



Статья

Применение микробиологического осаждения карбонатов для Контроль распада гранитной остаточной почвы

Сяоянь Ло¹, Инци Фэн¹, Чунчжун Ли¹ и Вэйпин Лю^{2,*}¹ Школа гражданского строительства и архитектуры, Цзянсийский научно-технический педагогический университет, Наньчан 330013, Китай; luoxiaoyan2@126.com (XL); licunjun2001@126.com (CL)² Школа инфраструктурной инженерии, Наньчанский университет, Наньчан 330031, Китай; sdtcfyq@163.com

* Переписка: liuweiping@ncu.edu.cn

Аннотация: Гранитные остаточные почвы широко распространены на территории Юго-Восточного Китая. Такие почвы обладают такими механическими характеристиками, как рыхлые, обильные трещины и легкая дезинтеграция, что приводит к серьезной эрозии почвы в условиях дождя. Выпадение карбонатов, вызванное микробами (MICP), является экологически чистой альтернативой стабилизации почвы. В этом исследовании предлагается новая стратегия контроля дезинтеграции гранитного остаточного грунта с использованием технологии MICP. Влияние концентрации бактериального раствора, концентрации цементирующего раствора и цикла обработки исследуют с помощью теста на дезинтеграцию. Оптимальные параметры обработки гранитных остаточных грунтов по технологии MICP определяются на основе анализа процессов дезинтеграции и показателей остаточного качества дезинтеграции. Результаты показывают, что обработанные образцы имеют три типа распада: полный распад, неполный распад и нераспад. Выпавший в осадок карбонат кальция (CaCO_3) связывает частицы почвы и заполняет поры. Учитывая эффективность и стоимость, а также концентрацию бактериального раствора $\text{OD}_{600} = 0,75$, пять циклов обработки МИКП с концентрацией цементирующего раствора 1,2 моль/л являются оптимальными для борьбы с распадом остаточного грунта. Эффекты цементационного действия CaCO_3 проверены с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) с использованием энергодисперсионного рентгеновского спектрометра (EDX). Эти результаты позволяют предположить, что MICP является многообещающим кандидатом для контроля распада гранитной остаточной почвы.

Ключевые слова: гранитные остаточные грунты; осаждение карбонатов, вызванное микробами; распад; концентрация бактериального раствора; концентрация цементирующего раствора; цикл лечения



Цитирование: Луо, Х.; Фэн, Ю.; Ли, К.; Лю, В. Применение микробиологического осаждения карбонатов для борьбы с распадом гранитной остаточной почвы. Прил. наук. 2024, 14, 6343. <https://doi.org/10.3390/app14146343>.

Академический редактор: Сайед Минхадж Салим Казми

Поступила: 3 мая 2024 г.

Пересмотрено: 15 июня 2024 г.

Принято: 2 июля 2024 г.

Опубликовано: 20 июля 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Остаточная гранитная почва образуется в результате физического и химического выветривания материнской гранитной породы, которая широко распространена на юго-востоке Китая. Этот тип почвы характеризуется рыхлостью, обильными трещинами и легкой дезинтеграцией [1–3], что приводит к сильной эрозии почвы в условиях дождя [4–6]. В Бенганге насчитывается 239 125 участков площадью 1 220,05 км² [7,8] со средней скоростью эрозии 590 000 т/(км² · год) [9]. Бенганг имеет характеристики высокой интенсивности эрозии и обширной площади эрозии [10,11]. Округ Юду, один из округов с сильной эрозией почвы в провинции Цзянси, Китай, занимает 29,17% территории всего округа из-за Бэнганга.

Традиционные методы защиты склонов в районах Бенганга в основном основаны на растительных и инженерных мерах, которые имеют такие недостатки, как большой объем инженерных работ, неудобная конструкция, высокая стоимость и длительное время [12–14]. Поэтому очень важно найти новую стратегию защиты склонов, которая была бы энергосберегающей, экологически чистой и легко возводимой на гранитном остаточном грунте. Микробно-индуцированное осаждение карбонатов (MICP) является одной из новых инженерно-геологических технологий последних лет [15,16]. В MICP участвуют три типичных вещества: бактерии, субстрат и источник кальция, который в ходе биологической реакции осаждает кристаллы карбоната вокруг частиц почвы, тем самым ремоделируя структуру почвы [17,18].

На обогащенных почвой бактериях, продуцирующих уреазу, под названием *Sporosarcina Pasteurii* (ATCC 11859), она использует мочевины в качестве субстрата, катализирует гидролиз мочевины⁺ и CO_3^{2-} с образованием NH_4 в ходе метаболизма и привлекает Ca^{2+} посредством отрицательного заряда, генерируемого макромолекулами, такими как белки внутри бактерий, вызывая тем самым осаждение CaCO_3 . В процессе склеивания не образуются токсичные вещества, что указывает на то, что это экологически чистый связующий материал [19,20]. MICP также демонстрирует высокую применимость и стабильность воды, что позволяет эффективно улучшать различные типы почв, такие как органические почвы [21], лесс [22], песок [23], хвостохранилища [24] и пустыни [25]. Улучшения, которые MICP оказывает на геотехнические материалы, также зависят от факторов, влияющих на различные процессы минерализации, таких как источники кальция [26], концентрация бактериального раствора [27], концентрация цементирующего раствора [28], соотношение цементного раствора [29], возраст отверждения [30] и значение pH [24]. Образование кристаллов карбоната кальция оказывает существенное влияние на физико-механические свойства обрабатываемой почвы. Почва, обработанная МИКП, по-прежнему пригодна для роста растений, а ее остаточная мочевины может служить питательным веществом [19]. Однако исследования по модификации MICP гранитной остаточной почвы в районе Бенганга с целью улучшения ее способности противостоять дождевой эрозии ограничены.

Одним из важных способов предотвращения потери почвы и воды в зоне эрозии является улучшение водоустойчивости поверхностного слоя почвы, тем самым улучшая ее устойчивость к эрозии. Остаточная гранитная почва с мелкой поверхностью в районе Бенганга обычно рыхлая после длительного выветривания. Кристаллы карбоната кальция, образующиеся при МИКП, могут заполнять поры почвы, а их цементация повышает прочность связи между частицами почвы [28]. Крайне важно определить соответствующие параметры MICP, такие как концентрация бактериального раствора и концентрация инструментального раствора [23]. Следовательно, количественный анализ необходим для практического инженерного применения MICP для предотвращения и контроля эрозии почвы.

Распад почвы относится к долговечности почвы при контакте со стоячей водой и может использоваться для оценки ее водоустойчивости [31–33]. Лю и др. [34] исследовали поведение дезинтеграции гранитной остаточной почвы вдоль типичного профиля выветривания в городе Сямэнь в Китае. Сан и др. [35] изучали объемы и коэффициенты распада образцов почвы, обработанных цементом, негашеной известью и каолинитом. Чжан и др. [36] показали, что эффективная пустотность и характеристические кривые почвенной воды являются основными факторами контроля, влияющими на скорость распада. Лю и др. [1] обсуждали совместное влияние сильных и кислотных дождей на характеристики дезинтеграции гранитных остаточных почв. Однако дезинтеграционные характеристики гранитных остаточных грунтов, обработанных по технологии MICP, не получили достаточного внимания. Необходимо изучить влияние различных факторов минерализации на процессы дезинтеграции. Необходимо получить оптимальные параметры МИКП для контроля дезинтеграции гранитных остаточных грунтов.

В данной работе метод MICP используется для предотвращения распада гранитного остаточного грунта. Для определения оптимальных параметров метода MICP проведена серия экспериментов по дезинтеграции с учетом различных концентраций бактериальных растворов, цементирующих растворов и циклов концентрационной обработки. Далее по особенностям микроструктуры выявляется механизм влияния МИКП на распад гранитных остаточных грунтов. Способность противостоять эрозии, вызванной сильными дождями, будет исследована в будущем. Это исследование подготовит к применению технологии MICP для борьбы с эрозией Бенганга.

2. Материалы

2.1. Условия отбора проб

Гранитная остаточная почва была собрана в зоне эрозии Бенганга на глубине 0,5 м, расположенной в городе Гунцзян (25° 59'24" с.ш., 115° 26'32" восточной долготы), уезд Юду, Цзянси. Провинция в Южном Китае. Естественная плотность в сухом состоянии 1,50 г/см³, предельная влажность жидкости 39,3%, предельная влажность пластмассы 27,5%, коэффициент проницаемости $9,7 \times 10^{-7}$ см/с, удельный вес 2,56. Показана кривая распределения зерен по размерам.

