

**АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ,
ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ**
**AGROCHEMISTRY, AGRONOMIC SOIL SCIENCE,
PLANT PROTECTION AND QUARANTINE**

Научная статья

УДК 631.4:631.81:633.18(510)

EDN: MPXOUD

<https://doi.org/10.24412/2949-2211-2026-4-2-44-51>

ПОТЕНЦИАЛ НИТРИФИКАЦИИ И СВЯЗЫВАНИЯ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ РАЗНОГО СРОКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПОСЛЕ ПЕРЕХОДА ОТ БОГАРНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ К ЗАЛИВНЫМ РИСОВЫМ ПОЛЯМ

Чжан Чжо¹, Цзян Юй¹, Ми Ган¹, Ли Синьюй¹, Ли Сяофэн²

¹Хэйхэский филиал Академии сельскохозяйственных наук провинции Хэйлунцзян, г. Хэйхэ, Китай

²Дальневосточный государственный аграрный университет, г. Благовещенск, Россия

Аннотация. Нитрификация является одним из ключевых процессов трансформации азота в почве и оказывает влияние на эффективность использования азотных удобрений, миграцию нитратного азота и формирование потоков парниковых газов. При преобразовании засушливых земель в заливные рисовые поля изменяются кислородный режим, влажность, содержание минеральных форм азота и активность нитрифицирующих микроорганизмов, однако вклад аммонийоокисляющих микроорганизмов в нитрификацию и образование органического углерода почвы остается недостаточно изученным. Цель исследования – оценить потенциал нитрификации и связывания углерода в почвах разного срока использования после перехода от богарного земледелия к заливным рисовым полям, а также определить роль аммонийоокисляющих микроорганизмов в данных процессах. Задачи исследования включали отбор почв с различной продолжительностью периода после преобразования, проведение лабораторного микробиологического эксперимента с использованием стабильного изотопа ¹³C, определение содержания аммонийного и нитратного азота, оценку численности генов amoA у аммонийоокисляющих архей и бактерий методом количественной ПЦР и расчет чистого образования ¹³C-SOC. Исследование проведено на образцах почв, отобранных в 2022 г. в районе рисовых полей Цзяньсаньцзян провинции Хэйлунцзян. Установлено, что после 28 суток микробиологического культивирования содержание аммонийного азота во всех вариантах снизилось, а содержание нитратного азота увеличилось. Наиболее выраженное снижение аммонийного азота отмечено в варианте 8PS: с 211 до 5,16 мг N кг⁻¹, а наибольшее накопление нитратного азота – в вариантах 30PS и 8PS: до 83,6 и 78,2 мг N кг⁻¹ соответственно. Численность AOB в варианте 8PS увеличилась со 190 до 2,51 × 10⁴ копий гена amoA г⁻¹ сухой массы почвы, что свидетельствует об их участии в усилении нитрификационной активности. Чистое образование ¹³C-SOC в вариантах US, 3PS, 8PS, 15PS, 20PS и 30PS составило 34,4; 31,8; 32,0; 33,9; 27,0 и 34,1 мкг ¹³C г⁻¹ почвы соответственно. Полученные данные подтверждают, что нитрифицирующие микроорганизмы участвуют не только в трансформации азота, но и в фиксации углерода в составе органического вещества почвы.

Ключевые слова: нитрификация, рисовые поля, богарные земли, аммонийоокисляющие микроорганизмы, отслеживание ¹³C, аммонийный азот, нитратный азот, углерод почвы.

