

[Фронт Завод Науч](#) . 2019; 10: 1727.

Опубликовано онлайн 2020 24 января. Doi: [10.3389 / fpls.2019.01727](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727)

PMCID: PMC6992656

PMID: [32038691](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32038691/)

Внесение удобрений магнием повышает урожайность в большинстве производственных систем: метаанализ

[Чжэн Ван](#) , ^{1,2,3} [Махмуд Уль Хассан](#) , ¹ [Фейсал Надим](#) , ¹ [Лянцюань Ву](#) , ³ [Фусуо](#)

[Чжан](#) , ^{1,2,3} и [Сюэсянь Ли](#) ^{1,2,*}

[Информация об авторе](#) [Примечания к статье](#) [Информация об авторских правах и лицензии](#) [Отказ от ответственности](#)

Эта статья [цитировалась в](#) других статьях в PMC.

Связанные данные

[Дополнительные материалы](#)

Аннотация

[Перейти к:](#)

Введение

Магний (Mg) является важным элементом для сельскохозяйственных культур, животных и людей, дефицит которого влияет на фотосинтез и распределение углеводов в сельскохозяйственных культурах ([Nèjia et al., 2016](#)), снижает устойчивость сельскохозяйственного производства и развития и вызывает долгосрочные негативные [последствия](#) воздействие на здоровье человека и животных ([Роберт и Хелен, 2004](#) ; [Джероен и др., 2015](#)). К сожалению, очевидные симптомы дефицита Mg часто возникают у сельскохозяйственных культур, особенно на критической стадии их развития с быстрым накоплением углеводов, выращиваемых на кислых почвах, широко распространенных по всему миру ([Cakmak et al., 1994](#) ; [Nèjia et al., 2016](#)). Съедобные сельскохозяйственные продукты являются основным источником питания Mg для людей и животных. Следовательно, поддержание содержания магния в сельскохозяйственных продуктах в относительно достаточном диапазоне очень важно для здоровья животных и человека.

В системе сельскохозяйственного производства доступность Mg для сельскохозяйственных культур зависит от различных факторов, таких как текстура почвы, способность к обмену катионов ([Hariadi and Shabala, 2004](#)), климатические и

антропогенные факторы, специфичные для участка, методы агрономического управления, а также от самих видов сельскохозяйственных культур ([Scheffer and Schachtschabel, 2002](#) ; [Mikkelsen, 2010](#)). Культуры поглощают Mg из почвы в основном через корни. Достаточное количество магния в почве является ключом к устойчивому росту и урожайности сельскохозяйственных культур. Абсолютный дефицит Mg в почве резко снижает поглощение Mg корнями сельскохозяйственных культур, что часто является следствием низкого содержания Mg в [нефтематеринских](#) породах ([Papenfuß and Schlichting, 1979](#)), потерь Mg в результате мобилизации и выщелачивания в почве ([Schachtschabel, 1954](#)), или истощение магния из-за интенсивного растениеводства ([Pol and Traore, 1993](#)). Кроме того, катионная конкуренция, возникающая в результате длительного несбалансированного удобрения почвы, вызывает неоднородность питательных веществ в почвах. Хорошее состояние Mg в почве является предпосылкой для обеспечения поглощения Mg корнями сельскохозяйственных культур и повышения эффективности использования Mg.

Кислотность почвы - еще один важный фактор, определяющий урожайность сельскохозяйственных культур ([Mohebbi and Mahler, 1989](#) ; [Aggangan et al., 1996](#)), тесно связанный с дефицитом калия, кальция, магния, фосфора и цинка, в то время как токсичность алюминия и марганца ([Guo et al., 2004](#) ; [Zhu et al., 2004](#) ; [Binh et al., 2018](#)) препятствует доступности Mg ([Wang et al., 2014](#)). Кроме того, высокая подвижность иона Mg^{2+} делает его чувствительным к вымыванию из корневой зоны сильными дождями ([Schachtschabel, 1954](#) ; [Grzebise, 2011](#) ; [Gransee and Führs, 2013](#)) особенно в кислых почвах, снижая эффективность использования питательных веществ и урожайность сельскохозяйственных культур.

В последние десятилетия для получения более высоких урожаев больше внимания уделялось азотным, фосфорным и калийным удобрениям, чем Mg ([Cakmak and Yazici, 2010](#)). Почвы, подвергающиеся интенсивному кормлению сельскохозяйственных культур и уборке урожая, не пополняются Mg-удобрениями, что приводит к истощению местного Mg из почвы и крупномасштабному дефициту Mg. В настоящее время дефицит Mg стал широко распространенной проблемой, серьезно снижающей скорость фотосинтеза сельскохозяйственных культур, особенно выращиваемых на кислых почвах ([Fischer, 1997](#) ; [Sun and Payn, 1999](#) ; [Ridolfi and Garrec, 2000](#) ; [Graeff et al., 2001](#) ; [Hermans et al., 2004](#)). Симптомы дефицита магния обычно появляются на старых листьях ([Bergmann, 1992](#)). Хлороз является наиболее очевидной реакцией сельскохозяйственных культур на дефицит Mg, которая предсказывает значительное снижение урожайности в результате снижения транспорта сахара от источника к органам-поглотителям и накопления биомассы в корневых и репродуктивных тканях ([Hermans et al., 2004](#) ; [Cakmak and Yazici, 2010](#) ; [Gransee, Führs, 2013](#)). С более широкой точки зрения, удобрение Mg улучшает урожай томатов (7,7–17,9 т га⁻¹) в Южной Индии ([Kashinath et al., 2013](#)), урожай зерна ячменя (на 8,6%) в Иране ([Mahdi et al., 2012](#)), а также максимальное увеличение урожайности фундука на 51% и увеличение общего содержания масла на 4,8% в Турции ([Nedim and Daml, 2015](#)), предполагая, что удобрение магнием является важной мерой для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур. Также имеется обширная литература о важности Mg для продуктивности сельского хозяйства, дефиците Mg в почвах и сельскохозяйственных культурах и участии Mg в структуре и физиологических функциях растений ([Cakmak et al., 1994](#) ; [Cakmak and Kirkby, 2008](#) ; [Cakmak, 2013](#) ; [Ceylan. и др., 2016](#)). Тем не менее, необходимо лучше понять реакцию урожайности сельскохозяйственных культур на Mg-удобрения в различных почвах,

сельскохозяйственных культурах и условиях удобрения в крупномасштабных полевых экспериментах.

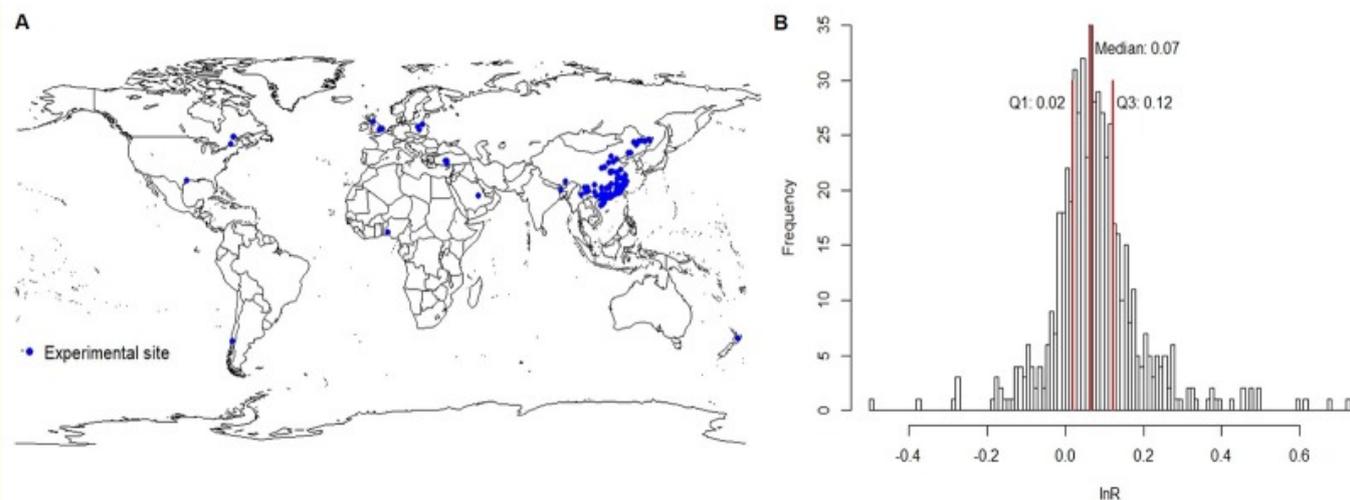
До сих пор не предпринималось попыток систематического повторного анализа влияния Mg-удобрений на урожайность и агрономическую эффективность путем обобщения результатов прошлых экспериментов во всем мире. Такие факторы, как доступный в почве Mg, pH почвы, а также нормы и типы Mg-удобрений, обуславливают реакцию на внесение Mg. В этом исследовании был проведен метаанализ для (1) оценки общего воздействия Mg удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и соответствующую агрономическую эффективность; (2) понять влияние удобрения Mg на урожайность при различных условиях выращивания и удобрения; и (3) оценить, как обменные уровни Mg и pH в почве влияют на результаты удобрения Mg.