на минераломинеральной среде в соответствии с методом метода рентгеновской дифракции, состоит из герадита (2,2%), фторидов (6,2%), калия (26,2%), боббита (9,4%) и гетита (2,2%) [10].

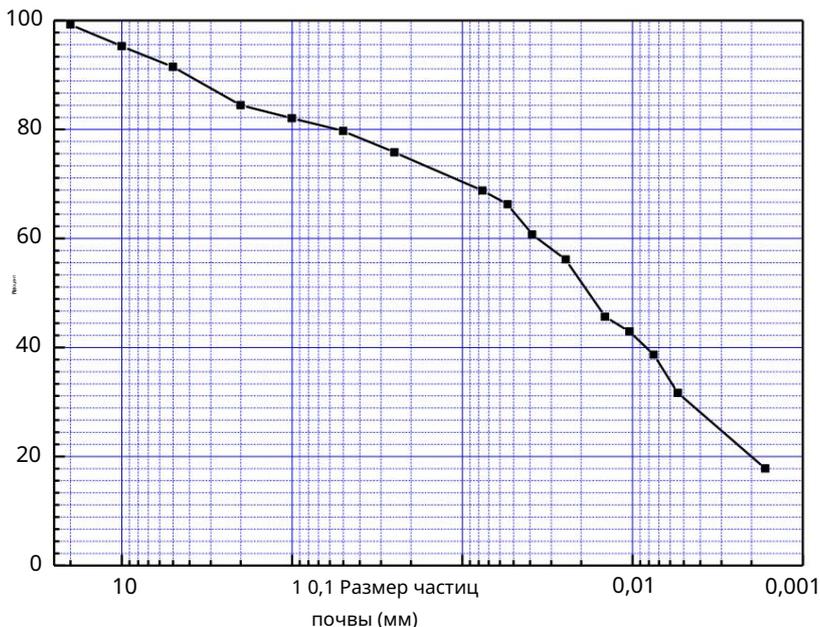


Рисунок 1. Кривая распределения зерен по размерам.
Рисунок 1. Кривая распределения зерен по размерам.

2.2. Бактериальный раствор и цементирующий раствор

В этом исследовании *Sporosarcina Pasteurii* (ATCC 11859) принята за модельную бактерию. В этом издании не описаны (непатогенности) и в какой-либо активности. Культивирование бактерий состоит из трех этапов, а именно приготовления питательного раствора, приготовления среды и бактериальную инокуляцию и культивирование. (а) Всего 25 г/л бульона Дюрий-Бертани (LB) представляет собой подготовленный, стерилизованный в автоклаве паром при 120 °C в течение 20 минут, а затем охлажденный под УФ-излучением подготовленный, стерилизованный в автоклаве паром при 120 °C в течение 20 минут и затем охлажденный под УФ-излучением операционном столе добавляют мочевины. (б) После охлаждения до 40 °C добавляют мочевины при температуре концентрации 1 моль/л и pH доводится до 9 с помощью NaOH. Затем концентрация питательного раствора составляют 1 моль/л, а pH доводят до 9 с помощью NaOH. Затем питательный раствор разливают в чашки Петри и продолжают охлаждать в асептических условиях; разливают в чашки Петри и продолжают охлаждать в асептических условиях до тех пор, пока до затвердевания. (с) *Sporosarcina Pasteurii* осторожно наносится на поверхность затвердевшего продукта. (с) жидкую среду, а затем помещают в помещение с постоянной температурой и влажностью 30 °C и среду, а затем помещают в помещение с постоянной температурой и влажностью 30 °C и 60% для 60% в течение 24 ч для получения полного культивирования бактерий. Бактерии и питательную среду выдерживают 24 часа для получения полного культивирования бактерий. Бактерии и питательная среда хранятся в хранят во флаконах центрифугирования при температуре 4 °C. Растовую среду готовят растворением 10 г казеиновых триптон, 10,0 г хлорида натрия и 5,0 г дрожжевого экстракта в 1 л деион- триптона, 10,0 г хлорида натрия и 5,0 г дрожжевого экстракта в 1 л деионизированной воды.

Исходная плотность (OD600) собранной культуры бактерий составляет 1,5. Различные бактериальные концентрации можно получить, добавляя физиологический раствор (0,9% натрия хлорида). Значения OD600 бактериального раствора составляют 0,25, 0,50, 0,75 и 1,0. Бактериальный раствор хранят в центрифужных флаконах при температуре 4 °C. Бактериальный раствор хранят в центрифужных флаконах при температуре 4 °C.

Цементирующий раствор, используемый в этом исследовании, состоит из 1,0 моль/л эквимолярной мочевины, 1,0 моль/л хлорида кальция. Четыре типа концентрации цементного раствора для приготовления растворов с концентрацией 0,4 моль/л, 0,8 моль/л, 1,2 моль/л, 1,6 моль/л и 1,6 моль/л.

3. Методы

3.1. Аппарат дезинтеграции

3.1. Аппарат для дезинтеграции

Как показано на рисунке 2, тест на дезинтеграцию проводится с использованием самодельного аппарата для дезинтеграции. Как показано на рисунке 2, тест на дезинтеграцию проводится с использованием самодельного аппарата для дезинтеграции. Этот аппарат для дезинтеграции состоит из четырех частей: опорного каркаса, терочный аппарат. Этот аппарат для дезинтеграции состоит из четырех частей: опорной рамы- раковинного устройства, кронштейнного устройства и весового устройства. Система поддержки представляет собой работа, устройство мойки, устройство кронштейна и устройство взвешивания. Опорная рама - кубическая рама из квадратной трубы из нержавеющей стали диаметром 2,5 см и размерами 60 см × 60 см × 50 см. Работает представляет собой кубическую раму из квадратной трубы из нержавеющей стали диаметром 2,5 см и размером 60 см × 60. Устройство мойки включает в себя термостатический водяной короб и небольшой стеклянный короб внутри с размерами.

Размерами 40 см × 40 см × 25 см и 30 см × 30 см × 25 см соответственно. Распад

см × 50 см. Устройство мойки включает в себя термостатический водяной короб и небольшой стеклянный короб внутри размерами 40 см × 40 см × 25 см и 30 см × 30 см × 25 см соответственно. Испытание на распад проводится в статической водной среде и при постоянной температуре. Крощеин
Устройство брекета включает в себя металлическую сетку и тонкую струну. Размер отверстия устройства с металлической сеткой включает металлическую сетку и тонкую струну. Размер отверстия металлической сетки, используемой для поддерживающей образцов почвы, составляет 0,9 см. опора образцов почвы составляет 0,9 см.

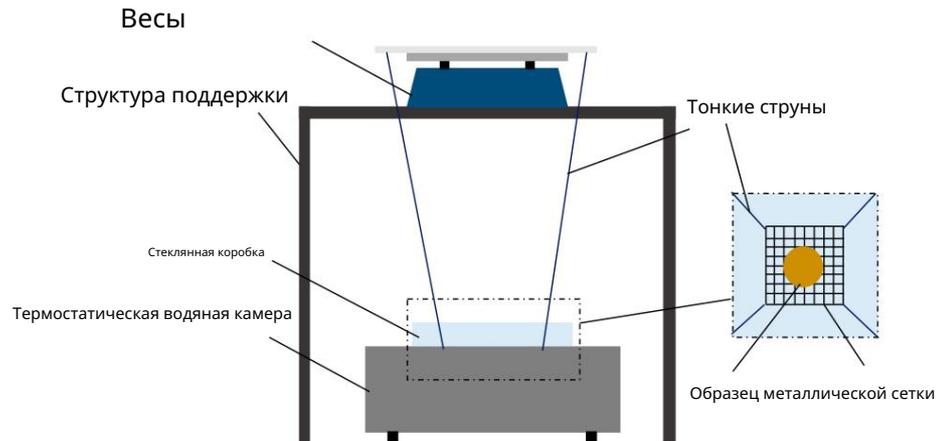


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального устройства.
Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального устройства.

3.3. Процедура испытания на дезинтеграцию

3.3.1. Подготовка образцов 3.2.1.