Для цитирования: Чжан Чжо, Цзян Юй, Ми Ган, Ли Синьюй, Ли Сяофэн. Потенциал нитрификации и связывания углерода в почвах разного срока использования после перехода от богарного земледелия к заливным рисовым полям // Агронаука. 2026. Том 4. № 2. С. 44–51. EDN: © Чжан Чжо, Цзян Юй, Ми Ган, Ли Синьюй, Ли Сяофэн, 2026

Original article**NITRIFICATION AND CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL IN SOILS AT DIFFERENT PERIODS AFTER CONVERSION OF DRYLANDS INTO FLOODED RICE FIELDS****Zhang Zhuo¹, Jiang Yu¹, Mi Gang¹, Li Xinyu¹, Li Xiaofeng²**¹ Heihe Branch of the Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Heihe, China² Far Eastern State Agrarian University, Blagoveshchensk, Russia

Abstract. Nitrification is one of the key processes of nitrogen transformation in soil and affects the efficiency of nitrogen fertilizer use, the migration of nitrate nitrogen, and the formation of greenhouse gas fluxes. When arid lands are converted into flooded rice paddies, the oxygen regime, moisture content, concentrations of mineral nitrogen forms, and activity of nitrifying microorganisms change. However, the contribution of ammonia-oxidizing microorganisms to nitrification and soil organic carbon formation remains insufficiently studied. The aim of this study was to assess the potential for nitrification and carbon sequestration in soils with different durations of use after conversion from rainfed agriculture to flooded rice paddies, as well as to determine the role of ammonia-oxidizing microorganisms in these processes. The objectives of the study included collecting soils with different periods since conversion, conducting a laboratory microcosm experiment using the stable isotope ¹³C, determining the contents of ammonium and nitrate nitrogen, assessing the abundance of amoA genes in ammonia-oxidizing archaea and bacteria using quantitative PCR, and calculating net ¹³C-SOC formation. The study was conducted on soil samples collected in 2022 in the Jiansanjiang rice paddy area of Heilongjiang Province. After 28 days of microcosm incubation, ammonium nitrogen content decreased in all treatments, while nitrate nitrogen content increased. The most pronounced decrease in ammonium nitrogen was observed in the 8PS treatment, from 211 to 5.16 mg N kg⁻¹, while the greatest accumulation of nitrate nitrogen was recorded in the 30PS and 8PS treatments, reaching 83.6 and 78.2 mg N kg⁻¹, respectively. The abundance of AOB in the 8PS treatment increased from 190 to 2.51 × 10⁴ copies of the amoA gene g⁻¹ dry soil, indicating their involvement in enhanced nitrification activity. Net ¹³C-SOC formation in the US, 3PS, 8PS, 15PS, 20PS, and 30PS treatments was 34.4, 31.8, 32.0, 33.9, 27.0, and 34.1 μg ¹³C g⁻¹ soil, respectively. The obtained data confirm that nitrifying microorganisms participate not only in nitrogen transformation but also in carbon fixation within soil organic matter.

Keywords: nitrification, rice paddies, rainfed lands, ammonia-oxidizing microorganisms, ¹³C tracing, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, soil carbon.

For citation: Zhang Zhuo, Jiang Yu, Mi Gang, Li Xinyu, Li Xiaofeng. Nitrification and carbon sequestration potential in soils at different periods after conversion of drylands into flooded rice fields [Potentsial nitrifikatsii i svyazyvaniya ugleroda v pochvakh raznogo sroka posle preobrazovaniya zasushlivykh zemel v zalivnye risovye polya]. *Agronauka = Agrosience*. 2026;4:2:44-51 (in Russ.). EDN: MPXOUD. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2026-4-2-44-51>

Введение

Нитрификация является ключевым этапом круговорота азота в почве, в ходе которого восстановленные формы азота последовательно трансформируются в нитритный и нитратный азот. В агроэко-

мах этот процесс определяет доступность минерального азота для растений, влияет на потери азотных удобрений, вымывание нитратов и формирование потоков парниковых газов [1, 2].

К основным группам нитрифицирующих микроорганизмов относятся аммоний-окисляющие археи (АОА), аммонийокисляющие бактерии (АОБ), бактерии полного окисления аммония *Comattox* и нитрито-кисляющие бактерии (NOB). Их соотношение и функциональная активность зависят от pH, содержания кислорода, доступности субстрата, влажности почвы и режима землепользования [3–6].

