Причем эти модели плодородия должны быть оптимальными для конкретных условий и сельскохозяйственных культур. Экспериментальное земледелие позволяет оценить агрономическую роль искусственно созданных моделей плодородия, обосновать оптимальный их уровень и раскрыть пути их воспроизводства на практике.

Особая роль в решении этой проблемы принадлежит статистическим моделям плодородия, в которых урожайность сельскохозяйственных культур представляется в качестве функции факторов плодородия. Например:

$$y = f(x_1, \dots, x_p, x_{p+1}, \dots, x_q, x_{q+1}, \dots, x_h, \dots), \quad (1)$$

где y — урожайность; x_1, \dots, x_p — система показателей, характеризующих почвенные условия; x_{p+1}, \dots, x_q — система показателей, характеризующих климатические условия; x_{q+1}, \dots, x_h — система показателей агротехнических мероприятий.

В работах [1—3] показано успешное применение модели (1) в практических исследованиях. Следует отметить один существенный недостаток этих статистических моделей. Производственные функции урожайности в них справедливы только для средних условий выращивания растений. Коэффициенты уравнений не имеют агрономического смысла, а сами уравнения трудны для интерпретации, так как в статистическую модель включается большое число факторов, которые часто имеют тесную корреляционную связь друг с другом. Поэтому многие исследователи пытаются уменьшить число факторов в статистических моделях, ввести в них некоторые обобщенные показатели. Как правило, такие показатели заменяют одну из систем показателей плодородия почвы в уравнении (1). Например, введение в уравнение (1) урожайности на контрольных делянках [4] или почвенных эквивалентов [6] позволяет заменить системы показателей почвенных условий и агротехнических мероприятий, а введение гидротермического коэффициента [2]

уменьшает число показателей климатических условий. Использование обобщенных показателей в модели (1) позволяет упростить решение целого ряда практических задач сельскохозяйственного производства [7].

В настоящей работе исследуется влияние различных факторов на урожайность сельскохозяйственных культур на основе моделирования уровней почвенного плодородия в микрополе в опыте, который проводился на опытном поле учхоза «Михайловское».

Схема опыта

Изучаются следующие факторы:

1 — содержание углерода в почве (%): C_0 (0,7); C_1 (1,4); C_2 (2,3); C_3 (4,0);

2 — нормы минеральных удобрений (кг д.в. на 1 га): F_0 (60N80P60K); F_1 (120N160P120K); F_2 (180N240P180K); F_3 (240N320P240K);

3 — мощность гумусового горизонта (см): K_0 (0—40); K_1 (0—20, 20—40 — подпочва);

4 — уплотнение почвы: L_0 (без уплотнения); L_1 (с уплотнением);

5 — культуры: V_1 (яровая пшеница); V_2 (ячмень); V_3 (овес); V_4 (горохо-овсяная смесь).

Таким образом, в опыте изучаются факторы V , C и F на четырех уровнях и факторы K и L на двух уровнях. Причем V следует отнести к качественному фактору, так как он не принимает количественных значений. Введение его в схему опыта возможно, если каждому значению фактора присвоить количественные веса.

Схема опыта представляет собой полуреплику из полной факторной схемы $4^3 \times 2^2$, которая содержит 128 вариантов. Схема опыта строилась следующим образом. Каждому четырехуровневому фактору было поставлено в соответствие два двухуровневых фактора по следующему правилу:

Четырехуровневый фактор	Двухуровневые факторы	
	A	B
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

Затем полуреплика от полной факториальной схемы $4^3 \times 2^2$ была преобразована в полуреплику 2^{8-1} . В этой схеме изучается 8 факторов, каждый на двух уровнях, т.е. факторы $A, B \rightarrow V^*$; $B, \Gamma \rightarrow C$; $D, E \rightarrow F$;

Определяющий контраст [8] данной схемы опыта имеет вид:

$$1 = AB\Gamma DEKL \quad (2)$$

для схемы 2^{8-1} и

$$1 = V^3 C^3 F^3 KL \quad (3)$$

для полуреплики от схемы $4^3 \times 2^2$.

Из соотношений (2) и (3) следует, что в схеме опыта главные эффекты факторов и их двухфакторные взаимодействия не смешаны друг с другом, т.е. схема опыта позволяет получить независимые оценки главных эффектов факторов и их парных взаимодействий. Схема опыта блоками представлена в таблице.