Почва проходит через сито 2 мм. Затем его помещают в печь для сушки при температуре 105 °C. Начальную влажность контролируют на уровне не менее 15%. Испытательные образцы переформовывают. Исходную образцов объемом 60 см³ почва статически уплотняется до сухой пробы почвы режущим кольцом объемом 60 см³. Почва статически уплотняется до сухой пробы почвы режущим кольцом объемом 60 см³. Почва статически уплотняется до сухой пробы почвы режущим кольцом объемом 60 см³. Переформованный образец помещают в герметичный ящик постоянной влажности плотностью 1,5 г/см³. Отформованный образец помещают в герметичный ящик с постоянной влажностью 24 часа для обеспечения равномерного распределения воды. В качестве обработки МСП принят метод стерилизации в течение 24 часов для обеспечения равномерного распределения воды. Метод стерилизации принят как МСП. на поверхности образцов. Процесс распыления включает в себя два этапа. Во-первых, обработка поверхности образцов объемом 10 мл. Процесс распыления включает в себя два этапа. Во-первых, обработка поверхности образцов объемом 10 мл. Процесс распыления включает в себя два этапа. Во-первых, обработка поверхности образцов объемом 10 мл. Бактериальный раствор равномерно распыляется на поверхность образца. Затем образцы бактериального отверждение в камере с постоянной температурой и влажностью (комнатная температура 25 °C ± 2 °C, влажность 85% ± 5%) в течение 3 часов, чтобы обеспечить распространение и размножение бактерий. Во-вторых, на ту же поверхность распыляют мл цементующего раствора. Затем на ту же поверхность распыляют цементующий раствор. Затем образцы сохраняются выдерживают в течение 21 часа в боксе с постоянной температурой и влажностью для обеспечения полного действия в течение 21 часа в боксе с постоянной температурой и влажностью для обеспечения полного действия между бактериальным раствором и цементующим раствором. Процесс отверждения показан на рисунке 3. распыление бактериального раствора и цементующего раствора один раз в цикл. Это исследование включает цикл в течение МСП для изучения влияния различных циклов лечения на

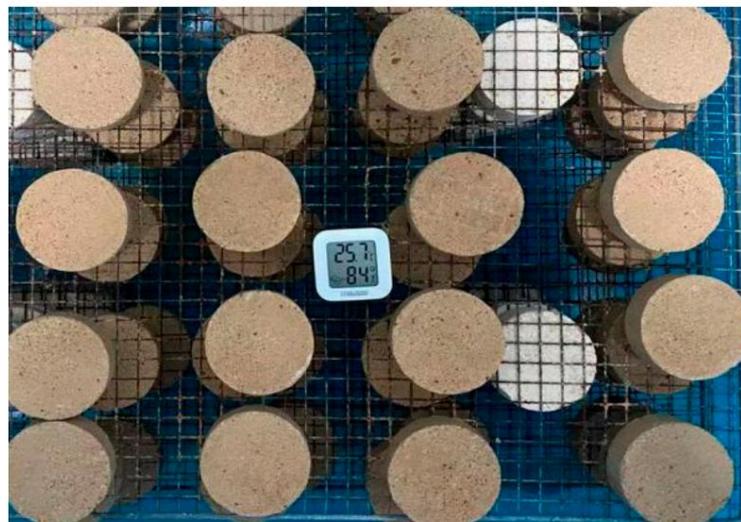


Рисунок 3. Процесс отверждения.

3.2.2. Тестовые процессы

Испытание на дезинтеграцию проводят при температуре воды 25°C. Образец помещается на металлическую сетку. Во время испытания образцы опускают в воду. Вес регистрируется с интервалом времени 5 с. Тем временем распад

3.2.2. Тестовые процессы

Испытание на дезинтеграцию проводят при температуре воды 25 °С. Образец размещается на металлической сетке. Во время испытания образцы опускают в воду. Вес регистрируется по интервалу времени 5 с. При этом морфология распада образца фиксируется камерой. Когда образец полностью распадается или показания весов изменяются менее чем на 1 г в течение 10 мин, тест завершается.

3.3. Экспериментальная схема

Три фактора, включая концентрацию бактериального раствора, цементирующий раствор концентрация и цикл обработки настраиваются в экспериментальной схеме. вместо бактерий и цементации используется деионизированная вода для распыления образца для контрастная группа без лечения (Е1~Е4). Процессы дезинтеграции анализируются с целью получить оптимальный параметр. Схемы экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные схемы.

| Номер образца | Бактериальный раствор Концентрация (ОД600) | Цементирующий раствор Концентрация (моль/л) | Цикл лечения |
|---------------|--|--|--------------|
| A1~A4 | 0,25 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 1 |
| A5~A8 | 0,5 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 1 |
| A9~A12 | 0,75 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 1 |
| A13~A16 | 1.0 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 1 |
| B1~B4 | 0,25 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 3 |
| B5~B8 | 0,5 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 3 |
| B9~B12 | 0,75 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 3 |
| B13~B16 | 1.0 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 3 |
| C1~C4 | 0,25 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 5 |
| C5~C8 | 0,5 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 5 |
| C9~C12 | 0,75 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 5 |
| C13~C16 | 1.0 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 5 |
| D1~D4 | 0,25 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 7 |
| D5~D8 | 0,5 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 7 |
| D9~D12 | 0,75 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 7 |
| D13~D16 | 1.0 | 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 | 7 |
| E1~E4 | 0 | 0 | 1, 3, 5, 7 |

4. Результаты и обсуждение.

4.1. Процессы дезинтеграции

Морфологические особенности образца почвы Е3 без обработки МИКП представлены на рис. Рисунок 4. При погружении образца почвы в воду на поверхности появляются многочисленные пузырьки. поверхность образца почвы, как показано на рисунке 4а. На этом этапе происходит распад почвы. Скорость ниже скорости поглощения воды, что приводит к постоянному увеличению чтение баланса. Из-за непрерывного поглощения воды образец почвы постепенно насыщает. После этого происходит бурное разрушение, и на поверхности появляются трещины. образец почвы, как показано на рисунке 4б. Образец сжимается сбоку к центру. Образуются большие пузырьки, и вода становится мутной. При $t = 300$ с почва почти полностью упал на дно коробки (полный распад). Вода проникает в поры между частицами почвы, что приводит к увеличению влажности почвы и уменьшению

слой после одного цикла обработки. Однако армирующий слой слишком мал и тонкий и поэтому не дает существенного улучшения.

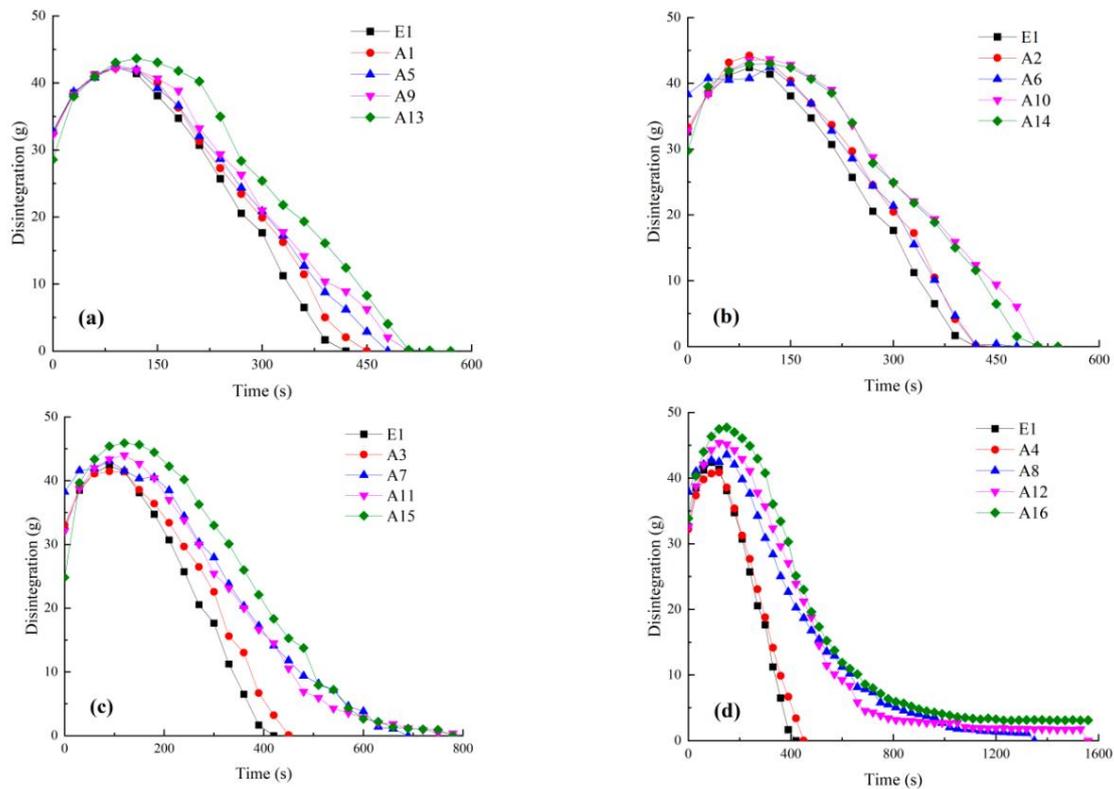
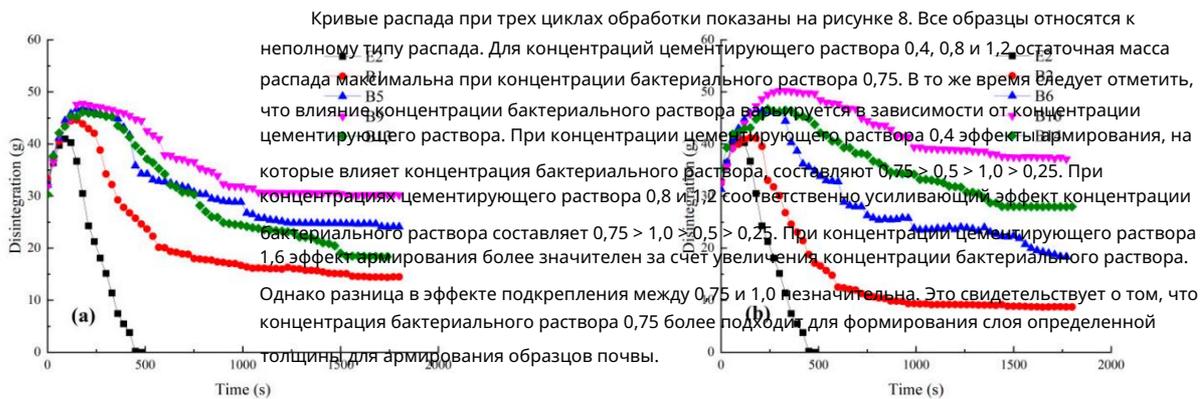