Переход от богарного земледелия к заливному рисовым полям существенно изменяет почвенную среду. При длительном затоплении снижается содержание растворенного кислорода, изменяются окислительно-восстановительные условия, режим минерального питания и структура микробного сообщества. Эти изменения могут определять смену доминирующих групп нитрифицирующих микроорганизмов и влиять на интенсивность нитрификации [7, 8].

Для черноземных почв Северо-Восточного Китая, вовлеченных в рисосеяние, особенно актуальна оценка динамики аммонийного и нитратного азота, численности аммонийокисляющих микроорганизмов и накопления органического углерода после переход от богарного земледелия к культивированию риса на полях. Установление этих закономерностей необходимо для уточнения роли нитрификации в трансформации азота и связывания углерода в агроэкосистемах заливного рисового посева.

Цель исследования – оценить потенциал нитрификации и связывания углерода в почвах разного срока использования после перехода от богарного земледелия к возделыванию риса на заливных полях.

Задачи исследования: определить изменения содержания аммонийного и нитратного азота в почвах до и после культивирования; оценить численность аммонийокисляющих архей и бактерий по гену *amoA*; рассчитать чистое образование ^{13}C -SOC; выявить связь между активностью нитрификации, численностью аммонийокисляющих микроорганизмов и накоплением органического углерода почвы.

Материалы и методы

Почвенные образцы

Исследование выполнено в 2022–2023 гг. на базе Хэйхэского филиала Академии сельскохозяйственных наук провинции Хэйлунцзян.

Почвенные образцы были отобраны в конце октября 2022 г. после уборки риса в районе рисоводства Цзяньсаньцзян (131°14'...133°08' в.д., 45°01'...45°55' с.ш.), расположенном в городском округе Цзиси провинции Хэйлунцзян (КНР), в пределах второй агроэкологической зоны равнины Саньцзян.

Район исследования характеризуется умеренно-континентальным муссонным климатом. Среднегодовая температура воздуха составляет 3,5...3,8 °С, сумма активных температур – около 2500 °С, продолжительность солнечного сияния – 2400...2500 ч в год, годовое количество осадков – 510...600 мм, продолжительность безморозного периода – 110...135 дней. Почвы исследуемой территории относятся к черноземному типу.

Для проведения эксперимента были отобраны образцы почвы с длительно используемой богарной пашни под сою (US), длительно заболоченного участка (WS), а также с участков, неорошаемых земель перешедших в рисовые поля 3, 8, 15, 20 и 30 лет назад (3PS, 8PS, 15PS, 20PS и 30PS соответственно). Отбор почвы проводили из слоя 0...20 сантиметров.

Свежие почвенные образцы разделяли на три части. Первую часть (20 г) хранили при температуре –80 °С для последующего микробиологического анализа. Вторую часть (500 г) очищали от растительных остатков и каменистых включений, просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм и хранили при температуре 4 °С до проведения лабораторного культивирования. Третью часть высушивали на воздухе, просеивали и использовали для определения агрохимических свойств почвы.

Характеристика исследуемых вариантов представлена в таблице 1.

Микрокосмовый эксперимент с исполь-

Таблица 1 – Варианты почвенных образцов, использованных в исследовании
Table 1 – Characteristics of soil samples used in the study

Обозначение	Место отбора образца
US - контроль	Богарная почва длительно используемая под сою
WS	Почва длительно заболоченного участка
3PS	Богарная почва через 3 года перешедшая в рисовое поле
8PS	Богарная почва через 8 лет перешедшая в рисовое поле
15PS	Богарная почва через 15 лет перешедшая в рисовое поле
20PS	Богарная почва через 20 лет перешедшая в рисовое поле
30PS	Богарная почва через 30 лет перешедшая в рисовое поле

зованием стабильного изотопа ^{13}C .

В микрокосмовом эксперименте использовали свежие почвенные образцы массой, эквивалентной 6 г абсолютно сухой почвы. Образцы помещали в стерильные стеклянные флаконы о бъемом 120 миллилитров. Влажность почвы доводили до 40 % полной влагоемкости (WHC), после чего флаконы герметизировали бутилкаучуковыми пробками и предварительно инкубировали в темноте при температуре 28 °C в течение 10 суток.