Схема разбивается на 4 подсхемы для каждой из изучаемых культур отдельно. Эти подсхемы представляют собой полуреплику от полной схемы $4^2 \times 2^2$, в которой изучается влияние двух четырехуровневых факторов (содержание углерода в почве и норм минеральных удобрений) и двух двухуровневых факторов (мощности гумусового горизонта

* $A, B \rightarrow V$, т.е. факторы A и B соответствуют фактору V (или заменяют его).

Схема опыта 1/2 ($4^3 \times 2^2$)

№	V	C	F	K	L	№	V	C	F	K	L	№	V	C	F	K	L
Блок 1					Блок 2					Блок 3							
1	0	0	3	1	1	1	0	0	3	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	2	1	0	0	2	0	2	1	1	1	2	0	2	2	0	0
3	0	1	2	0	0	3	0	1	2	1	1	3	0	1	1	0	0
4	0	3	0	1	1	4	0	3	0	0	0	4	0	3	3	1	1
5	2	0	2	0	0	5	2	0	2	1	1	5	2	0	1	0	0
6	2	2	0	1	1	6	2	2	0	0	0	6	2	2	3	1	1
7	2	1	3	1	1	7	2	1	3	0	0	7	2	1	0	1	1
8	2	3	1	0	0	8	2	3	1	1	1	8	2	3	2	0	0
9	1	0	2	1	1	9	1	0	2	0	0	9	1	0	1	1	1
10	1	2	0	0	0	10	1	2	0	1	1	10	1	2	3	0	0
11	1	1	3	0	0	11	1	1	3	1	1	11	1	1	0	0	0
12	1	3	1	1	1	12	1	3	1	0	0	12	1	3	2	1	1
13	3	0	3	0	0	13	3	0	3	1	1	13	3	0	0	0	0
14	3	2	1	1	1	14	3	2	1	0	0	14	3	2	2	1	1
15	3	1	2	1	1	15	3	1	2	0	0	15	3	1	1	1	1
16	3	3	0	0	0	16	3	3	0	1	1	16	3	3	3	0	0
Блок 4					Блок 5					Блок 6							
1	0	0	2	0	1	1	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	2	0	1	0	2	0	2	0	0	1	2	0	2	2	1	1
3	0	1	3	1	0	3	0	1	3	0	1	3	0	1	1	1	1
4	0	3	1	0	1	4	0	3	1	1	0	4	0	3	3	0	0
5	2	0	3	1	0	5	2	0	3	0	1	5	2	0	1	1	1
6	2	2	1	0	1	6	2	2	1	1	0	6	2	2	3	0	0
7	2	1	2	0	1	7	2	3	0	0	1	7	2	1	0	0	0
8	2	3	0	1	0	8	2	1	2	1	0	8	2	3	2	1	1
9	1	0	3	0	1	9	1	0	3	1	0	9	1	0	1	0	0
10	1	2	1	1	0	10	1	2	1	0	1	10	1	2	3	1	1
11	1	1	2	1	0	11	1	1	2	0	1	11	1	1	0	1	1
12	1	3	0	0	1	12	1	3	0	1	0	12	1	3	2	0	0
13	3	0	2	1	0	13	3	0	2	0	1	13	3	0	0	1	1
14	3	2	0	0	1	14	3	2	0	1	0	14	3	2	2	0	0
15	3	1	3	0	1	15	3	1	3	1	0	15	3	1	1	0	0
16	3	3	1	1	0	16	3	3	1	0	1	16	3	3	3	1	1
Блок 7					Блок 8												
1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0						
2	0	2	3	1	0	2	0	2	3	0	1						
3	0	1	0	1	0	3	0	3	2	1	0						
4	0	3	2	0	1	4	0	1	0	0	1						
5	2	0	0	1	0	5	2	0	0	0	1						
6	2	2	2	0	1	6	2	2	2	1	0						
7	2	1	1	0	1	7	2	1	1	1	0						
8	2	3	3	1	0	8	2	3	3	0	1						
9	1	0	0	0	1	9	1	0	0	1	0						
10	1	2	2	1	0	10	1	2	2	0	1						
11	1	1	1	1	0	11	1	1	1	0	1						
12	1	3	3	0	1	12	1	3	3	1	0						
13	3	0	1	1	0	13	3	0	1	0	1						
14	3	2	3	0	1	14	3	2	3	1	0						
15	3	1	0	0	1	15	3	1	0	1	0						
16	3	3	2	1	0	16	3	3	2	0	1						