Рисунок 7. Кривая дезинтеграции при одном цикле обработки различными концентрациями бактериального раствора. Рисунок 7. Кривая дезинтеграции при одном цикле обработки различными концентрациями бактериального раствора: а - 0,4, б - 0,8, в - 1,2, г - 1,6. а - 0,4, б - 0,8, в - 1,2, г - 1,6.



Кривые распада при трех циклах обработки показаны на рисунке 8. Все образцы относятся к неполному типу распада. Для концентраций цементующего раствора 0,4, 0,8 и 1,2 остаточная масса распада максимальна при концентрации бактериального раствора 0,75. В то же время следует отметить, что влияние концентрации бактериального раствора варьируется в зависимости от концентрации цементующего раствора. При концентрации цементующего раствора 0,4 эффект армирования, на которые влияет концентрация бактериального раствора, составляют $0,75 > 0,5 > 1,0 > 0,25$. При концентрациях цементующего раствора 0,8 и 1,2 соответственно усиливающий эффект концентрации бактериального раствора составляет $0,75 > 1,0 > 0,5 > 0,25$. При концентрации цементующего раствора 1,6 эффект армирования более значителен за счет увеличения концентрации бактериального раствора. Однако разница в эффекте подкрепления между 0,75 и 1,0 незначительна. Это свидетельствует о том, что концентрация бактериального раствора 0,75 более подходит для формирования слоя определенной толщины для армирования образцов почвы.

Рисунок 8. Кривые дезинтеграции при трех циклах обработки с разной концентрацией цементующего раствора при концентрации: а - 0,4, б - 0,8, в - 1,2, г - 1,6.

Из-за короткого времени лечения реакция MICP не осуществляется полностью за один цикл лечения. При более низкой концентрации цементующего раствора, когда концентрация бактериального раствора превышает 0,5, реакция может быть проведена полностью. Это приведет к быстрой реакции. Если концентрация бактериального раствора слишком высока, образуется большое количество кристаллов карбоната кальция, заполняющих поверхностные поры почвы. Арматурный слой остается только на поверхности.

Из-за короткого времени обработки реакция МИСР не осуществляется полностью за один цикл. При меньшей концентрации цементирующего раствора, когда бактериальный раствор концентрация больше 0,5, реакция может быть полностью проведена. Это приведет к быстрой реакции. Если концентрация бактериального раствора слишком высока, большое количество Кристаллы карбоната кальция образуются для заполнения поверхностных пор почвы. Армирование слой остается только на поверхности, что затрудняет дальнейшее существование бактерий и цемента. проникновение. Кривые дезинтеграции при пяти и семи циклах обработки показаны на рис. Рисунки 9 и 10 соответственно. Некоторые образцы демонстрируют явления нераспада после пяти и семи циклов обработки при трех циклах обработки различными цементирующими растворами, пяти и семи концентрациями и концентрации бактериального раствора на обработанные образцы варьируется в зависимости от к различным циклам лечения. После нескольких циклов лечения эффект МИКП ограничен. При более низкой концентрации цементирующего раствора, когда концентрация бактериального раствора равна концентрации цементирующего раствора, можно достичь хорошего усиления при достаточной реакции. Если условия. Более высокая концентрация бактериального раствора приводит к образованию большего количества кристаллов для заполнения пор. Армирование происходит в основном на поверхности раствора наиболее подходящим бактериальным раствором, но оно продолжает проникновение. Кривые распада с пятью и 1,6, наиболее семь циклов лечения показаны на рисунках 9 и 10 соответственно. В некоторых образцах наблюдается несоответствие явления интеграции после пяти и семи циклов лечения. Учитывая эффект 0,75 эффективен при армировании гранитного остаточного грунта МИСР.

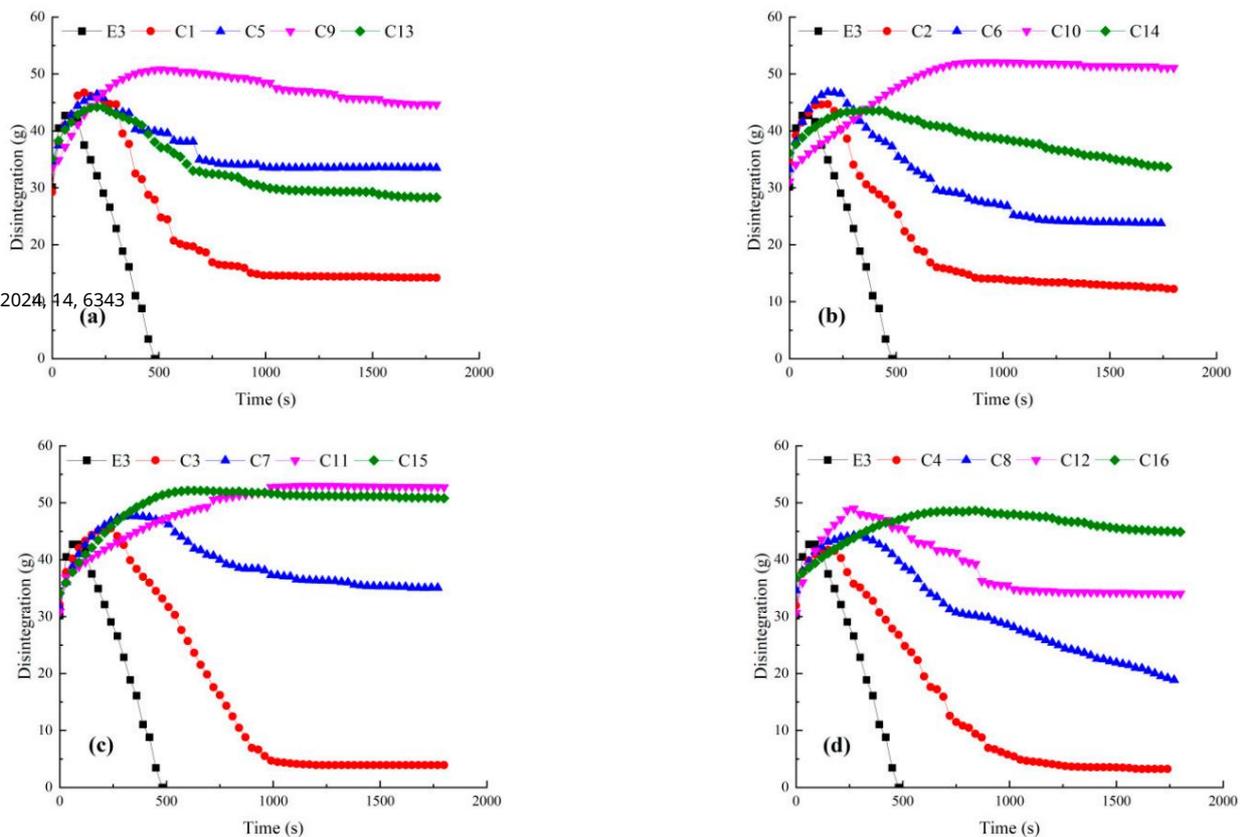


Рисунок 9. Кривая дезинтеграции при пяти циклах обработки различной концентрации цементирующего раствора) и 0.75. Трации: а – 0,4, б – 0,8, в – 1,2, г – 1,6.