Основной эксперимент включал два варианта газовой среды: 5 % $^{13}\text{CO}_2$ и 5 % $^{12}\text{CO}_2$. Вариант с $^{12}\text{CO}_2$ использовали в качестве изотопного контроля. Каждый вариант закладывали в трехкратной повторности. Один раз в неделю в почву вносили мочевины из расчета 50 мг N кг⁻¹ почвы; суммарная доза азота за весь период культивирования составляла 200 мг N кг⁻¹ почвы.

Перед очередным внесением источников азота и углерода флаконы открывали и продували газовой смесью, содержащей 20 % O₂ и 80 % N₂, в течение 2 мин для восстановления аэробных условий. В течение всего периода инкубации влажность поддерживали на уровне 60 % полной влагоемкости (WHC). Культивирование проводили в темноте при температуре 28 °C в течение 28 суток.

После завершения инкубации из каждого флакона отбирали по 1 г почвы для выделения ДНК и хранили образцы при температуре –20 градусов Цельсия. Еще 1 г почвы лиофилизировали и использовали

для определения содержания органического углерода и атомной доли изотопа углерода ^{13}C в образце. Из оставшейся части почвы минеральный азот экстрагировали 2 моль л⁻¹ раствором KCl при соотношении почвы и экстрагента 1:5.

Определение ^{13}C -SOC и количественная ПЦР

Для оценки включения меченого углерода в органическое вещество почвы лиофилизированные образцы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 миллиметра. Атомную долю ^{13}C определяли методом масс-спектрометрии изотопных соотношений, а содержание органического углерода почвы (SOC) – с использованием элементного анализатора. Чистое образование ^{13}C -SOC рассчитывали по формуле [9, 10]:

$$^{13}\text{C}\text{-SOC} = \text{SOC} \times (^{13}\text{C}_{\text{атом}}, \% - 1,08) / 100,$$

где ^{13}C -SOC – количество вновь образованного органического углерода почвы, меченого стабильным изотопом ^{13}C ; SOC – содержание органического углерода почвы; ^{13}C атом, % – атомная доля ^{13}C в исследуемом образце; 1,08 % – естественная атомная доля ^{13}C .

Общую ДНК выделяли из 0,5 г свежей почвы с использованием набора FastDNA® Spin Kit for Soil в соответствии с инструкцией производителя. Полученные препараты ДНК хранили при температуре –80 градусов Цельсия.

Количественную полимеразную цепную реакцию в реальном времени (qPCR) проводили на амплификаторе ABI QuantStudio Q5 с использованием реакционной смеси

2×T5 Fast qPCR Mix (SYBR Green I). Общий объем реакционной смеси составлял 20 мкл и включал 10 мкл смеси 2×T5 Fast qPCR Mix, по 1 мкл прямого и обратного праймеров, 1 мкл ДНК-матрицы и 7 мкл стерильной де-ионизированной воды.

Стандартные кривые строили на основе последовательных десятикратных разведений плазмидных стандартов в диапазоне 10^6 – 10^8 копий гена.

Статистическая обработка

Статистическую обработку данных проводили с использованием программ IBM SPSS Statistics 22 и Origin 2021. Результаты представлены в виде среднего значения ± стандартное отклонение ($n = 3$). Для оценки достоверности различий использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Множественное сравнение сред-

них проводили по критерию Дункана при уровне значимости $P < 0,05$. Различия считали статистически значимыми при $F_f > F_{05}$.

Результаты и обсуждение

Изменение содержания минеральных форм азота

После 28 суток культивирования при еженедельном внесении мочевины и CO_2 во всех вариантах отмечено снижение содержания аммонийного азота и увеличение содержания нитратного азота (рисунок 1). Наиболее выраженное снижение аммонийного азота установлено в варианте 8PS: с 211 до 5,16 мг N kg^{-1} , что свидетельствует о снижении содержания аммонийного азота в 40,8 раза. В вариантах WS, US, 3PS, 15PS, 20PS и 30PS содержание аммонийного азота снизилось соответственно в 5,02; 3,85; 1,47; 1,29; 1,35 и 1,36 раза.