[Перейти к:](#)

Материалы и методы

Стратегия поиска и извлечение данных

Чтобы проанализировать влияние Mg-удобрений на урожайность в поле, был проведен всесторонний поиск литературы с использованием «Магниевых (Mg) удобрений *», «Магниевых (Mg) удобрений *» в заголовке статьи и «Урожайность сельскохозяйственных культур *» в качестве ключевых слов. Условия использования электронных баз данных Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com/>) и China National Knowledge Infrastructure (<http://www.cnki.net/>) до ноября 2019 года. Данные были извлечены либо непосредственно из таблиц, либо косвенно из преобразование исходных цифр в опубликованных исследованиях, включая урожайность, концентрацию Mg и сахара в зависимости от удобрения Mg во всем мире (**Рисунок 1А**; большинство исследований из Китая, гораздо меньше из других стран, и отчетов из Бразилии не найдено). Доступно очень мало физиологических и качественных данных; следовательно, соответствующая оценка не была включена в это исследование. Влияние удобрений Mg на урожай соответствовало стандартному нормальному распределению (**Рисунок 1В**). Исследования были отобраны в соответствии со следующими четырьмя критериями: (1) исследования, содержащие сравнения удобрений магнием и без удобрения магнием (контроль), (2) представляющие полевые эксперименты, исключая горшечный эксперимент в теплице, (3) с удобрением магния в теплице. почвы, за исключением внекорневого применения Mg, (4) исследование, в котором указаны типы сельскохозяйственных культур, урожайность, среднее значение и количество парных наблюдений (**дополнительный рисунок S1**).



[фигура 1](#)

Распределение экспериментальных участков на карте (А) и частотное распределение данных, указывающих на влияние удобрения Mg на урожай (В) для нашего метаанализа. Голубые точки обозначают местные экспериментальные участки Mg удобрений на поле (А) . Три красные линии Q1 (слева), медианы (в центре) и Q3 (справа) соответствуют частоте данных 25%, 50% и 75% (В) .

Источники данных

В общей сложности 99 статей (см. Список исследований в [дополнительном листе данных S1](#)) с 570 попарными сравнениями, подходящими для нашего мета-анализа (396 из Китая и 174 из других стран). О полевых испытаниях сообщалось в десяти странах (Бангладеш, Канада, Китай, Чили, Иран, Новая Зеландия, Нигерия, Польша, Турция и Великобритания) ([Рисунок 1А](#)).

Размеры эффектов и их моделирование

Влияние удобрения Mg на урожайность оценивали по сравнению с соответствующим контролем без удобрения Mg по следующему уравнению:

$$\ln R = \ln (\text{ИксТИксс})$$

где $\ln R$ представляет собой натуральный логарифм отношения отклика (размер эффекта), Xt представляет урожай культуры при удобрении Mg, а Xc представляет урожай культуры без удобрения Mg ([Hedges et al., 1999](#) ; [Verena et al., 2012](#)). Учитывая, что более 50% тематических исследований не предоставили меру дисперсии, тематические исследования были взвешены с использованием количества исследований и экспериментов с использованием моделей смешанных эффектов в R. Для ясной интерпретации влияние на урожайность выражалось как процентное изменение, которое рассчитывалось как $(R - 1) \times 100\%$. Положительное процентное изменение указывает на увеличение, тогда как отрицательные значения указывают на снижение из-за удобрения Mg. Среднее процентное изменение считалось значительно отличным от нуля, если 95% доверительный интервал не перекрывался с нулем ([Hedges et al., 1999](#)).

Агрономическая эффективность Mg-удобрений (АЕ-Mg) рассчитывалась по следующему уравнению:

$$A E- \text{ Мграмм} = (X_T - X_B) / F_{\text{Мграмм}0}$$

где F_{MgO} представляет количество (кг MgO га⁻¹) внесенных Mg удобрений.

Статистический анализ проводился с использованием моделей смешанных эффектов в R (версия 3.5.1) следующим образом: (1) фиксированный эффект, (2) фиксированный эффект и случайный эффект исследования, (3) фиксированный эффект и случайные эффекты исследования и эксперимент, вложенный в исследование, и (4) фиксированный эффект и уникальный случайный эффект эксперимента. Соответствующие случайные эффекты были идентифицированы с помощью анализов AIC (информационный критерий Акаике) и ANOVA (пакеты R Stats) со значительной разницей при $P < 0,05$ и $P < 0,01$ (SPSS 20,0).

Обзор набора данных

Полученный набор данных содержал 570 тематических исследований, охватывающих более 30 сельскохозяйственных культур в десяти странах ([дополнительная таблица данных S1](#)). В соответствии с характеристиками культур и их реакцией на удобрения Mg, родственные культуры были проанализированы в девяти группах: зерновые (рис, кукуруза, пшеница, ячмень), фрукты (яблоко, банан, ананас, апельсин, помело, личи, арбуз, сахарный тростник), овощи (капуста, салат, перец, помидоры, огурцы), клубни (картофель, сладкий картофель, маниока, морковь), масличные культуры (соя, арахис, рапс, подсолнечник), травы, табак, чай и другие культуры (сахарная свекла, лук, расторопша, черника).

Чтобы лучше интерпретировать результаты, почвы были эмпирически разделены на кислые (<6,5), нейтральный (6,5-7,5) и щелочной (> 7,5) или Mg с дефицитом (<60 мг кг⁻¹), умеренный (60-120 мг кг⁻¹) и относительно достаточного (> 120 мг / кг⁻¹) типов, соответственно, в зависимости от уровня pH и обменного Mg в почве.

Удобрения Mg были разделены на два типа: (1) удобрения с медленным высвобождением (Mg-S), включая оксид Mg, гидроксид Mg, доломит, карбонат Mg и фосфат кальция-Mg, и (2) удобрения с быстрым высвобождением (Mg-R), включая Сульфат магния, хлорид магния и сульфат магния калия. Нормы внесения удобрений варьировались в диапазоне <50, 50–100 и > 100 кг MgO га⁻¹.

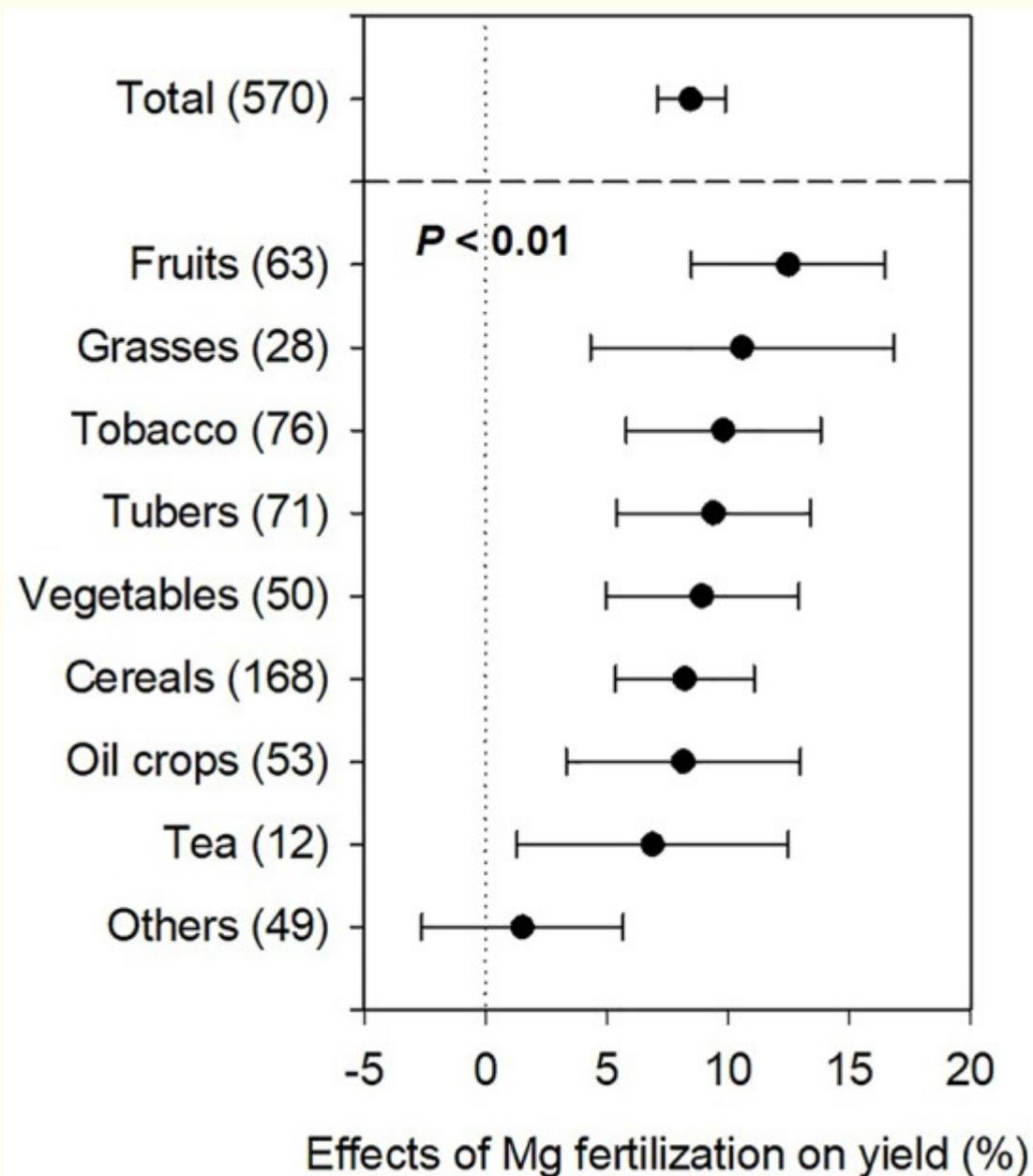
[Перейти к:](#)

Полученные результаты

Удобрение магнием (Mg) повышает урожайность большинства культур

Магниевые удобрения обычно способствовали повышению урожайности большинства сельскохозяйственных культур ([дополнительный рисунок S2](#)), а увеличение урожайности варьировалось в зависимости от вида сельскохозяйственных культур, состояния почвы, нормы удобрения магнием и других факторов. Средний прирост урожайности в растениеводстве составил 8,5% согласно нашему метаанализу ([фигура 2](#)). Удобрение магнием значительно увеличило урожай фруктов (12,5%), трав (10,6%), табака (9,8%), клубней (9,4%), овощей (8,9%), зерновых (8,2%), масличных культур (8,2%) и чай (6,9%), хотя и незначительно для других культур (1,5%), по сравнению с обработкой без добавок Mg при $P < 0,05$ ([фигура 2](#)). Более того, средняя прибавка урожая фруктов, трав, табака, клубней и овощных культур была выше, чем в целом, а урожайность зерновых, масличных, чая и других культур была ниже ([фигура](#)

2). Реакция культур на Mg различалась в зависимости от почвы и других связанных условий. Мета-анализ показал, что концентрация Mg в листьях и концентрация сахара в тканях сельскохозяйственных культур (клубнях и бобах) увеличились на 34,3% (Рисунок 3А) и 5,5% (Рисунок 3В) при $P < 0,01$ соответственно при удобрении Mg.