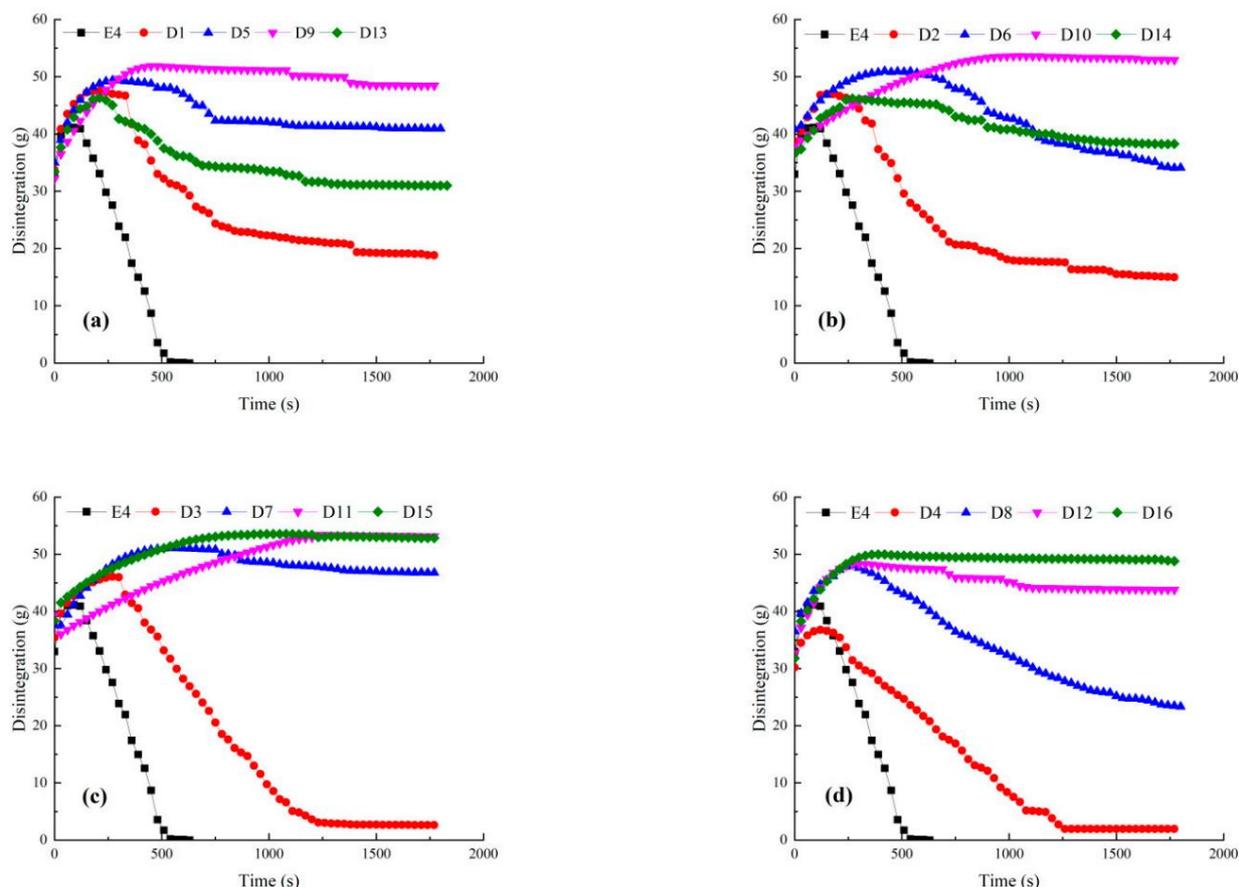


Рис. 10. Кривая дезинтеграции при семи циклах обработки с разной концентрацией цементирующего раствора) 1,6. концентрации: а - 0,4, б - 0,8, в - 1,2, г - 1,6.

4.3. Влияние концентрации цементирующего раствора на дезинтеграцию

Влияние концентрации бактериального раствора на обработанные образцы варьируется в зависимости от различных циклов обработки. После нескольких циклов обработки эффект интеграции MICP, кривые распада при различных концентрациях цементирующего раствора

реакция ограничена. Для данной концентрации бактериального раствора представлена правильная комбинация концентрации бактериального раствора и 0,4, 0,8, 1,2 и 1,6 моль/л.

Концентрация цементирующего раствора позволяет добиться хорошего армирования при достаточной реакции. Кривая распада при одном цикле обработки показана на рисунке 11. При одном цикле обработки условия. Более низкая концентрация бактериального раствора подходит для более низких концентраций лечения, наблюдается ограниченное улучшение устойчивости к дезинтеграции.

использованием технологии MICP, образец полностью распадается.

1,2, наиболее подходящей бактериальной раствор 0,75. Кривые дезинтеграции при различных

1,6 для образцов для вид бактерий и концентрации бактериального раствора представлено на рисунке 12.

неполный тип распада. Когда бактериальный раствор

концентрация 0,25, усиление концентрации раствора концентрации

0,4 > 0,8 > 1,2 > 1,6. При концентрации бактериального раствора 0,5 усиление

концентрации раствора составляет 1,2 0,4 > 0,8 > 1,6. Когда бактериальная

концентрация раствора 0,75, усиление концентрации раствора концентрации

составляет 1,2 0,8 > 0,4 > 1,6. Когда концентрация бактериального раствора равна 1,0, усиление

концентрации раствора составляет 1,2 > 1,6 > 0,8 > 0,4. Это также указывает на то, что

концентрация цементирующего раствора должна быть объединена с бактериальным раствором.

концентрация для достижения хорошего эффекта лечения. При более низких концентрациях бактериального раствора

ионы, содержащиеся в цементирующем растворе высокой концентрации, значительно ингибируют

уреазную активность в бактериальном растворе [38]. В этом случае реакция MICP

скорость снижается, и, следовательно, количество конечных продуктов реакции уменьшается.

Для данной концентрации бактериального раствора представлены кривые распада при различных концентрациях цементирующего раствора 0,4, 0,8, 1,2 и 1,6 моль/л. Кривая распада при одном цикле обработки показана на рисунке 11. При проведении одного цикла обработки происходит ограниченное улучшение способности противостоять дезинтеграции с использованием технологии МІСР, и образец полностью распадается.

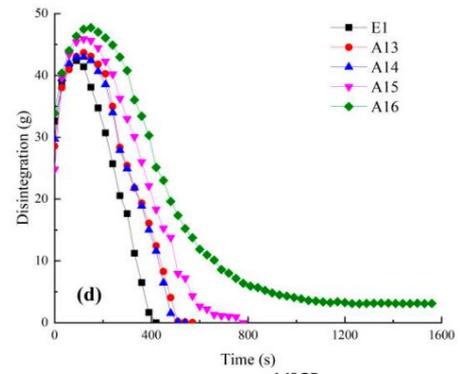
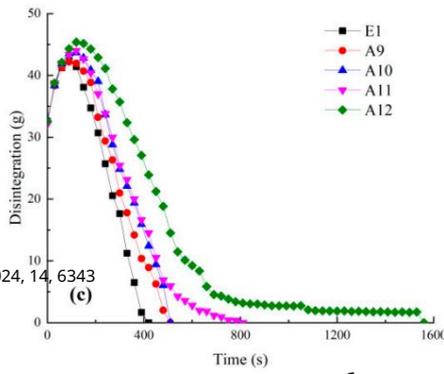
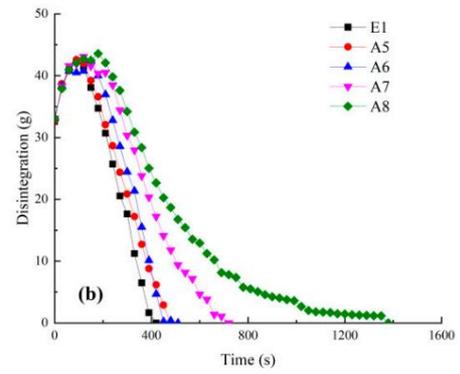
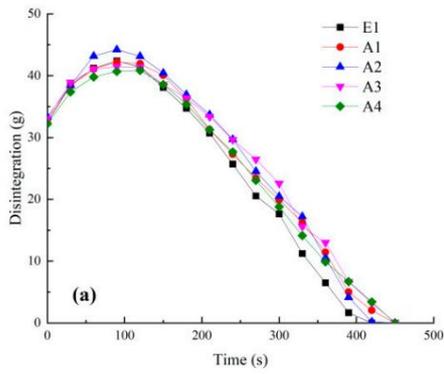


Рисунок 11. Кривые распада концентрации при одном цикле обработки различной концентрации (а - 0,25, б - 0,5, в - 0,75, г - 1,0.