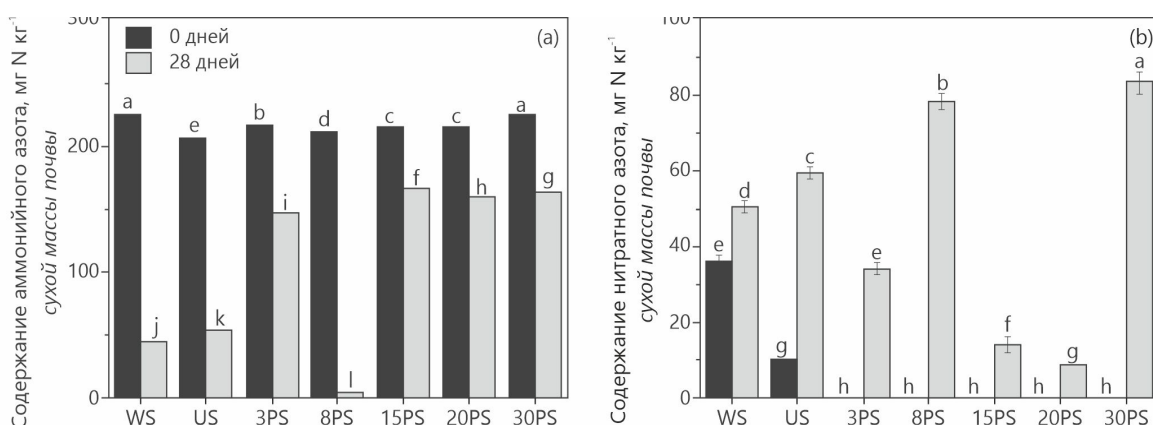


Рисунок 1 – Содержание минеральных форм азота в почве до и после культивирования
Figure 1 – Contents of mineral nitrogen forms in soil before and after incubation

Примечание: столбики отражают средние значения, вертикальные линии – стандартное отклонение ($n = 3$); различные буквы над столбцами указывают на статистически значимые различия между вариантами при $P < 0,05$ по критерию Дункана ($F_f > F_{05}$).

Содержание аммонийного азота, мг N kg^{-1}

Наибольшее накопление нитратного азота зафиксировано в вариантах 30PS и 8PS: его содержание увеличилось с 0,191 и 0,097 мг N kg^{-1} до 83,6 и 78,2 мг N kg^{-1} соответственно. Таким образом, концентрация нитратного азота возросла в 437 и 803 раза, что свидетельствует об интенсивном протекании процессов нитрификации.

Численность аммонийоокисляющих микроорганизмов

Численность генов amoA у АОА и АОВ определяли методом количественной ПЦР в реальном времени (рисунок 2). После культивирования численность АОА в почве US достоверно снизилась, тогда как в остальных вариантах изменения численности АОА

были менее выраженными.

Наиболее существенные изменения выявлены для АОВ в варианте 8PS: численность копий гена *amoA* увеличилась с 190 до $2,51 \times 10^4$ копий гена *amoA* г⁻¹ сухой массы почвы, то есть в 132 раза. В вариантах US, 3PS, 15PS, 20PS и 30PS данный показатель после культивирования снизился с 571, 2766, 2571, 1015 и 2731 до 478, 2090, 1187, 824 и 2453 копий гена *amoA* г⁻¹ сухой массы

почвы соответственно.

Полученные данные указывают на участие АОВ в усилении нитрификации в варианте 8PS. В вариантах, где увеличение численности АОА и АОВ не зафиксировано, нитрификационная активность, вероятно, связана с участием других групп нитрифицирующих микроорганизмов, включая *Comamtox* и гетеротрофные нитрифицирующие бактерии.

