

МЕТОД ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК УРОЖАЙНОСТИ

П.А. Шарый, к.б.н., Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
О.В. Рухович, к.б.н., Всероссийский НИИ агрохимии РАСХН, Л.С. Шарая, к.б.н., Институт экологии
Волжского бассейна РАН

Представлен новый метод расчета стабильных сочетаний характеристик урожайности культур. Для озимой пшеницы на западе бассейна р. Оки и овса в Тверской области показано, что усредненные по годам урожаи на контроле (без внесения удобрений) и максимальный урожай (при оптимальном внесении удобрений) образуют стабильные сочетания с наименьшей пространственной изменчивостью. Оценены эффекты оптимального внесения удобрений при низких и высоких значениях контроля.

Ключевые слова: озимая пшеница, овес, урожай, стабильные сочетания.

В.В. Докучаев [1] отмечал, что «...высшую цель истинной науки составляет... постижение неизменяющегося среди переменного и вечного – между временным, соединенное с предсказанием долженствующего быть...», т.е., выражаясь современным языком, поиск инвариантов или стабильных сочетаний в пространстве и/или во времени. Такие инварианты в пространстве имеют в общем случае вид некоторой функции $g(X, Y, Z, \dots)$ от характеристик урожайности X, Y, Z, \dots , не меняющейся или наименьшим образом меняющейся в пространстве. В простейшем случае эта функция может иметь вид $X+aY$, где a – некоторое число.

Пусть, например, для региона известны данные урожаев некоторой культуры, полученных как без применения удобрений, так и при внесении оптимальных доз удобрений. Используя новый статистический метод наименьшей вариативности [2,3], можно рассчитать стабильное сочетание этих двух показателей урожайности для конкретного региона. Полученное стабильное сочетание, помимо знания о стабильном соотношении характеристик урожайности в изучаемом регионе, предоставляет новые возможности для оценки как эффектов внесения удобрений при экстремальных значениях урожая по региону, так и экономического эффекта от внесения удобрений.

Опишем этот метод и рассмотрим примеры его использования.

Известный коэффициент вариативности (или вариации) данной неотрицательной характеристики агроландшафта определен как

$$Kvar = 100 \cdot SD/CP, \quad (1)$$

где SD – стандартное отклонение, а CP – среднее значение этой характеристики. $Kvar$ описывает природную изменчивость характеристики агроландшафта, он был введен К. Пирсоном (К. Pearson) в 1895 г.

Характеристики X и Y по отношению друг к другу могут быть или антагонистами (при отрицательном коэффициенте корреляции Пирсона r между ними), или спутниками (при $r > 0$). Для антагонистов, например, в виде максимальной прибавки Π к урожаю озимой пшеницы, полученной от оптимального внесения удобрений и одной из характеристик расчлененности (изрезанности) рельефа местности kve , их сумма $\Pi + kve$ будет, из-за отрицательной связи между ними, меньше варьировать в пространстве, чем Π и kve порознь. Так, для западной части бассейна р. Оки $Kvar(\Pi) = 51,7\%$, $Kvar(kve) = 54,4\%$, а для сочетания $Kvar(\Pi + kve) = 43,9\%$. Ясно, что для сочетания антагонистов более общего вида

$$X+aY \quad (2)$$

при некотором положительном параметре a , $Kvar$ будет еще меньше. Более того, при некотором положительном a существует и единственно сочетание-инвариант вида (2),

наименее варьирующее в пространстве, т.е. с наименьшим $Kvar(X+aY)$ [2]. Поскольку сочетание $X+aY$ при этом обычно не оказывается строго постоянным в пространстве, т.е. $Kvar(X+aY) > 0$, то такое сочетание представляет собой не-идеальный инвариант, или квазиинвариант.

Пара спутников X и Y формально оказывается «антагонистами» при замене Y на $2Y_{CP}-Y$, где Y_{CP} – среднее значение Y по точкам наблюдения, поскольку при такой замене корреляция между X и $2Y_{CP}-Y$ отрицательна. Показано [2], что для спутников квазиинвариант имеет вид

$$X+a \cdot (2Y_{CP}-Y) \quad (3)$$

при некотором положительном параметре a .

Установлено [2], что доставляющее минимум $Kvar$ число a есть

$$a = \frac{\bar{Y} + A|r|\bar{X}}{A(\bar{A}\bar{X} + |r|\bar{Y})}, \quad \text{где } A = \frac{SD_Y}{SD_X} \text{ и } a > 0. \quad (4)$$

Здесь средние для X и Y обозначены как \bar{X} и \bar{Y} , стандартные отклонения для X и Y – как SD_X и SD_Y , r – коэффициент корреляции между X и Y . Эта формула применима как к антагонистам, так и к спутникам при $|r| < 1$ и положительных \bar{X} , \bar{Y} , SD_X и SD_Y .