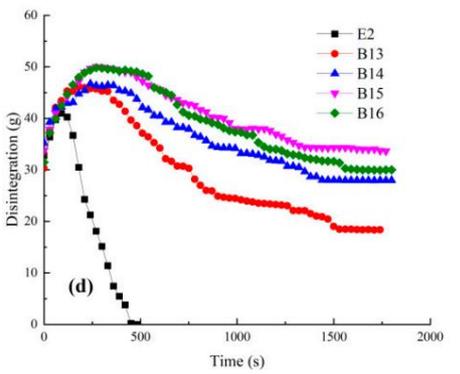
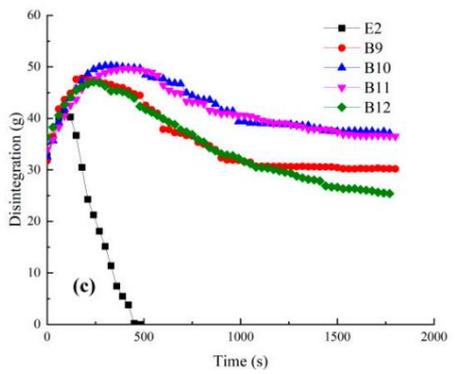
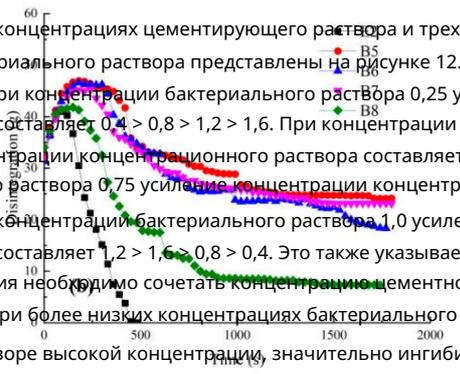
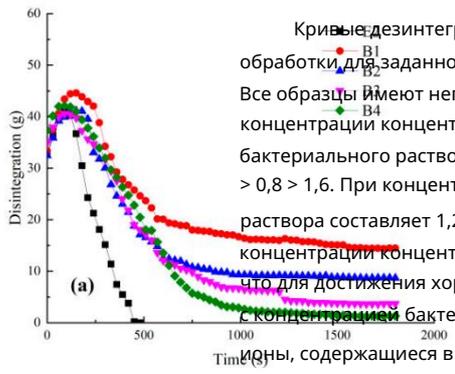


Рисунок 12. Кривые дезинтеграции с тремя циклами обработки различными концентрациями бактериального раствора: (а) 0,25, (б) 0,5, (в) 0,75 и (г) 1,0.

После пяти циклов обработки МІСР образуется большое количество кристаллов СаСО₃. Кривые распада концентрации цементирующего раствора при пяти и семи циклах обработки представлены на рисунках 13 и 14 соответственно. Однако когда концентрация бактериального раствора составляет 0,25, общий эффект связывания является плохим, что существенно отличается от того, когда концентрация бактериального раствора превышает 0,5.

После пяти циклов обработки МІСР образуется большое количество кристаллов CaCO_3 . Кривые распада цементационного раствора концентрации пяти и семи циклы лечения представлены на рисунках 13 и 14 соответственно. Однако, когда концентрация бактериального раствора составляет 0,25, общий эффект связывания является плохим, что значительно ухудшается от отличается от того, когда концентрация бактериального раствора превышает 0,5. Поэтому, при рассмотрении оптимальной концентрации приборного раствора учитывается только случай, когда случаев считается концентрация бактериального раствора 0,5. Оптимальное решение для цементации концентраций имеют значение 1,2, когда концентрация бактериального раствора составляет 0,5. После При обработке большое количество CaCO_3 прикрепляется к окружающим частицам и заполняет промежутки в частицах почвы.

Прил. наук. 2024, 14, 6343

Прил. наук. 2024, 14, 6343

13 из 20

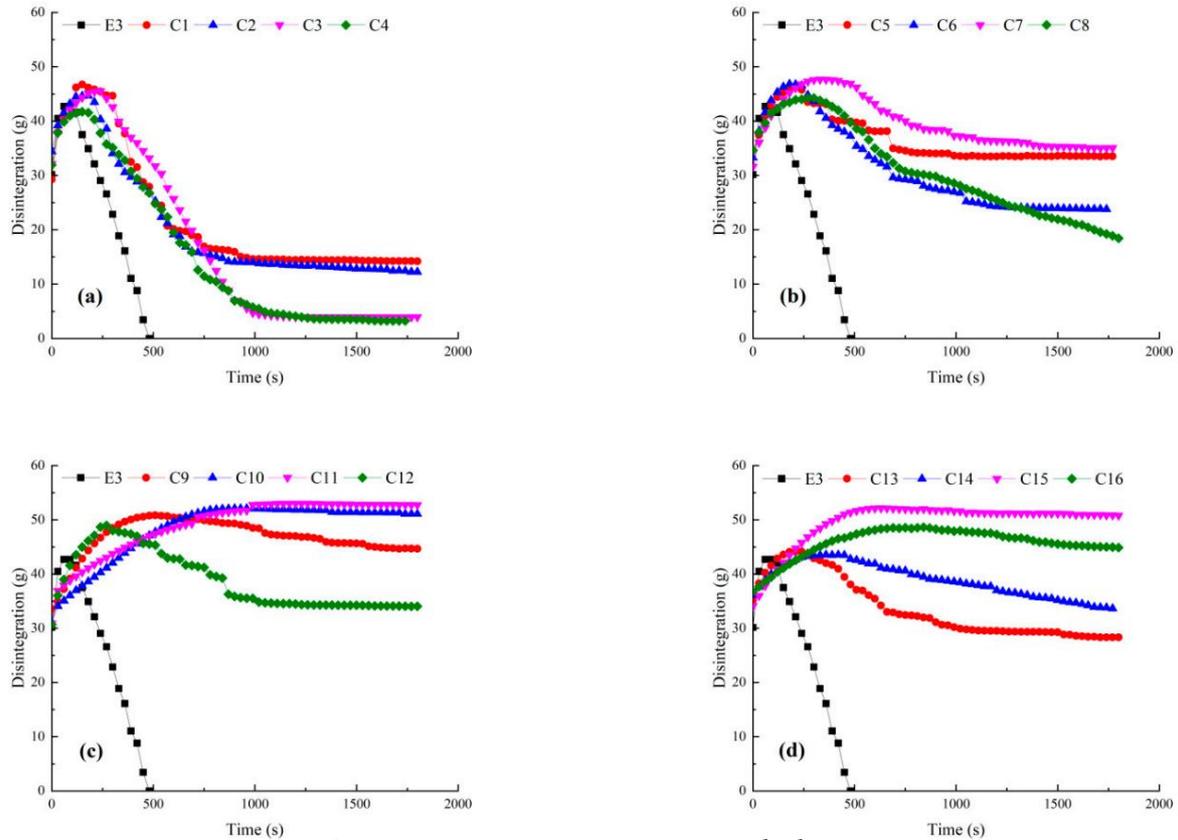


Рисунок 13. Кривая дезинтеграции при пяти циклах обработки с различными концентрациями бактериального раствора: (а) 0,25, (б) 0,5, (в) 0,75 и (г) 1,0.