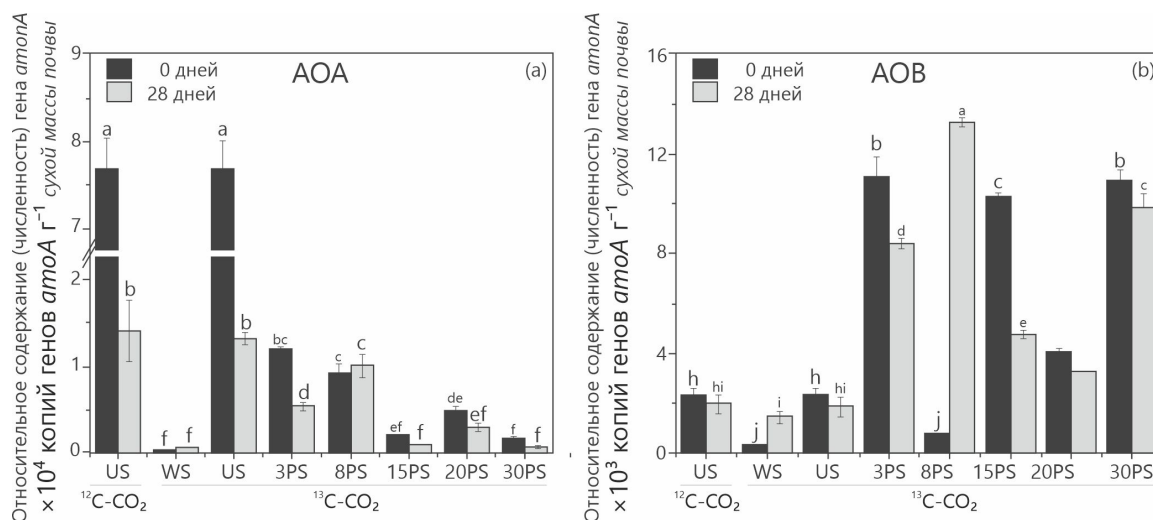


Рисунок 2 – Численность аммонийокисляющих архей (АОА) и бактерий (АОВ) в почве до и после культивирования

Figure 2 – Abundance of ammonia-oxidizing archaea (AOA) and bacteria (AOB) in soil before and after incubation

Примечание: столбики отражают средние значения, вертикальные линии – стандартное отклонение ($n = 3$). Различные буквы над столбцами указывают на статистически значимые различия между вариантами при $P < 0,05$ по критерию Дункана ($F_{\text{ф}} > F_{05}$)

Образование ¹³C-SOC и связывание углерода

После культивирования в атмосфере ¹³CO₂ атомная доля ¹³C в составе органического вещества почвы во всех вариантах превышала естественный фон ¹³C (1,08 %), что свидетельствует о включении меченого углерода в состав органического вещества почвы. Значения атомной доли ¹³C в составе органического вещества почвы составили 1,10 % для WS, 1,19 % для US, 1,14 % для 3PS, 1,15 % для 8PS, 1,13 % для 15PS, 1,18 % для 20PS и 1,17 % для 30PS (рисунок 3).

Содержание органического углерода почвы варьировало от 12,9 мг г⁻¹ в варианте 20PS до 21,6 мг г⁻¹ в варианте 15PS. Чистое образование ¹³C-SOC в вариантах US, 3PS,

8PS, 15PS, 20PS и 30PS составило соответственно 34,4; 31,8; 32,0; 33,9; 27,0 и 34,1 мкг ¹³C г⁻¹ почвы. Наименьшее значение данного показателя зафиксировано в варианте 20PS, тогда как наиболее высокие значения отмечены в вариантах US, 15PS и 30PS.

Полученные результаты свидетельствуют о способности нитрифицирующих микроорганизмов включать углерод в состав органического вещества почвы в процессе метаболической активности. Таким образом, при оценке экологических последствий нитрификации необходимо учитывать не только образование нитратного азота и потенциальные потери азота, но и вклад нитрифицирующих микроорганизмов в процессы связывания углерода в почве.