фигура 2

Относительное влияние удобрений Mg на урожайность. Точки данных представляют собой средние значения \pm 95% ДИ (доверительный интервал), а количество экспериментальных наблюдений указано в скобках. P указывает на значительные различия между культурами.

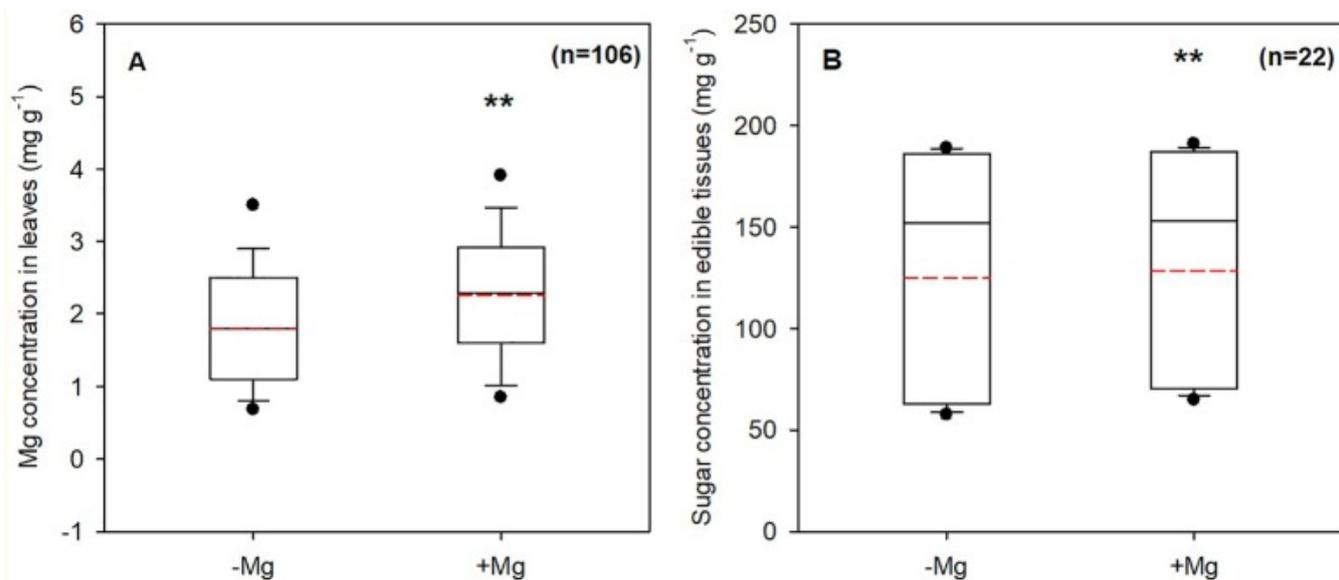


Рисунок 3

Концентрации Mg в листьях (А) и сахара в съедобных тканях (В) с добавлением Mg (+ Mg) и без добавления Mg (-Mg). Сплошные черные и пунктирные красные линии обозначают медианное и среднее значение соответственно. Границы прямоугольника указывали на квартили 75% и 25%; планки ошибок указывают на 90-й и 10-й процентиля; а черные точки обозначают 95-й и 5-й процентиля. ** указывает на весьма значимые различия между видами лечения ($P < 0,01$).

Агрономическая эффективность магниальных удобрений положительно коррелировала с увеличением урожайности большинства культур

Агрономическая эффективность (АЕ) - важный параметр, указывающий на относительную эффективность удобрений в сельскохозяйственном производстве. ДП Mg удобрений определяли как прибавку урожая на единицу внесенных Mg удобрений. В среднем АЕ-Mg был 34,4 кг кг⁻¹ при 541 случаев (количество Mg оплодотворения не сообщалось в 29 случаях) были объединены в этом исследовании (Рисунок 4). Подобно влиянию видов сельскохозяйственных культур на повышение урожайности, агрономическая эффективность Mg-удобрений (АЕ-Mg) также зависела от видов сельскохозяйственных культур, хотя и не соответствовала первому эффекту. АЕ-Mg овощей (73,7 кг кг⁻¹) было значительно выше, чем у клубневых (58,8 кг кг⁻¹), фруктовых (55,0 кг кг⁻¹) и зерновых (34,7 кг кг⁻¹) культур при $P < 0,05$ (Рисунок 4). Однако не было значительных различий в АЕ-Mg между чаем, травами, маслом, табаком и другими экспериментами с культурами из-за больших различий (Рисунок 4).

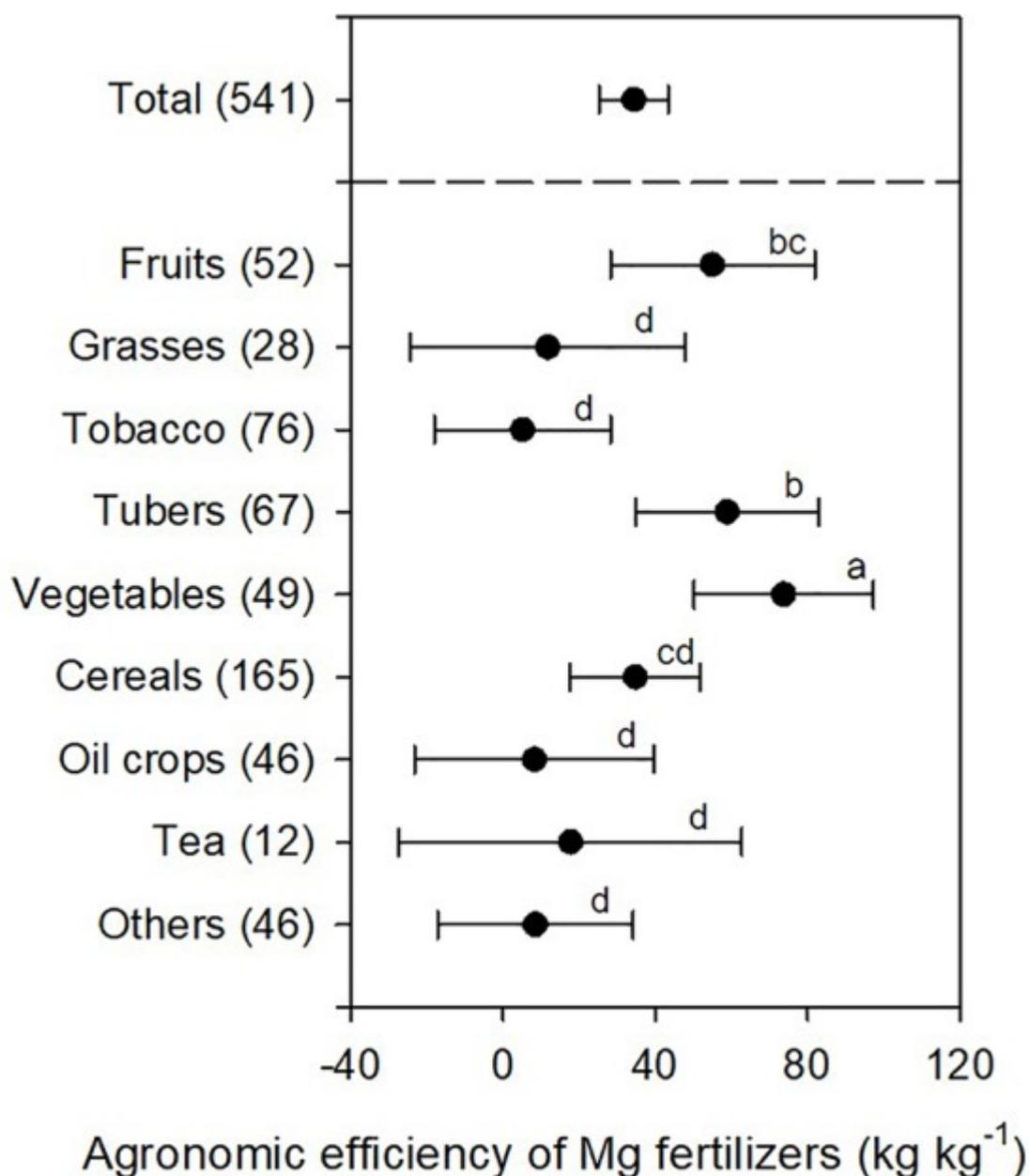


Рисунок 4

Агрономическая эффективность Mg удобрений (АЕ-Mg) для различных культур. Точки данных представляют собой средние значения \pm 95% ДИ (доверительный интервал), а количество экспериментальных наблюдений указано в скобках. Маленькими буквами обозначены существенные различия между разными культурами ($P < 0,05$).

Расчет АЕ-Mg был основан на свежем весе собранных частей различных культур (за исключением урожая сухого вещества трав). Более высокое содержание воды в собранном органе ведет к увеличению АЕ-Mg. Ответы сельскохозяйственных культур на Mg (Рисунок 5) и количество внесенных Mg удобрений (Рисунок 6) также повлиял на АЕ-Mg. Среди четырех типов сельскохозяйственных культур (овощей, клубней, фруктов и злаков), чувствительных к удобрению Mg (Рисунок 4), повышение урожайности овощей ($P < 0,05$) и фруктов ($P < 0,01$) значимо коррелировало с концентрациями Mg (Рисунок 5B).