Рисунок 13. Кривая дезинтеграции при пяти циклах обработки с различными концентрациями бактериальных растворов. Рисунок 13. Кривая дезинтеграции при пяти циклах обработки с различными концентрациями бактериальных растворов: (а) 0,25, (б) 0,5, (в) 0,75 и (г) 1,0.

ции: а – 0,25, б – 0,5, в – 0,75, г – 1,0.

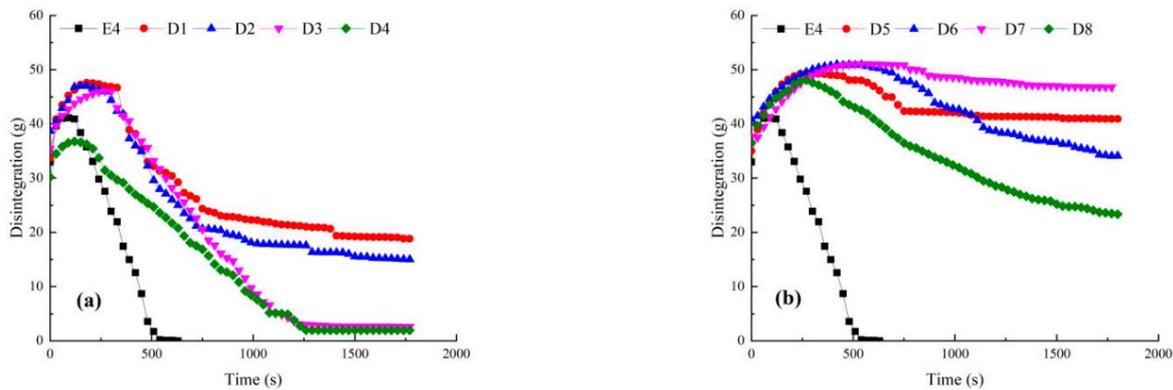


Рисунок 14. Продолжение.

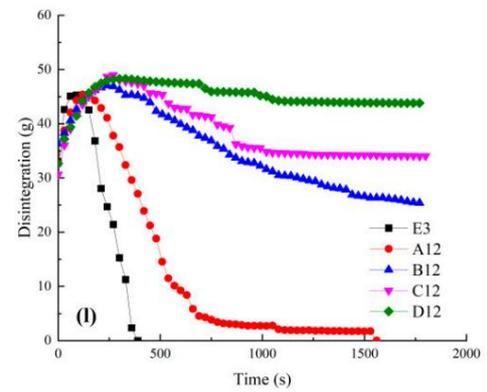
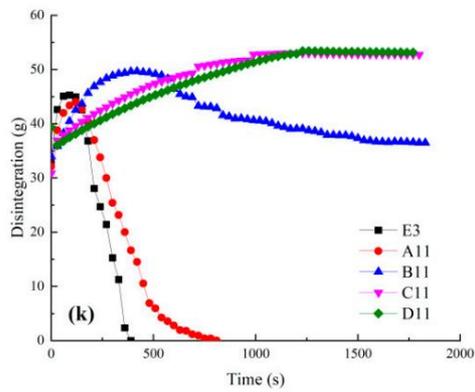
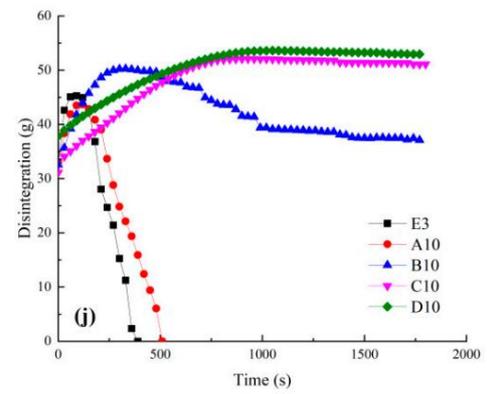
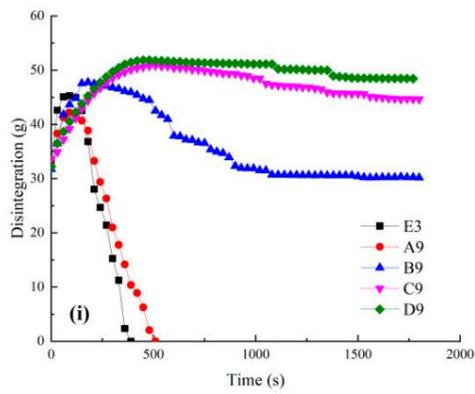
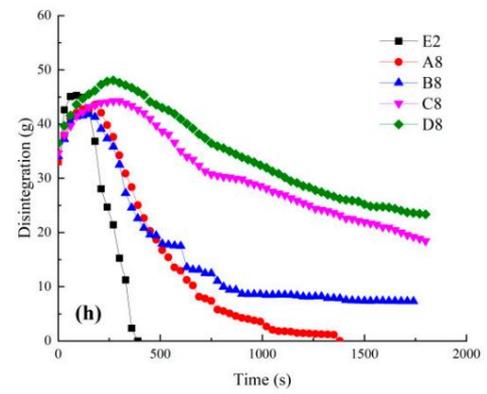
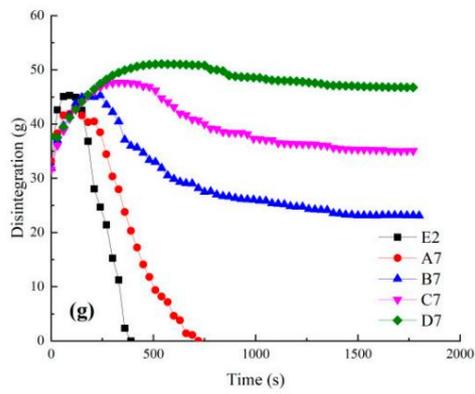
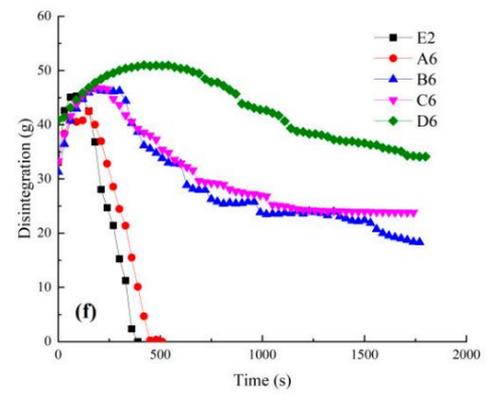
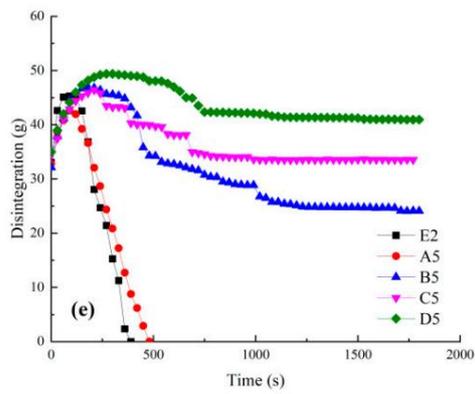
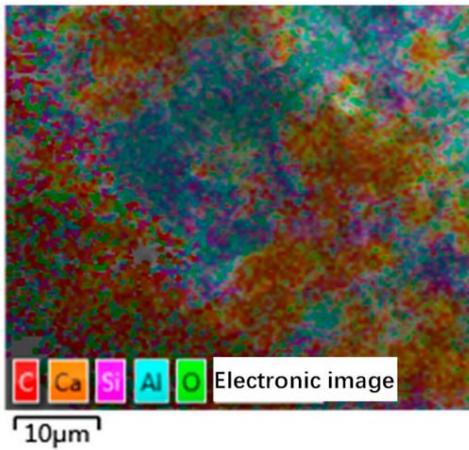
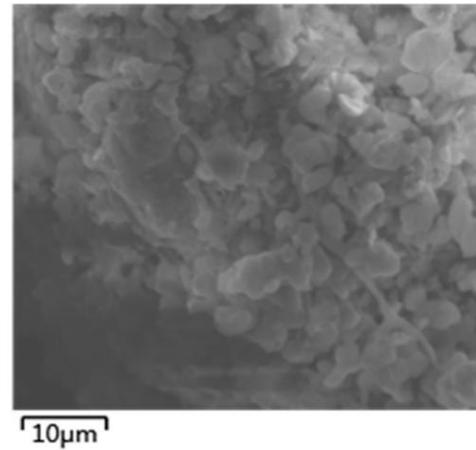


Рисунок 15. Продолжение.