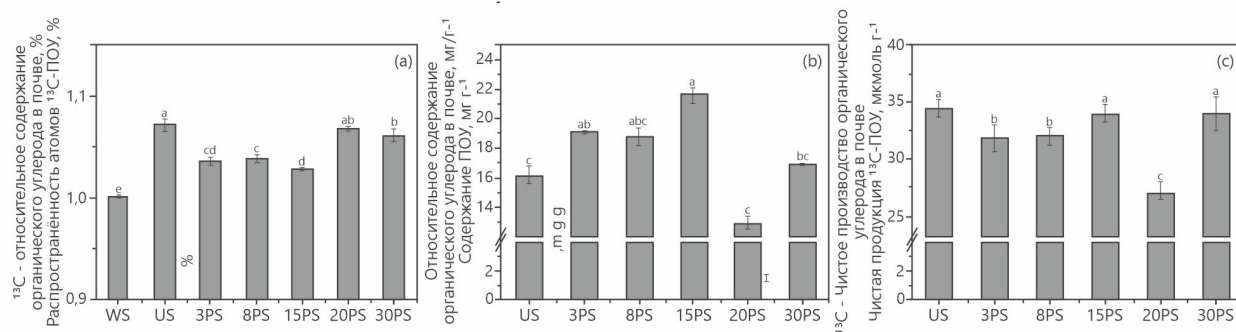


Рисунок 3 – Чистое образование ^{13}C -SOC в почвах различного срока после преобразования засушливых земель в рисовые поля

Figure 3 – Net ^{13}C -SOC formation in soils at different periods after conversion of drylands into rice fields

Примечание: столбики отражают средние значения, вертикальные линии – стандартное отклонение ($n = 3$). Различные буквы над столбцами указывают на статистически значимые различия между вариантами при $P < 0,05$ по критерию Дункана ($F_{\text{ф}} > F_{05}$)

Обсуждение полученных результатов

Преобразование богарных земель в заливные рисовые поля приводит к существенным изменениям почвенной среды, включая трансформацию водного режима, содержания кислорода, доступности минеральных форм азота и условий функционирования микробных сообществ. Указанные изменения оказывают значительное влияние на структуру и активность нитрифицирующих микроорганизмов, что подтверждается различиями между вариантами, различающимися по продолжительности использования под рисовые поля.

Наиболее выраженная реакция аммонийнокисляющих бактерий (АОВ) в варианте 8PS свидетельствует о том, что на данном этапе после преобразования складываются наиболее благоприятные условия для их развития и участия в процессах нитрификации. В других вариантах высокая нитрификационная активность при отсутствии увеличения численности АOA и АОВ позволяет предположить участие других функциональных групп нитрифицирующих микроорганизмов, включая бактерии полного окисления аммония (*Comattox*) и гетеротрофные нитрифицирующие бактерии.

Увеличение содержания ^{13}C -SOC после культивирования в атмосфере $^{13}\text{CO}_2$ подтверждает участие микробных процессов в формировании органического вещества почвы. Накопление меченого углерода сви-

детельствует о способности нитрифицирующих микроорганизмов вовлекать углерод в почвенное органическое вещество и позволяет рассматривать их не только как участников трансформации азота, но и как один из факторов, влияющих на процессы связывания и стабилизации углерода в почве.

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о тесной взаимосвязи циклов азота и углерода в почвенных экосистемах и подчеркивают необходимость комплексной оценки экологических последствий перевода неорошаемых земель в заливные рисовые поля.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что переход от богарного земледелия к возделыванию на заливных полях риса сопровождается существенными изменениями процессов нитрификации и углеродного цикла в почве. После 28 суток микроросового культивирования во всех исследуемых вариантах отмечено снижение содержания аммонийного азота и увеличение содержания нитратного азота, что свидетельствует об активном протекании нитрификационных процессов.