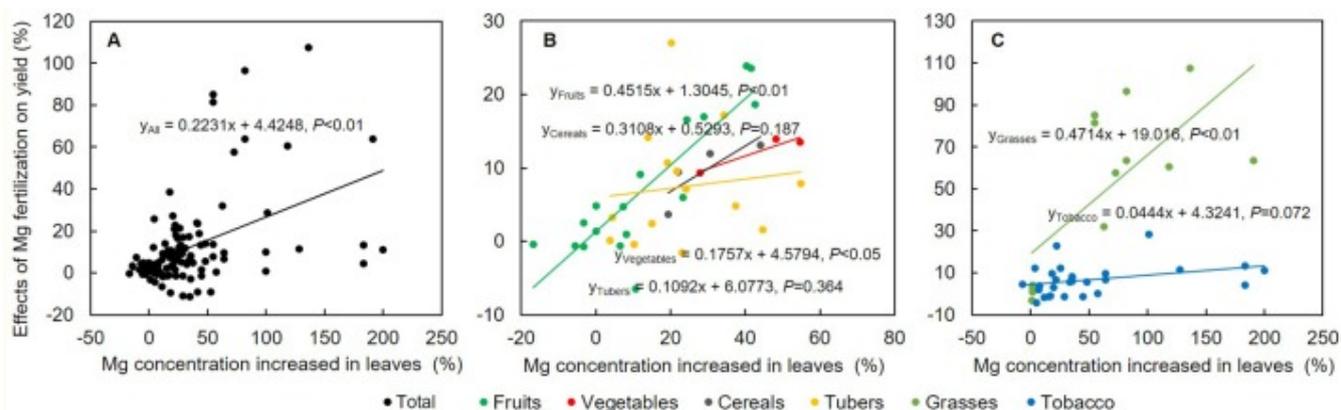


Рисунок 5

Взаимосвязь между влиянием удобрения Mg на урожай и вариациями концентраций Mg во всех культурах (A), овощах, клубнях, фруктах, злаках (B), травах и табаке (C). Отдельный урожай был представлен цветным кружком, а отношение отклика представлено прямой линией того же цвета. *P*- значение, указывающее на значимость результатов.

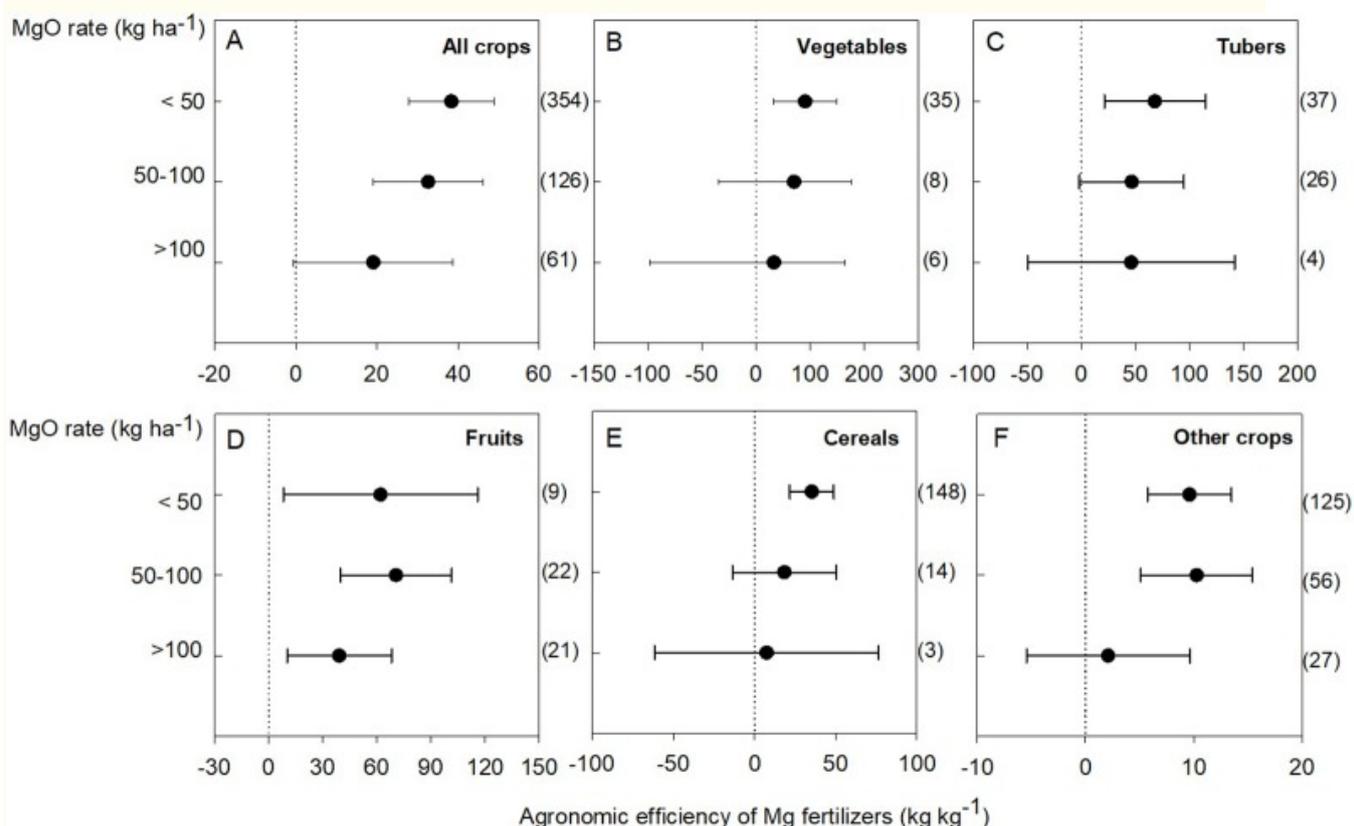


Рисунок 6

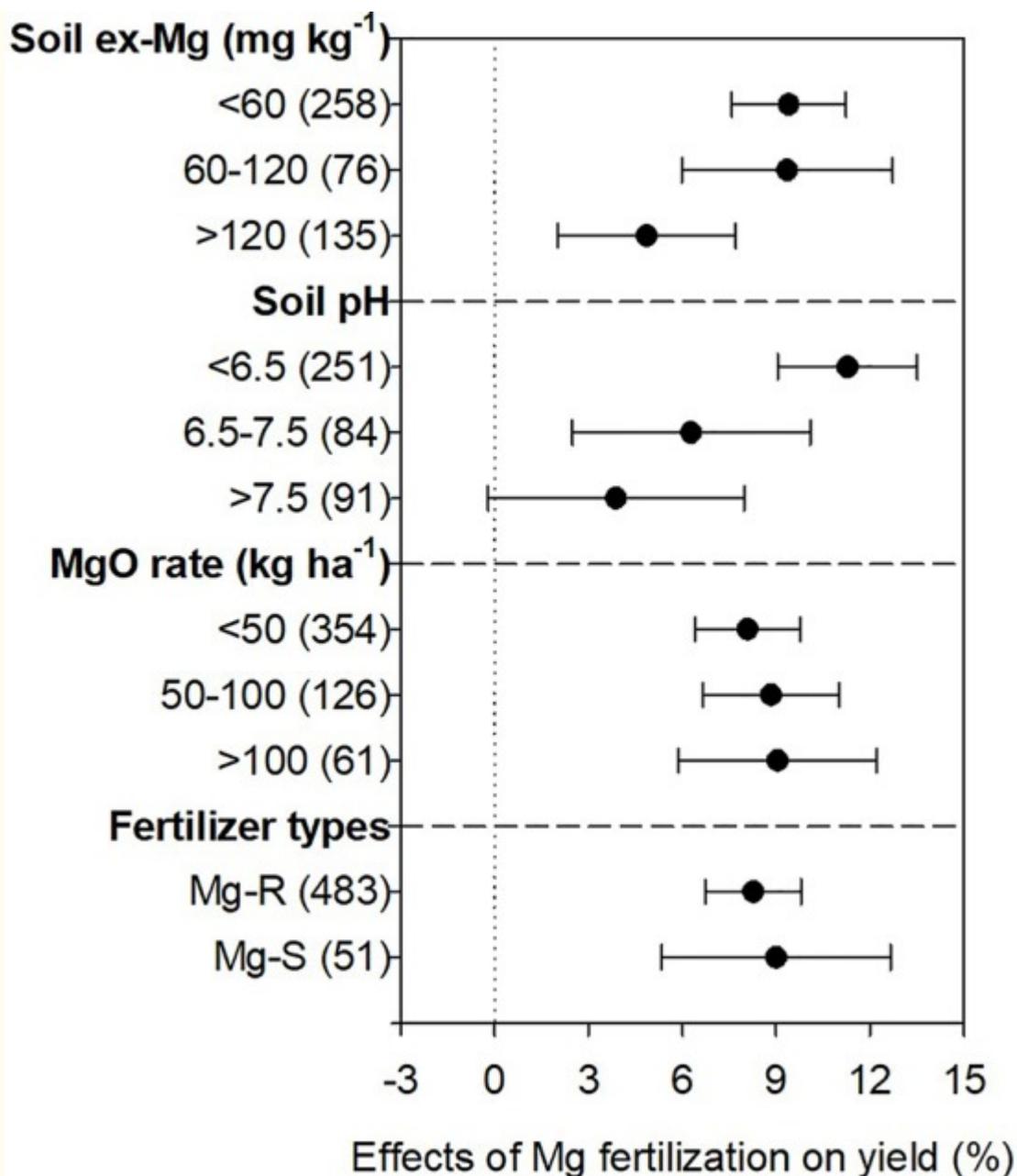
Агрonomическая эффективность Mg-удобрений (АЕ-Mg) для всех сельскохозяйственных культур (A), овощей (B), клубней (C), фруктов (D), зерновых (E) и других культур (табак, чай, травы, масло и другие культуры) (F). Точки данных представляют собой средние значения \pm 95% ДИ (доверительный интервал), а количество экспериментальных наблюдений указано в скобках. MgO, оксид магния.