и уплотнения) на урожайность сельскохозяйственных культур. Определяющий контраст для полурепублики от полной факториальной схемы $4^2 \times 2^2$ имеет вид:

$$I = C^3 F^3 K L \quad (4)$$

При этом главные эффекты факторов не смешаны друг с другом, а основные двухфакторные взаимодействия смешаны следующим образом:

$$C_L F_L \rightarrow C_L F_L + K L, \quad (5)$$

т. е. эффект взаимодействия линейных компонент факторов C и F [9] смешан с эффектом взаимодействия факторов K и L :

$$\begin{aligned} C_L K &\rightarrow C_L K + F_C L, \\ C_L L &\rightarrow C_L L + F_C K, \\ F_L K &\rightarrow F_L K + C_C L, \\ F_L L &\rightarrow F_L L + C_C K, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_L, F_L — линейные компоненты соответствующих эффектов факторов; C_C, F_C — кубические компоненты.

В подавляющем большинстве случаев значения эффектов взаимодействий $F_C L, F_C K, C_C L, C_C K$ практически равны нулю, ими можно пренебречь. Следовательно, схема опыта с определяющим контрастом (4) позволяет получить надежные оценки эффектов изучаемых факторов и их главных взаимодействий.

Статистический анализ

На первом этапе исследования основное внимание обращалось на зависимость содержания подвижных форм элементов питания в почве и урожайности культур от изучаемых в опыте факторов. В основу анализа было положено построение соответствующих статистических моделей по экспериментальным данным. Вид статистических моделей определялся характером зависимости содержания подвижных форм элементов питания в почве и урожайности от изучаемых факторов. Советскими и зарубежными исследователями установлено, что зависимость урожайности культур y от норм удобрений x выражается уравнением

$$y = a_0 + a_1 x^{0.5} - a_2 x, \quad (6)$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты регрессии.

Аналогичный вид уравнения был выбран для выражения зависимости урожайности от содержания гумуса в почве. С учетом того, что некоторые факторы изучались на двух уровнях, обобщенные статистические модели записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} z = & b_0 + b_1 V + b_2 C^{0.5} + b_3 C + b_4 F^{0.5} + b_5 F + b_6 K + b_7 L + b_8 (CF)^{0.5} + \\ & + b_9 C^{0.5} L + b_{10} C^{0.5} K + b_{11} F^{0.5} L + b_{12} F^{0.5} K + b_{13} KL + b_{14} \Pi, \end{aligned} \quad (7)$$

где z — содержание азота, фосфора или калия в почве, b_0, b_1, \dots, b_{14} — коэффициенты, n — повторение (0 для 1-го повторения и 1 — для 2-го);

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1 C^{0.5} + b_2 C + b_3 F^{0.5} + b_4 F + b_5 K + b_6 L + b_7 (CF)^{0.5} + \\ & + b_8 C^{0.5} K + b_9 C^{0.5} L + b_{10} F^{0.5} K + b_{11} F^{0.5} L + b_{12} KL + b_{13} \Pi, \end{aligned} \quad (8)$$

где y — урожайность сельскохозяйственной культуры.

Фактор Π вводится в модель с целью исключения влияния повторений на результаты опыта. Для анализа данных используются уравнения с наибольшим значением множественного коэффициента корреляции R .

Результаты и обсуждение

В настоящем сообщении основное внимание уделено схеме опыта и ее статистическому анализу, поэтому приведены некоторые общие результаты без их детального анализа.

Содержание подвижных форм элементов питания в почве определялось три раза за вегетацию — в фазы кущения, колошения и сразу после уборки. По полученным результатам были построены статистические модели вида (7). Ниже приведены статистические модели для NO_3 и P_2O_5 (модель для K_2O аналогична модели для P_2O_5).

Производственные функции содержания NO_3 и P_2O_5 по фазам ку-
щения, колошения и после уборки соответственно следующие:

Для NO_3 :

$$\begin{aligned} z &= 50,2 + 25,9(CF)^{0,5} - 84,4F^{0,5} + 77,2F, R=0,69; \\ z &= 7,2 + 8,0C^{0,5}K + 3,2F + 4,0F^{0,5}L - 10,5K, R=0,46; \\ z &= (2,0 + 0,5V) + 1,5C^{0,5} + 0,5F, R=0,37. \end{aligned} \quad (9)$$

Для P_2O_5 :

$$\begin{aligned} z &= -1301,4 + 2187,9C^{0,5} - 675,6C + 119,2F, R=0,61; \\ z &= -134,2 + 279,8C^{0,5} + 104,9F, R=0,66; \\ z &= -1128,5 + 1757,2C^{0,5} - 531,0C + 118,3F + \\ &+ 260,1K - 172,2C^{0,5}K, R=0,72. \end{aligned} \quad (10)$$