Наиболее интенсивная трансформация аммонийного азота выявлена в варианте 8PS, где его содержание снизилось с 211 до 5,16 мг N кг⁻¹, а содержание нитратного азота увеличилось до 78,2 мг N кг⁻¹. Одно-

временно численность копий гена *amoA* аммонийоокисляющих бактерий (АОБ) возросла с 190 до $2,51 \times 10^4$ копий гена *amoA* г⁻¹ сухой массы почвы, что подтверждает их значительную роль в усилении нитрификационной активности на данном этапе после преобразования земель.

Нитрифицирующие микроорганизмы участвуют не только в трансформации азота, но и в процессах связывания углерода. Чистое образование ¹³C-SOC в исследуемых почвах составило от 27,0 до 34,4 мкг

¹³C г⁻¹ почвы, что подтверждает включение меченого углерода в состав органического вещества почвы в результате микробиологических процессов.

Полученные результаты расширяют представления о взаимосвязи циклов азота и углерода в рисовых агроэкосистемах и могут быть использованы при разработке научно обоснованных подходов к управлению азотным режимом и углеродным балансом почвы перешедшей от богарного земледелия к заливному рисовым полям.

References

1. Zhu Zhaoliang. Study on nitrogen in soils of China. *Scientific Bulletin of Soil Science*. 2008;45(5):778–783. (In Chin.).
2. Gruber N, Galloway JN. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*. 2008;451(7176):293–296. 10.1038/nature06592
3. Jiang S, Hou S, Zhou S et al. How pH regulates key drivers of nitrification in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2015;81:9–16. (In Chin.).
4. Zhang K, Li Y, He Y et al. Elevated temperature enhances nitrification activity by stimulating AOB growth and activity in acidic paddy soil. *Plant and Soil*. 2019;445(1–2):71–83. (In Chin.).
5. Zhang C, Li Y, He Y et al. Nitrosospira cluster 3 ammonia oxidizers as the dominant group in nitrification of acidic terraced paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2019;131:229–237. (In Chin.).
6. Bao Jundang, Shi Mei, Zhang Meiting et al. Relationship between nitrification and soil characteristics in typical soils of China. *Scientia Agricultura Sinica*. 2011;44(7):1390–1398. (In Chin.).
7. Cai Zucoung, Zhao Wei. Effects of land use patterns on nitrification in humid subtropical soils. *Scientific Bulletin of Soil Science*. 2009;(5):45–51. (In Chin.).
8. Lu Rukun. *Methods of Soil Agrochemical Analysis*. Beijing : China Agricultural Science and Technology Press; 2000. (In Chin.).
9. Page AL, Miller RH, Keeney DR. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison : American Society of Agronomy; Soil Science Society of America; 1982.
10. Kirkham D, Bartholomew WV. Equations for following nutrient transformations in soil utilizing tracer data. *Soil Science Society of America Journal*. 1954;18(1):33–34.
11. Cheng Yi, Zhang Jinbo, Cai Zucoung. Research progress on microbial assimilation and abiotic fixation of inorganic nitrogen in soils. *Scientific Bulletin of Soil Science*. 2012;(5):1030–1036. (In Chin.).

Информация об авторах

Чжан Чжо – магистр, младший научный сотрудник;

Цзян Юй – магистр, старший научный сотрудник;

Ми Ган – магистр, научный сотрудник;

Ли Синьюй – магистр, научный сотрудник;

Ли Сяофэн – магистр.

Information about the authors

Zhang Zhuo – Master's degree holder, Junior Researcher;

Jiang Yu – Master's degree holder, Senior Researcher;

Mi Gang – Master's degree holder, Researcher;

Li Xinyu – Master's degree holder, Researcher;

Li Xiaofeng – Master's degree holder.

**Статья поступила в редакцию 20.05.2026;
одобрена после рецензирования 25.05.2026;
принята к публикации 09.06.2026**

**The article was submitted 20.05.2026;
approved after reviewing 25.05.2026;
accepted for publication 09.06.2026**