Как правило, АЕ-Mg реагировал на внесение Mg при внесении менее 100 кг MgO га⁻¹ (Рисунок 6А). Хотя не было данных для сахарного тростника (в группе фруктов) и сахарной свеклы (в группе других культур) при удобрении Mg ниже 50 кг MgO га⁻¹, АЕ-Mg в овощах (90,8 кг кг⁻¹), клубнях (68,0 кг кг⁻¹) и зерновые (35,3 кг кг⁻¹)

культуры реагировали на удобрения Mg ниже 50 кг MgO га⁻¹ ([Рисунки 6В, С, Е](#)); АЯ-Mg в плодах (62,0 кг кг⁻¹) ([Рисунок 6D](#)) и других культур (9,6 кг кг⁻¹) ([Рисунок 6F](#)) реагировал даже в диапазоне 50–100 кг MgO га⁻¹. Примечательно, что плодовые культуры реагировали на внесение Mg более 100 кг MgO га⁻¹ ([Рисунок 6Е](#)). Разница, вероятно, была связана с различными реакциями сельскохозяйственных культур на Mg, которые обусловили колебания урожайности в зависимости от изменений концентрации Mg в листьях ([Рисунок 5](#)). Важно отметить, что наблюдалась значимая положительная корреляционная связь между урожайностью сельскохозяйственных культур и концентрацией Mg в листьях ($P < 0,01$, [Рисунок 5А](#)). Что касается разных категорий культур, линейная корреляция была значимой для овощей ($P < 0,05$), фруктов и трав ($P < 0,01$) ([Рисунки 5В, С](#)).

Состояние почвы и типы удобрений, на которые влияет удобрение

Корни сельскохозяйственных культур исследуют неоднородно доступные минеральные питательные вещества в почве для поглощения, чтобы поддерживать рост и развитие растений ([Hodge, 2004](#) ; [Nibau et al., 2008](#)). Почвенные условия, например концентрация обмениваемого Mg и уровни pH почвы, имеют прямое влияние на доступность Mg для сельскохозяйственных культур, тем самым влияя на урожайность сельскохозяйственных культур в долгосрочной перспективе ([Foy and Barber, 1958](#) ; [Fox and Piekielek, 1984](#) ; [Clarka et al., 1997](#)). Наш метаанализ показал очевидные стимулирующие эффекты Mg удобрений на урожайность в кислых почвах с дефицитом Mg ([Рисунок 7](#)). Урожайность сельскохозяйственных культур увеличилась на 9,4%, 9,4% и 4,9% за счет удобрения Mg соответственно при дефиците Mg (обменный Mg <60 мг / кг⁻¹), умеренном (60–120 мг / кг⁻¹) и относительно достаточном (> 120 мг. кг⁻¹) условия. Точно так же Mg повысил урожайность сельскохозяйственных культур на 11,3%, 6,3% и 3,9% соответственно в кислых (pH <6,5), нейтральных (pH 6,5–7,5) и щелочных (pH > 7,5) почвенных условиях ([Рисунок 7](#)). Увеличение урожайности положительно коррелировало с количеством Mg удобрений, особенно при уровнях внесения выше 100 кг MgO га⁻¹ (прибавка урожая 9,0%, [Рисунок 7](#)). Тем не менее, два разных типа Mg-удобрений Mg-R (8,3%) и Mg-S (9,0%) не показали значительной разницы в повышении урожайности ([Рисунок 7](#)).



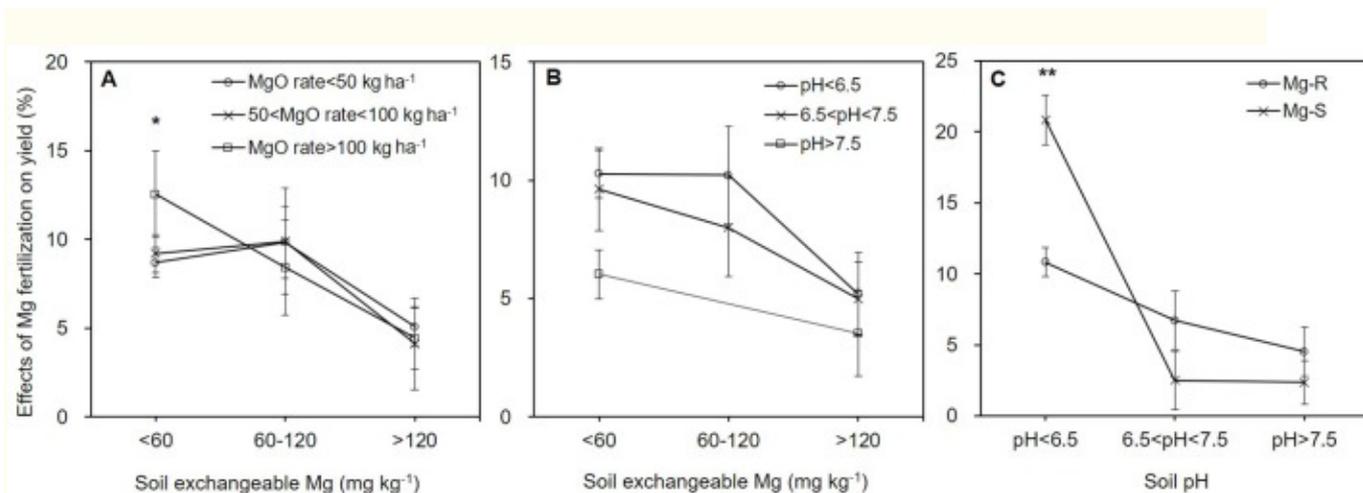
[Рисунок 7](#)

Влияние Mg удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур в различных почвенных условиях (концентрации обменного Mg, pH почвы, нормы внесения MgO и типы Mg удобрений). Точки данных представляют собой средние значения \pm 95% ДИ (доверительный интервал), а количество экспериментальных наблюдений указано в скобках. Ex-Mg в почве, почвенный обменный магний; MgO, оксид магния; Mg-R, быстро высвобождаемые Mg удобрения; Mg-S, медленно выделяемые удобрения Mg.

Влияние взаимодействия Ex-Mg и норм внесения удобрений, Ex-Mg и pH, а также pH и типов удобрений

Учитывая большие различия в режимах удобрения и почвенных условиях в полевых экспериментах, необходимо оценить эффекты взаимодействия различных влияющих факторов на стимулирующие эффекты удобрения Mg на урожай. Уровень ex-Mg был значимым фактором по сравнению с нормой внесения удобрений Mg

($P < 0,05$, [Таблица S1](#)). При увеличении концентрации обменного Mg в почве урожайность умеренно или слабо реагировала на удобрения Mg. Примечательно, что применение Mg более $100 \text{ кг MgO га}^{-1}$ в почвах с дефицитом магния дало наибольший прирост урожая (12,5%) ([Рисунок 8A](#)). Корректировка содержания MgO не вызвала значительных различий в почвах с умеренным или относительно достаточным содержанием ex-Mg ([Рисунок 8A](#)).



[Рисунок 8](#)

Взаимодействие двух факторов на повышение урожайности: обменный Mg в почве и нормы Mg удобрений (A), обменный Mg и pH почвы (B), pH почвы и типы Mg удобрений (C). * и ** указывают на достоверные различия при $P < 0,05$ и $P < 0,01$, соответственно. MgO, оксид магния; Mg-R, быстро высвобождаемые Mg удобрения; Mg-S, медленно выделяемые Mg удобрения.

Действительно, влияние Mg-удобрений на урожайность комбинаторно определялось уровнями pH и статусом ex-Mg почв ($P = 0,803$, [дополнительная таблица S2](#)) с концентрацией ex-Mg как основным влиятельным фактором ($P = 0,05$, [Дополнительная таблица S2](#)). Среднее увеличение урожайности, полученное в результате удобрения Mg в условиях дефицита Mg, было больше, чем при умеренных или относительно достаточных условиях Mg, независимо от изменений pH почвы ([Рисунок 8](#)). Однако эффект взаимодействия pH почвы и типов Mg-удобрений был значительным ($P < 0,05$, [дополнительная таблица S3](#)). Тип Mg-S значительно повысил урожайность сельскохозяйственных культур (20,9%) по сравнению с типом Mg-R (10,8%) в кислых почвах ($P < 0,01$, [Рисунок 8C](#)). Тип Mg-S также оказывает определенное влияние на повышение кислотности почвы, что косвенно повышает эффективность использования; и Mg-R показал лучшие результаты, чем Mg-S, в нейтральных и щелочных почвах ([Рисунок 8C](#)).

[Перейти к:](#)

обсуждение

Применение магния увеличивает урожайность

Магний играет важную роль в обеспечении урожайности сельскохозяйственных культур ([Сенбайрам и др., 2015](#)); К сожалению, за последние 50 лет концентрация Mg в пшенице, фруктах и овощах снизилась ([Andrea, 2013](#)). Скрытый и острый дефицит Mg - обычное явление в растениеводстве ([Römheld and Kirkby, 2007](#)). Внесение

удобрений магнием улучшает урожайность сельскохозяйственных культур ([Mahdi et al., 2012](#) ; [Kashinath et al., 2013](#) ; [Nedim and Daml, 2015](#)). Учитывая большие различия в видах сельскохозяйственных культур, режимах удобрения, а также почвенно-климатических условиях в полевых экспериментах, необходимо систематически оценивать или количественно оценивать общее влияние удобрений Mg на урожайность сельскохозяйственных культур, соответствующую агрономическую эффективность и то, как pH и уровни обменного Mg влияют на эффекты Удобрение Mg. Здесь мы выбрали 396 наборов наблюдений из Китая и 174 за пределами Китая, чтобы проанализировать, как внесение в почву Mg удобрений влияет на урожайность в поле.