Минимизированный по a коэффициент вариативности $Kvar(X, Y)$ сочетания рассчитывают по формуле

$$Kvar(X, Y) = \frac{100 \cdot SD_X \sqrt{1 - 2aA|r| + a^2 A^2}}{\bar{X} + a\bar{Y}}, \quad (5)$$

где значение a следует брать из (4). Эта формула также применима как к антагонистам, так и к спутникам.

Отличие квазиинварианта от идеального инварианта можно охарактеризовать коэффициентом эффективности $Keff$, который есть отношение наименьшего из $Kvar(X)$ и $Kvar(Y)$ к минимизированному $Kvar(X, Y)$ их сочетания

$$Keff = \frac{\min\{Kvar(X), Kvar(Y)\}}{Kvar(X, Y)}. \quad (6)$$

Установлено [2], что $Keff$ всегда > 1 . Для идеального инварианта $Kvar(X, Y) = 0$, а $Keff$ обращается в бесконечность. По существу, $Keff$ оценивает стабильность сочетания пары характеристик урожайности вида (2) или (3).

Имеет смысл ограничивать рассматриваемые парные сочетания значимыми, для которых $Keff$ больше или близок к $\sqrt{2} \approx 1,414$ (наибольшему возможному $Keff$ для некоррелированных X и Y) [2].

Теперь рассмотрим применение этого метода. Пусть требуется найти стабильное сочетание усредненных по времени характеристик урожайности озимой пшеницы на 41 опытном участке западной части бассейна р. Оки, информация о которых взята из геосети «Агрогеос» [4]: полученных без применения удобрений (контроль K), в этом случае $Kvar = 55,9\%$, и при оптимальном внесении удобрений (максимальное по опыту при оптимальном внесении удобрений Ox ; далее для краткости «опыт») с $Kvar = 51,7\%$. Используя формулы (3-5), находим стабильное сочетание этих характеристик урожайности

$$\text{Квазиинвариант} = K + 1,160 \cdot (2Ox_{CP} - Ox), \quad (7)$$

для которого $a = 1,160$ ($r = 0,886$), $Kvar = 11,4\%$, а $Keff = 3,64$, т.е. эффективность сочетания значима ($Keff >$

$\sqrt{2} \cong 1,414$). Поскольку из-за малости $Kvar$ этот квазиинвариант близок (в пространстве) к константе, равной $K_{CP} + 1,160 \cdot O_{XCP}$ (среднее значение правой части уравнения), то (7) можно записать (заменяв левую часть (7) на это среднее $K_{CP} + 1,160 \cdot O_{XCP}$) как

$$Ox = O_{XCP} + (K - K_{CP})/1,160. \quad (8)$$

Рассмотрим некоторые следствия из найденного стабильного сочетания.

1. При средних значениях контроля озимой пшеницы $K_{CP} = 19,6$ ц/га, находим из (8) $Ox = O_{XCP}$, что равно 31,3 ц/га; при средних значениях контроля значение опыта на 60,0% больше, чем контроль K_{CP} .

2. При низких значениях контроля, когда $K = K_{CP} - K_{SD}$ (8,66 ц/га), т.е. меньше среднего на одно стандартное отклонение $K_{SD} = 11,0$ ц/га, подставляя в (8) это значение K , получаем значение опыта Ox , равное 21,9 ц/га. Это значение опыта превосходит этот низкий контроль (8,66 ц/га) на 152%.

3. При высоких значениях контроля $K = K_{CP} + K_{SD}$ (30,6 ц/га), подставляя в (8) это значение K , получаем значение опыта 40,8 ц/га. Это значение опыта превосходит этот большой контроль (30,6 ц/га) лишь на 33,2%.

Из этих результатов видно, что при оптимальном внесении удобрений на полях, имеющих низкие (по сравнению со средним для региона) урожаи на контроле (8,66 ц/га), опыт Ox более чем в 2,5 раза превосходит контроль. Это означает, что эффект применения удобрений на таких полях относительно высок. На полях же, имеющих высокие урожаи на контроле (30,6 ц/га) опыт Ox превосходит контроль менее чем на треть, т.е., *относительный* эффект применения удобрений на полях с высокими урожаями на контроле сравнительно низкий.

Однако, в *абсолютном* исчислении результаты обратные. На полях с низкими для региона значениями контроля (8,66 ц/га) значения опыта Ox составляют 21,9 ц/га, а на полях с высокими для региона значениями контроля (30,6 ц/га) – 40,8 ц/га.