Из производственных функций (9) и (10) следует, что содержание подвижных элементов питания в почве в значительной степени определяется как нормой полного минерального питания F , так и содержанием углерода в почве C , причем эта зависимость для NO_3 резко ослабевает по мере прохождения вегетационного периода, а для P_2O_5 и K_2O возрастает. Однако в общем необходимо отметить, что изменение содержания форм элементов питания в почве обусловлено не только изменением изучаемых факторов, на что указывает невысокий коэффициент множественной корреляции, но и другими факторами, которые не учтены схемой опыта, такими, например, как погодные условия, микробиологическая активность почвы и т. д.

Зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от изучаемых факторов определялась по модели (8). Анализировали урожайность зерна (y), соломы, зерна вместе с соломой и отношение зерна к соломе (f). Ниже приведены некоторые производственные функции для ячменя.

$$\begin{aligned} y &= -15,0 + 37,8C^{0,5} - 6,8C - 5,2F^{0,5} + \\ &+ 6,9(CF)^{0,5} - 1,1C^{0,5}K + 1,8KL, R=0,99; \end{aligned} \quad (11)$$

$$f = -0,1 + 1,24C^{0,5} - 0,3C - 2,5C^{0,5}L, R=0,97. \quad (12)$$

Из уравнений (11), (12) следует, что на урожайность ячменя наиболее сильное действие в данных условиях оказало содержание углерода в почве во взаимодействии с нормой минерального питания. Уравнение (12) имеет более простой вид, чем (11). Причем изменения урожайности ячменя или отношения зерна к соломе на 94—98% определяются изменениями изучаемых факторов, включенных в уравнения.

Таким образом, результаты нашей работы показывают, что основные факторы плодородия почвы могут быть смоделированы в микрополевоом опыте. Это позволяет оценить их влияние на урожайность сельскохозяйственных культур.

В статье приведен метод построения схемы опыта и дан ее статистический анализ. При этом схему опыта следует рассматривать как составную, потому что она является исходной для изучения влияния факторов на почвенные свойства и в то же время ее результаты используются для изучения зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от изучаемых факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барбалис П. Д. Действие агрохимических свойств почв, минеральных удобрений и осадков на урожай ячменя. — Вестн. с.-х. науки, 1971, № 1, с. 37—44.
2. Бейнаре А. Я. Влияние удобрений, свойств почвы и метеорологических условий на урожай сахарной свеклы. — Химия в сельск. хоз-ве, 1973, № 4, с. 66—72.
3. Державин Л. М., Рубанов И. А., Михайлов Н. Н., Перевозчиков С. Б. Влияние свойств почвы и удобрений на урожай соломки и семян льна-долгунца в Костромской области. — Химия в сельск. хоз-ве, 1975, № 11, с. 8—12.
4. Державин Л. М., Попова Р. Н., Жукова Л. Ф., Плющева В. Д. Зависимость урожая сахарной свеклы от доз минеральных удобрений на различных почвах СССР. — Агрохимия, 1975, № 1, с. 76—83.
5. Кулаковская Т. Н. Почвен-

но-агрохимические основы получения высоких урожаев. Минск: Ураджай, 1978. — 6. Рубанов И. А. Прогноз эффективности минеральных удобрений путем оценки земли с помощью почвенного эквивалента. — Химия в сельск. хоз-ве, 1977, № 7, с. 74—78. — 7. Рубанов И. А. Корректировка производственной функции урожаем — удобрение и почвенный эквивалент. — Агрохимия, 1978, № 5, с. 117—

121. — 8. Рубанов И. А., Михайлов Н. Н., Тимохина Л. А. Метод указания по применению математ. методов планирования эксперимента в сельск. хоз-ве. М.: Колос, 1973. — 9. Рубанов И. А. Статистический анализ факторных опытов $2_n, 3_m, 2_n \times 3_m$. — Химия в сельск. хоз-ве, 1976, № 3, с. 71—76.

Статья поступила 1 февраля 1983 г.

SUMMARY

The work shows the possibility of fertility factors modelling in a microfield experiment. Specially elaborated experiment scheme allows to evaluate the influence of crops, soil humus content, mineral fertilization rates e. g. on NO_3 , P_2O_5 and K_2O content. At the same time the scheme permits to study the influence of soil humus content, mineral nutrition rates, furrow slice heaviness and firmness on crops yielding capacity. Method of experiment scheme construction and its statistical analysis are given.