Наш метаанализ показал более высокую урожайность фруктов, трав, табака, клубней, овощей, зерновых, масличных культур, чая и других культур с общим увеличением на 8,5% ([фигура 2](#)), когда было внесено разумное количество Mg (например, 94,1, 46,9, 54,1, 58,3, 43,5, 27,8, 47,2, 34,1 и 76,8 кг MgO га⁻¹, соответственно). В условиях дефицита Mg удобрение Mg приводит к значительному увеличению урожайности; когда его нет в дефиците, применяемый Mg удовлетворяет высокие потребности сельскохозяйственных культур в период их быстрого роста. В качестве альтернативы, высокие концентрации ионов, таких как K⁺, Ca²⁺ и NH₄⁺, вероятно, [препятствуют](#) поглощению Mg²⁺ ([Mulder, 1956](#) ; [Seggewiss and Jungk, 1988](#) ; [Wilkinson et al., 1990](#) ; [Marschner, 2012](#)); следовательно, удобрение Mg увеличивает Mg²⁺пропорции и ослабляет другой катионный антагонизм в почвенном растворе. Дефицит магния препятствует усвоению питательных веществ и снижает скорость роста листьев, влияя на поступление ассимилятов к растущим корням и их способность усваивать питательные вещества, и в конечном итоге снижает урожайность ([Cakmak and Kirkby, 2008](#)).

Магний является ключевым компонентом нескольких биологических процессов (фиксация CO₂ при фотосинтезе, фотофосфорилировании, синтезе белков и хлорофилла, загрузка флоэмы и перемещение ассимилятов) в листьях ([Cakmak and Yazici, 2010](#)). Фотосинтетические ассимиляты из листьев транспортируются к поглощающим органам (таким как корни, кончики побегов и семена) и хранятся в виде крахмала или превращаются в гексозы ([Cakmak et al., 1994](#) ; [Hermans et al., 2005](#) ; [Lemoine et al., 2013](#)) для увеличения урожайности при достаточном Mg-статусе ([Brohi et al., 2000](#) ; [Laing et al., 2000](#)). Транспорт сахарозы из источника в ткани-поглотители происходит через флоэму с помощью ферментов инвертазы и сахарозосинтазы ([Sturm and Tang, 1999](#) ; [Winter and Huber, 2000](#) ; [Welham et al., 2009](#)). Следовательно, соответствующая концентрация Mg в листьях важна для обеспечения активности ферментов, участвующих в транспорте Mg и сахаров от источника к поглотителю, что может быть достигнуто путем посадки правильных видов, а также регулирования количества удобрений Mg ([White and Broadley, 2009](#)).

Производство Mg²⁺ и близкого ему сахара в листьях имеет первостепенное значение для накопления биомассы и развития зерна ([Koch, 1996](#) ; [Orlovius and McHoul, 2015](#)). Mg²⁺ также способствует разделению ассимилятов и транслокации в исходные ткани ([Cakmak and Kirkby, 2008](#) ; [Cakmak, 2013](#)). Дефицит Mg снижает вес зерна и снижает качество зерна пшеницы ([Ceylan et al., 2016](#)). Мы обнаружили, что концентрация сахара в культурах увеличивалась при применении Mg по сравнению с культурами без применения Mg ([Рисунок 3В](#)). Повышенное накопление сахара за счет удобрения Mg полезно для растениеводства независимо от видов растений ([Strebel and Duynisveld, 1989](#) ; [Marschner, 2012](#) ; [Orlovius and McHoul, 2015](#)).

Агрономическая эффективность Mg удобрений варьируется в зависимости от вида сельскохозяйственных культур

Mg²⁺ играет решающую роль в регуляции фотосинтеза ([Sun and Payn, 1999](#)); Дефицит магния серьезно снижает скорость фотосинтеза, фотоассимилирует транспорт к поглотителям и урожай ([Nèjja et al., 2016](#)). Применение магния способствовало повышению концентрации Mg в листьях ([Рисунок 3А](#)) и урожайности ([фигура 2](#)). Повышенная концентрация Mg в листьях способствовала увеличению урожайности всех культур ([Рисунок 5А](#)) и значимые ответы наблюдались во фруктах ($P < 0,01$), овощах ($P < 0,05$) ([Рисунок 5В](#)) и трав ($P < 0,01$, [Рисунок 5С](#)). Однако агрономическая эффективность Mg-удобрений (АЕ-Mg) показала другую картину из-за различий в поглощении или использовании Mg между видами сельскохозяйственных культур ([Рисунок 4](#)). Мы проанализировали 541 набор данных и определили, что АЕ-Mg составляет в среднем 34,4 кг кг⁻¹ ([Рисунок 4](#)). Овощи всегда были наиболее чувствительны к внесению Mg, а злаки - наименее восприимчивыми ([Рисунок 4](#)). Даже для зерновых культур, АЯ-Mg составила 34,7 кг кг⁻¹ ([Рисунок 4](#)), что значительно выше, чем у азота (8,0–10,4 кг кг⁻¹), фосфора (7,3–9,0 кг кг⁻¹) и калия (5,3–6,3 кг кг⁻¹) ([Zhang et al., 2008](#)). У растений обычно схожие концентрации Mg и P ([Marschner, 2012](#)); Однако, в отличие от длительного удобрения NPK, удаление Mg из почвы при уборке урожая не было дополнено, и Mg легче выщелачивается ([Schachtschabel, 1954](#) ; [Grzebise, 2011](#) ; [Gransee and Führs, 2013](#)), что приводит к большему эффекту урожайности. и выше АЕ-Mg при применении Mg.

Почвенные условия в первую очередь определяют влияние внесения магниальных удобрений на урожайность

pH почвы напрямую влияет на высвобождение магния из глинистых минералов и поглощение Mg растениями ([Schubert et al., 1990](#)). Обменный Mg при pH < 6,0 становится незаменимым, когда pH почвы становится выше 6,5 ([Chan et al., 1979](#) ; [Hailes et al., 1997](#)). Mg подвергается выщелачиванию в кислых почвах, а H⁺ , Al³⁺ и Mn²⁺ в ризосфере могут препятствовать поглощению Mg, тем самым снижая урожайность сельскохозяйственных культур ([Metson, 1974](#) ; [Mayland and Wilkinson, 1989](#)). Удобрение Mg не только увеличивает биодоступность Mg²⁺ , но также снижает токсичность Al³⁺ и Mn²⁺ ([Bot et al., 1990](#); [Госс и Карвалью, 1992](#) ; [Bose et al., 2011](#) ; [Маршнер, 2012](#)). Следовательно, резкое увеличение урожайности наблюдалось, когда уровень обменного Mg был ниже 60 мг / кг⁻¹ или pH был ниже 6,5, с меньшей степенью влияния урожайности в других условиях ([Рисунок 7](#)). Культуры, возделываемые на почвах с дефицитом магния, показывают положительную реакцию на внесение магниальных удобрений в зависимости от нормы и времени внесения ([White and Broadley, 2009](#) ; [Grzebisz, 2013](#)). Таким образом, внесение удобрений Mg в кислую почву и почву с дефицитом Mg очень важно для управления питательными веществами сельскохозяйственных культур.

Эффект урожайности был наибольшим в почве с дефицитом магния независимо от содержания MgO ([Рисунок 8А](#)) и pH почвы ([Рисунок 8В](#)). Хотя уровни обменного Mg были основными факторами, определяющими увеличение урожайности ([дополнительные таблицы S1](#) и [S2](#)), наблюдалась четкая взаимосвязь между pH почвы и типами удобрений ([дополнительная таблица S3](#)). Удобрения Mg обычно делятся на быстро высвобождаемые (Mg-R) и медленно высвобождаемые (Mg-S) типы с различным размером частиц и растворимостью в воде ([Mayland and Wilkinson, 1989](#) ; [Härdter et al., 2004](#) ; [Loganathan et al., 2005](#)). , Mg-S высвобождается медленно, а

улучшенный выход более эффективен по сравнению с Mg-R ([Рисунок 8С](#)). Mg-S также эффективно усваивается растениями и нейтрализует почвенные кислоты. И Mg-R, и Mg-S улучшили урожай без существенной разницы между двумя типами Mg удобрений ([Рисунок 8](#)).

[Перейти к:](#)

Выводы

Магний имеет аналогичные концентрации с фосфором в тканях растений. Однако Mg легко выщелачивается в кислых почвах, и конкуренция излишних катионов делает Mg менее доступным для корней растений. К сожалению, фермеры плохо осведомлены о дефиците магния. Таким образом, ограничение Mg становится все более серьезным ограничивающим фактором в растениеводстве. Наш анализ показал, что применение Mg повысило урожайность сельскохозяйственных культур на 8,5% в различных полевых условиях по всему миру, наряду с повышением концентрации Mg и сахара в тканях растений. Увеличение урожайности составило 10,6% при остром дефиците магния и 10,8% при pH почвы ниже 6,5.

Агрономическая эффективность магниевых удобрений составила 34,4 кг кг⁻¹ и увеличилась до 38,3 кг кг⁻¹ при более низких уровнях MgO (0–50 кг га⁻¹), что значительно выше, чем у азота, фосфора и калия. Наши результаты показывают, что он более эффективен с точки зрения повышения урожайности за счет применения магниевых удобрений по сравнению с внесением других макроэлементов, открывая новый путь к высокой эффективности питательных веществ, сбалансированному удобрению для получения высокого урожая и качества, а также устойчивого развития сельского хозяйства. ,

[Перейти к:](#)

Вклад авторов

XL и FZ разработали исследования. Собранные данные ZW, MH, FN и LW. ZW и XL написали статью. ФЗ отредактировал рукопись. Все авторы одобрили окончательную рукопись.

[Перейти к:](#)

финансирование

Эта работа финансировалась Международным институтом магния (IMI, Университет сельского и лесного хозяйства Фуцзянь, Китай) и Китайской национальной программой фундаментальных исследований (2015CB150400).