Целесообразность использования полей с низкими или высокими для региона урожаями на контроле определяется как экономическими критериями, так и ситуацией. Формально экономические критерии (затраты на удобрения) показывают, что выгодно использование полей с высокими значениями урожая на контроле. Однако, использование *только* таких полей может быть нецелесообразно из-за особенностей ситуации – отсутствия поблизости населенных пунктов и др.

Определить участки местности с потенциально высокими (и низкими) значениями характеристик урожайности той или иной культуры можно используя их тесную связь с факторами (условиями) окружающей среды, такими как рельеф, климат и тип почвы. Показано, что для озимой пшеницы западной части Окского бассейна 74% пространственной изменчивости максимальной прибавки (разности $Ox - K$) объясняется перечисленными факторами, причем для региона рассчитана соответствующая матрица (и карта) с разрешением в плане

A method to evaluate stable combinations of crop production features

P.A. Shary¹, O.V. Rukhovich², L.S. Sharaya³

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Sciences, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia, E-mail: p_shary@mail.ru

²Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry, Russian Academy of Agricultural Sciences, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, 127550 Russia, E-mail: o_rukhovich@mail.ru ³Institute of Ecology of the Volga Basin, ul. Komzina 10, Tol'yatti, 4445003 Russia, E-mail: l_sharaya@mail.ru;

A new method to calculate stable combinations of crop yield features was described. It was shown that for winter wheat in the western Oka River basin and oats in the Tver oblast, the crop yields averaged for the years of study on the control plot (without fertilizers) and the maximum yield (under optimum fertilization) formed stable combinations with the lowest spatial variability. The effects of optimum fertilization at the low and high control values were assessed.

Keywords: winter wheat, oat, yield, stable combinations.

600 м [5]. Интересно, что главным фактором среды оказались не климат и почвы, а микроклимат, описываемый одной из характеристик рельефа – освещенностью склонов с юго-запада. При этом подходе использовали методы множественной регрессии, требующие специальных программ.

Для аналогичных характеристик овса в Тверской области находим:

$$\text{Квазиинвариант} = K + 0,8472 \cdot (2O_{XCP} - Ox), \quad (9)$$

при $Kvar = 7,60\%$, $K_{eff} = 4,29$ (объем выборки 39, $r = 0,913$). Модель Ox :

$$Ox = O_{XCP} + (K - K_{CP})/0,8472. \quad (10)$$

В этом случае имеем следующее.

1. При средних значениях контроле овса $K_{CP} = 15,8$ ц/га, находим из (10) $Ox = O_{XCP}$, что равно 23,9 ц/га; при средних значениях контроля опыт на 51,1% больше, чем контроль K_{CP} .

2. При низких значениях контроля, когда $K = K_{CP} - K_{SD}$ (9,29 ц/га), т.е. меньше среднего на одно стандартное отклонение $K_{SD} = 6,54$ ц/га, подставляя в (10) это значение K , получаем значение опыта Ox , равное 16,2 ц/га. Это значение опыта превосходит этот низкий контроль (9,29 ц/га) на 74,4%.

3. При высоких значениях контроля $K = K_{CP} + K_{SD}$ (22,4 ц/га), подставляя в (10) это значение K , получаем значение опыта 31,6 ц/га. Это значение опыта превосходит этот большой контроль (22,4 ц/га) на 41,5%.

Результаты качественно те же, что и приведенные ранее для озимой пшеницы, отличаясь лишь числовыми показателями (менее контрастные эффекты при экстремальном контроле по сравнению с озимой пшеницей).

Описанный подход привлекателен простотой (все расчеты выполнены в программе Excel), давая возможность оценивать стабильные сочетания различных характеристик как урожаев сельскохозяйственных культур, так и условий окружающей среды, выражающихся количественными показателями.

Литература

1. Докучаев В.В. (1901). Лекции о почвоведении // В.В. Докучаев. Избранные сочинения. Т.3. Картография, генезис и классификация почв. - М.: Сельхозгиз, 1949. - С.342. 2. Шарый П.А. Ряды стабильностей пар элементов в серой лесной почве // Биосферные функции почвенного покрова. Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 40-летию юбилею Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. - Пушкино: SYNCHROBOOK, 2010. - Часть 3. - С.347-349. 3. Шарый П.А., Пинский Д.Л. Устойчивые сочетания пар химических элементов в почве и согласованность из узоров в ландшафте // Материалы Второй конференции «Математическое моделирование в экологии» ЭкоМатМод-2011, 23-27 мая 2011 г., г.Пушино: CD-ROM, 2011. - С.300-301. 4. Сычев В.Г., Рухович О.В., Романенков В.А., Беличенко М.В., Листова М.П. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агрохимслужбы и Геосети «Агрогеос» // Проблемы агрохимии и экологии, 2008. - № 3. - С. 35-38. 5. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агрохимия, 2011. - №2. - С.57-81.