[Перейти к:](#)

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что исследование проводилось в отсутствие каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

[Перейти к:](#)

Сокращения

N, азот; P, фосфор; K, калий; Ca, кальций; Mg, магний; AE-Mg, агрономическая эффективность Mg удобрений; ex-Mg, обменный магний.

[Перейти к:](#)

Дополнительный материал

Дополнительные материалы к этой статье можно найти в Интернете по адресу: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01727/full#supplementary-material>

Дополнительный лист данных S1

Список исследований, используемый для метаанализа.

[Щелкните здесь, чтобы просмотреть дополнительный файл данных.](#) (227 КБ, CSV)

[Щелкните здесь, чтобы просмотреть дополнительный файл данных.](#) (271 КБ, pdf)

[Щелкните здесь, чтобы просмотреть дополнительный файл данных.](#) (164 КБ, pdf)

[Щелкните здесь, чтобы просмотреть дополнительный файл данных.](#) (17 КБ, pdf)

[Щелкните здесь, чтобы просмотреть дополнительный файл данных.](#) (17 КБ, pdf)

[Щелкните здесь, чтобы просмотреть дополнительный файл данных.](#) (17 КБ, pdf)

[Перейти к:](#)

Ссылки

1. Агганган Н.С., Делл Б., Малайчук Н. (1996). Влияние pH почвы на эктомикоризную реакцию проростков *Eucalyptus urophylla*. Новый Фитол. 134 (3), 539–546. 10.1111 / j.1469-8137.1996.tb04372.x [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
2. Андреа Р. (2013). Изменение концентрации магния в сельскохозяйственных культурах: влияние на здоровье человека . Почва растений 368 , 139–153. 10.1007 / s11104-012-1471-5 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
3. Бергманн В. (1992). Нарушения питания растений - развитие, визуальная и аналитическая диагностика (Германия: Gustav Fischer Verlag);. [[Google Scholar](#)]
4. Бинь Т.Н., Тхань К.Д., Тхань В.Т., Муи К.Д., Кергис Д.Д., Фук В.Л. и др. (2018). Высокое содержание Mn и Al в почве, а также низкая концентрация фосфора в листьях могут объяснить низкую продуктивность натурального каучука на тропической кислой почве во Вьетнаме . J. Plant Nutr. 41 (7), 903–914. 10.1080 / 01904167.2018.1431674 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
5. Бозе Дж., Бабурина О., Ренгель З. (2011). Роль Mg в снижении токсичности алюминия для растений . J. Exp. Bot. 62 , 2251–2264. 10.1093 / jxb / erq456 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
6. Бот JL, Goss MJ, Carvalho MJGPR, Van Beusichem ML, Kirkby EA (1990). Значение соотношения магния и марганца в тканях растений для роста и снижения токсичности марганца для растений томата (*Lycopersicon esculentum*) и пшеницы (*Triticum aestivum*) . Почва растений 124 , 205–210. 10.1007 / BF00009261 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

7. Брохи А.Р., Караман М.Р., Топбас М.Т., Актас А., Саваслы Э. (2000). Влияние калийно-магниевых удобрений на урожайность и содержание питательных веществ в рисовых культурах, выращиваемых на искусственной заиленной почве . *Turk. J. Agric. Дял.* 24 , 429–435. 5000029240 [[Google Scholar](#)]
8. Чакмак И., Киркби Е.А. (2008). Роль магния в разделении углерода и уменьшении фотоокислительного повреждения . *Physiol. Plantarum* 133 , 692–704. 10.1111 / j.1399-3054.2007.01042.x [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
9. Чакмак И., Язычи А.М. (2010). Магний: элемент, о котором забывают в растениеводстве . *Лучшие культуры* 94 , 23–25. www.researchgate.net/publication/291869977 . [[Google Scholar](#)]
10. Чакмак И., Хенгелер К., Маршнер Х. (1994). Изменения во флоэме экспорта сахарозы в листьях в ответ на дефицит фосфора, калия и магния у растений фасоли . *J. Exp. Bot.* 45 , 1251–1257. 10.1093 / jxb / 45.9.1251 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
11. Чакмак И. (2013). Магний в растениеводстве, качестве продуктов питания и здоровье человека . *Почва для растений* 368 , 1–4. 10.1007 / s11104-013-1781-2 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
12. Джейлан Ю., Кутман У.Б., Менгутаи М., Чакмак И. (2016). Внесение магния в среду роста и листу влияет на распределение крахмала, увеличивает размер зерна и улучшает всхожесть семян пшеницы . *Почва растений* 406 , 145–156. 10.1007 / s11104-016-2871-8 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
13. Чан К.Ю., Дэйви Б.Г., Геринг НР (1979). Адсорбция Mg и кальция почвой с переменным зарядом . *Почвоведение. Soc. Am. J.* 43 , 301–304. 10.2136 / sssaj1979.03615995004300020012x [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
14. Кларка РБ, Зетоя СК, Ритчя К.Д., BaligarMaize VC (1997). Рост кукурузы и накопление минералов на кислой почве, дополненной побочными продуктами десульфуризации дымовых газов и магнием . *Commun. Почвоведение. План.* 28 (15-16), 1441–1459. 10.1080 / 00103629709369886 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
15. Фишер ES (1997). Кривые фотосинтетической освещенности *Phaseolus vulgaris* при умеренном или тяжелом дефиците магния . *Photosynthetica* 33 (3), 385–390. [[Google Scholar](#)]
16. Фокс Р. Х., Пикелек В. П. (1984). Уровень магния в почве, урожай кукурузы (*Zeamays L.*) и потребление магния . *Commun. Почвоведение. План.* 15 , 109–123. 10.1080 / 00103628409367459 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
17. Фой CD, Барбер С.А. (1958). Дефицит магния и урожай кукурузы на двух кислых почвах Индианы . *Почвоведение. Soc. Am. J.* 22 (2), 145–148. 10.2136 / sssaj1958.03615995002200020014x [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
18. Госс MJ, Карвалью MJGPR (1992). Токсичность марганца: значение магния для чувствительности растений пшеницы . *Почва растений* 139 , 91–98. 10.1007 / bf00012846 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
19. Графф С., Стеффенс Д., Шуберт С. (2001). Использование измерений отражательной способности для раннего обнаружения недостатков N, P, Mg и Fe в *Zea Mays L.* . *J. Plant Nutr. Почвоведение.* 164 , 445–450. 10.1002 / 1522-2624 (200108) 164: 4 <445 :: AID-JPLN445> 3.0.CO; 2-1 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
20. Гранзее А., Фюрс Х. (2013). Подвижность магния в почве как проблема для анализа почвы и растений, внесения удобрений и корней в неблагоприятных условиях роста . *Почва растений* 368 , 5–21. 10.1007 / s11104-012-1567-y [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

21. Гжебисе В. (2011). Магний - еда и здоровье человека . J. Elementol. 16 , 299–323. 10.5601 / jelem.2011.16.2.13 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
22. Гжебиш В. (2013). Реакция сельскохозяйственных культур на внесение магниевых удобрений в зависимости от поступления азота . Почва растений 368 , 23–39. [[Google Scholar](#)]
23. Го Дж., Фогт Р.Д., Чжан Х., Чжан Ю., Сейп Х.М., Тан Х. (2004). Обмены Са – Н – Al и подвижность алюминия в двух кислых лесных почвах Китая: эксперимент в ванне . Environ. Геол. 45 , 1148–1153. 10.1007 / s00254-004-0979-2 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
24. Хэрдтер Р., Рекс М., Орловиус К. (2004). Влияние различных источников магния удобрений на доступность магния в почвах . Nutr. Cycl. Agroeco. 70 , 249–259. 10.1007 / s10705-005-0408-2 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
25. Хайлз К.Дж., Эйткен Р.Л., Мензис Н.В. (1997). Магний в тропических и субтропических почвах северо-востока Австралии. II. Реакция выращивания кукурузы в теплице на внесение магния . Aust. J. Soil Res. 35 , 629–641. 10.1071 / s96082 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
26. Хариади Ю., Шабала С. (2004). Скрининг бобов (*Vicia faba*) на дефицит магния. I. Характеристики роста, симптомы дефицита азота и состояние питания растений . Функцион. Plant Biol. 31 , 529–537. 10.1071 / fp03201 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
27. Хеджес Л.В., Гуревич Дж., Кертис П.С. (1999). Мета-анализ соотношений ответов в экспериментальной экологии . Экология 80 , 1150–1156. 10.2307 / 177062 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
28. Германс К., Джонсон Г. Н., Штрассер Р. Дж., Вербрюгген Н. (2004). Физиологическая характеристика дефицита магния в сахарной свекле: акклиматизация к низкому содержанию магния по-разному влияет на фотосистемы I и II . Planta 220 , 344–355. 10.1007 / s00425-004-1340-4 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
29. Херманс К., Бургис Ф., Фаучер М., Штрассес Р.Дж., Дельрот С., Вербрюгген Н. (2005). Дефицит магния в сахарной свекле влияет на распределение сахара и содержание флоэмы в молодых зрелых листьях . Planta 220 , 541–549. 10.2307 / 23388758 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
30. Ходж А. (2004). Пластичное растение: реакция корней на разнородные источники питательных веществ . Новый Фитол. 162 , 9–24. 10.1111 / j.1469-8137.2004.01015.x [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
31. Йерун Х.Ф., де Баай, Йост Г.Дж., Хендероп, Рене Дж. М., Биндельс (2015). Магний в человеке: последствия для здоровья и болезней . Physiol. Ред. 95 , 1–46. 10.1152 / Physrev.00012.2014 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
32. Кашинах Б.Л., Ганеша А.Н., Мурти, Сентивел Т., Джеймс П.Г., Садашива А.Т. (2013). Влияние внесенного магния на урожайность и качество томатов в Альфисолях штата Карнатака . J. Hortic. Sci. 8 (1), 55–59. 10.4239 / wjd.v4.i4.157 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
33. Кох К.Е. (1996). Углеводно-модулированная экспрессия генов в растениях . Завод Мол. Biol. 47 , 509–540. 10.1146 / annurev.arplant.47.1.509 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
34. Лэйнг В., Грир Д., Сан О., Свекла П., Лоу А., Пейн Т. (2000). Физиологические последствия дефицита Mg у *Pinus radiata* : рост и фотосинтез . Новый Фитол. 146 , 47–57. 10.1046 / j.1469-8137.2000.00616.x [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

35. Лемуан Р., Сильвен Ла К., Россица А., Фабьен Д., Тьерри А., Натали П. (2013). Транспорт сахара от источника к поглотителю и регулирование факторами окружающей среды . Фронт. Plant Sci. , 4 , 272–292. 10.3389 / fpls.2013.00272 [[Бесплатная статья PMC](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
36. Логанатан П., Хэнли Дж. А., Карри Л. Д. (2005). Влияние серпантинной породы и ее подкисленных продуктов в качестве магниевых удобрений для пастбищ по сравнению с оксидом магния и английской солью на пемзовой почве. II. Растворение и расчетные потери магния при выщелачивании . New Zeal. J. Agr. Местожителство 48 , 461–471. 10.1080 / 00288233.2005.9513680 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
37. Махди Б., Яссер Э., Абольфазл Т., Ахмад А. (2012). Эффективность различных железосодержащих, цинковых и магниевых удобрений на урожайность и компоненты урожая ячменя . Afr. J. Microbiol. Местожителство 6 (28), 5754–5756. 10.5897 / AJMR11.1638 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
38. Маршнер П. (2012). Минеральное питание высших растений Маршнера. 3-е изд. (Нидерланды: Амстердам;) [[Google Scholar](#)]
39. Mayland HF, Wilkinson SR (1989). Факторы почвы, влияющие на доступность магния в системах растение-животное: обзор . J. Anim. Sci. 67 , 3437–3444. 10.2527 / jas1989.67123437x [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
40. Метсон А.Дж. (1974). Магний в почвах Новой Зеландии. I. Некоторые факторы, определяющие доступность почвенного магния: обзор . Новый ZJ Exp. Agric. 2 , 277–319. 10.1080 / 03015521.1974.10427689 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
41. Миккельсен Р. (2010). Почва и удобрение магний . Лучшие культуры 94 , 26–28. www.researchgate.net/publication/308795926 . [[Google Scholar](#)]
42. Мохебби С., Малер Р.Л. (1989). Влияние рН почвы на пшеницу и чечевицу, выращенную на сельскохозяйственных подкисленных почвах северного Айдахо в тепличных условиях . Commun. Почвоведение. План. 20 , 359–381. 10.1080 / 00103628909368088 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
43. Малдер Э.Г. (1956). Азотно-магниевые отношения у сельскохозяйственных культур . Почва растений 7 , 341–376. 10.1007 / BF01394322 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
44. Нежа Ф., Амин Э., Валид З., Абдерразак С., Чедли А., Мокдед Р. (2016). Влияние дефицита магния на фотосинтез и распределение углеводов . Acta Physiol. Plant 38 , 145. 10.1007 / s11738-016-2165-z [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
45. Недим О., Дамл Б.О. (2015). Влияние удобрения Mg на взаимодействие некоторых питательных веществ с растениями и качество орехов турецкого фундука (*Corylus avellana* L.) . Sci. Местожителство Очерки 10 (14), 465–470. 10.5897 / SRE2014.5811 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
46. Нибау К., Гиббс Д. Д., Коутс Дж. К. (2008). Разветвляясь в новых направлениях: контроль корневой архитектуры путем формирования боковых корней . Новый Фитол. 179 , 595–614. 10.1111 / j.1469-8137.2008.02472.x [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
47. Орловиус К., МакХоул Дж. (2015). Влияние двух магниевых удобрений на концентрацию магния в листьях, урожайность и качество картофеля и сахарной свеклы . J. Plant Nutr. 38 (13), 2044–2054. 10.1080 / 01904167.2014.958167 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

48. Папенфус К. Х., Шлихтинг Э. (1979). Bestimmen de faktoren des Mg-haushaltes von böden in der bundesrepublik deutschland . Magneiums-Б. 1 , 12–14. [[Google Scholar](#)]
49. Пол Ф., Траоре Б. (1993). Истощение питательных веществ почвы в результате сельскохозяйственного производства в Южном Мали . Ферг. Местожительство 36 , 79–90. 10.1007 / BF00749951 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
50. Ридольфи М., Гаррек Дж. П. (2000). Последствия избытка алюминия и недостатка кальция и магния для функционирования устьиц и чистого поглощения углерода листьями бука . Ann.For. Sci. 57 (3), 209–218. 10.1051 / forest: 2000112 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
51. Роберт КR, Хелен EG (2004). Дефицит магния и остеопороз: наблюдения за животными и людьми . J. Nutr. Biochem. 15 (12), 710–716. 10.1016 / j.jnutbio.2004.08.001 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
52. Ремхельд В., Киркби Е.А. (2007). Магний участвует в питании сельскохозяйственных культур и урожайности . Proc. Conf. Кембридж , 151–171.
53. Шахчабель П. (1954). Das pflanzenverfügbare magnesium des bodens und seine bestimmung . J. Plant Nutr. Почвоведение. 67 , 9–23. 10.1002 / jpln.19540670103 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
54. Scheffer F., Schachtschabel P. (2002). Lehrbuch der Bodenkunde (Гейдельберг: Spektrum Akademischer Verlag;). [[Google Scholar](#)]
55. Шуберт С., Шуберт Э., Менгель К. (1990). Влияние низкого рН корневой среды на высвобождение протонов, рост и потребление питательных веществ полевой фасолью (*Vicia faba*) . Почва растений 124 , 239–244. 10.1007 / BF00009266 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
56. Сеггвист Б., Юнгк А. (1988). Einfluss der kaliumdynamik im wurzelnahen boden auf die Mgaufnahme von pflanzen . J. Plant Nutr. Почвоведение. 151 , 91–96. 10.1002 / jpln.19881510205 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
57. Сенбайрам М., Бол Р., Диксон Л., Фишерд А., Стивенс К., Куинтон Дж. И др. (2015). Возможное использование оксидов редкоземельных элементов в качестве индикаторов органического вещества на пастбищах . J. Plant Nutr. Почвоведение. 178 , 288–296. 10.1002 / jpln.201400465 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
58. Штрель О., Duynisveld WHM (1989). Обеспечение азотом зерновых культур и сахарной свеклы массовым потоком и диффузией на илистых суглинках . J. Plant Nutr. Почвоведение. 152 (2), 135–141. 10.1002 / jpln.19891520202 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
59. Штурм А., Тан GQ (1999). Расщепляющие сахарозу ферменты растений имеют решающее значение для развития, роста и распределения углерода . Trends Plant Sci. 4 , 401–407. 10.1016 / s1360-1385 (99) 01470-3 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
60. Сан О.Дж., Пейн Т.В. (1999). Питание магнием и фотосинтез у *Pinus radiata* : клональная изменчивость и влияние калия . Tree Physiol. 19 (8), 535–540. 10.1093 / treephys / 19.8.535 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
61. Верена С., Навин Р., Джонатан А.Ф. (2012). Сравнение урожайности органического и традиционного сельского хозяйства . Nature 485 , 229–232. 10.1038 / nature11069 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
62. Ван Дж., Чжан Х., Сюй Ф., Сюй Ф., Чжан К., Чжан Ю. (2014). Антагонизм алюминия против оксидативного стресса, вызванного фторидом, и

- сверхэкспрессии c-Fos в семенниках крыс . *Toxicol. Mex. Метод.* 26 (2), 132–138. 10.3109 / 15376516.2013.869779 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
63. Велхэм Т., Пайк Дж., Хорст И., Флеметакис Э., Катинакис П., Канеко Т. и др. (2009). Цитозольная инвертаза необходима для нормального роста и развития клеток модельного бобового *Lotus japonicus* . *J. Exp. Bot.* 60 (12), 3353–3365. 10.1093 / jxb / erp169 [[Бесплатная статья PMC](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
64. Белый Р.И., Бродли М.Р. (2009). Биообогащение сельскохозяйственных культур семью минеральными элементами, которых часто не хватает в рационе человека: железом, цинком, медью, кальцием, магнием, селеном и йодом . *Новый Фитол.* 182 , 49–84. 10.1111 / j.1469-8137.2008.02738.x [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
65. Уилкинсон С.Р., Уэлч Р.М., Мэйланд Х.Ф., Грунес Д.Л. (1990). Магний в растениях: поглощение, распределение, функция и использование человеком и животными . В: Зигель Хельмут (ред.) Ионы металлов в биологических системах. (Нью-Йорк и Базель, Швейцария: Marcel Dekker, Inc.). 33-56. <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/776> [[Google Scholar](#)]
66. Винтер Х., Хубер С.С. (2000). Регуляция метаболизма сахарозы у высших растений: локализация и регуляция активности ключевых ферментов . *Крит. Rev. Biochem. Mol.* 35 (4), 253–289. 10.1080 / 10409230008984165 [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
67. Zhang FS, Wang JQ, Zhang WF, Cui ZL, Ma WQ, Chen XP и др. (2008). Эффективность использования питательных веществ основными зерновыми культурами в Китае и меры по улучшению . *Acta Pedologica Scientia* 5 (45), 915–924. 10.1163 / 156939308783122788 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
68. Чжу М., Цзян Х., Цзи Г. (2004). Экспериментальное исследование выделения алюминия из гапликакризолей на юго-востоке Китая . *Appl. Геохимия.* 19 , 981–990. 10.1016 / j.apgeochem.2003.12.004 [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]