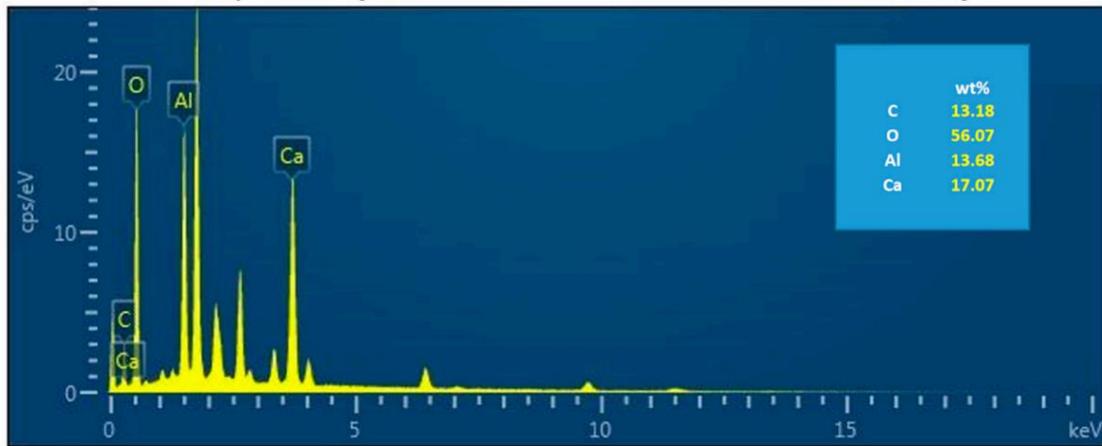
и следы в виде частиц по всей поверхности. Таким образом, фактически не наблюдается разрушения на протяжении всего срока службы.



(а) Многослойное изображение элемента ЭЦП.



(б) СЭМ-изображения.



(с) Диаграмма содержания элемента.

Рис. 17. Схема анализа энергетического спектра ЭДС.

6. Выводы

В ходе исследования была создана модель для прогнозирования срока службы. В этом отношении, наиболее важным фактором для прогнозирования срока службы является наличие защитного слоя. Концентрация защитного слоя должна быть достаточной для предотвращения коррозии. Выводы можно сделать следующие:

- (1) Технология изготовления должна обеспечивать образование защитного слоя на поверхности.
- (2) Концентрация защитного слоя должна быть достаточной для предотвращения коррозии.
- (3) За счет образования защитного слоя можно предотвратить коррозию.

Толщина армирующего слоя должна быть достаточной для предотвращения коррозии.

Слой, полученный за один или три цикла армирования, недостаточен для полного покрытия поверхности.

(4) В настоящее время проводятся дальнейшие исследования по изучению механической стабильности и способности противостоять эрозии под воздействием сильных дождей. Для достижения эффективного регулирования эффективности реакции минерализации также необходимо учитывать долгосрочную долговечность остаточного грунта из цементированного гранита.

Вклад автора: концептуализация, XL и WL; письмо – подготовка оригинального черновика, XL; расследование, ЮФ; курирование данных, CL; написание — рецензирование и редактирование, WL. Все авторы прочитали опубликованную версию рукописи и согласились с ней.

Финансирование: Исследование финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 41962015) и Природным фондом провинции Цзянси (грант № 20161BAB203078).

Заявление Институционального наблюдательного совета: Неприменимо.

Заявление об информированном согласии: Не применимо.

Заявление о доступности данных: оригинальные материалы, представленные в исследовании, включены в статью; дальнейшие запросы можно направить соответствующему автору.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Лю, В.; Песня, Х.; Хуанг, Ф. Экспериментальное исследование распада гранитной остаточной почвы под совместным воздействием циклов увлажнения-высыхания и кислотных дождей. *Геомат. Нат. Опасности Риск* 2019, 10, 1912–1927. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
2. Лю, Х.; Цю, Дж.; Чжан Д. Характеристики склонового стока и содержания влаги в почве в коллювии Бенган при моделируемых дождях. *J. Soils Sediments* 2018, 18, 39–48. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
3. Дэн, Ю.; Шен, Х.; Ся, Д. Эродированность почвы и физико-химические свойства обрушивающихся конусов аллювиальных оврагов в Южном Китае. *Педосфера* 2019, 29, 102–113. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
4. Тан, К.; Дуань, Х.; Он, Л. Изменчивость и движущие факторы гидравлической проводимости насыщенной почвы в горизонтальном и вертикальном направлениях в верхнем водосборе Бенганга. *CATENA* 2023, 222, 106810. [\[CrossRef\]](#)
5. Сюй, Дж. Эрозия Бенганга: влияющие факторы. *CATENA* 1996, 27, 249–263.
6. Лян Ю.; Чжан, Б.; Пан, Х. Текущее состояние и комплексные стратегии борьбы с эрозией почвы в холмистом регионе на юге Китая. *наук. Сохранение почвенной воды*. 2008, 6, 22–27.
7. Вэй, Ю.; Лю, З.; У, Х. Можно ли рассматривать Бенганг как овражную эрозию? *CATENA* 2021, 207, 105648. [\[CrossRef\]](#)
8. Лян Ю.; Нин, Д.; Пан, Х. Характеристики и управление эрозией Бенганга в южном красноземном регионе. *Сохранение почвенной воды*. Китай 2009, 1, 31–34.
9. Ляо, Ю.; Чжэн, М.; Ли, Д. Взаимосвязь числа бэнганга, площади и гипсометрических интегральных значений на разных формах рельефа. *стадии развития. Земля деградирует. Дев.* 2020, 31, 2319–2328. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
10. Лю, В.; Оуян, Г.; Луо, Х. Содержание влаги, поровое давление воды и фронт смачивания в гранитном остаточном грунте во время обрушения. *эрозия с переменным углом наклона. Геоморфология* 2020, 362, 107210. [\[CrossRef\]](#)
11. Лю, В.; Цюй, Ю.; Оуян, Г. Экспериментальное исследование влияния зернового состава на обрушивающуюся эрозию гранита. *остаточная почва. CATENA* 2023, 223, 106949. [\[CrossRef\]](#)
12. Ляо, Ю.; Чангюань, Т.; Зайцзян, Ю. Прогресс исследований эрозии Бенганга и мер ее предотвращения в красноземном регионе Южного Китая. *Акта Педол. Грех.* 2018, 55, 1297–1312.
13. Чжу, Х.; Лян, Ю.; Цюй, Л. Характеристики стока и выхода наносов для двух типичных эродированных почв на юге Китая. *Межд. Дж. Осадок Рез.* 2022, 37, 653–661. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
14. Буллок, А.; Кинг, Б. Оценка китайской программы преобразования земель на склонах как устойчивого управления в округах Тяньцзюань и Уци. *Дж. Энвайрон. Менеджер.* 2011, 92, 1916–1922. [\[Перекрестная ссылка\]](#) 15. ван Паассен Леон, А.; Гоуз, Р.; ван дер Линден Томас, Дж. М. Количественная оценка биоопосредованного улучшения почвы путем уреолитизации: крупномасштабный эксперимент с биоаттиркой. *Дж. Геотех. Геоокружение.* англ. 2010, 136, 1721–1728. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
16. Португалия, CRMe; Фольно, К.; Манчадо, СС Биоцементация с микробиологически индуцированным осаждением кальцита, зеленая альтернатива для дорог – это прорыв? *Критический обзор. Дж. Чистый. Прод.* 2020, 262, 121372. [\[CrossRef\]](#)
17. Филиппс, Эй Джей; Герлах, Р.; Лаучнор, Э. Инженерные применения уреолитической биоминерализации: обзор. *Биообращение* 2013, 29, 715–733. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
18. Тан, К.С.; Чжу, К.; Ченг, К. Растрескивание почв при высыхании: обзор подходов к исследованию, основных механизмов и влияющие факторы. *Науки о Земле. Ред.* 2021, 216, 103586. [\[CrossRef\]](#)
19. Ли, С.; Ли, К.; Яо, Д. Осуществимость микробиологического осаждения карбонатов и соломенных шахматных барьеров в борьбе с опустыниванием контроль и экологическое восстановление. *Экол. англ.* 2020, 152, 105883. [\[CrossRef\]](#)

20. Лю, С.; Ван, Р.; Ю, Дж. Эффективность противозерозионного покрытия MICP на поверхности древней глиняной черепицы. Констр. Строить. Матер. 2020, 243, 118202. [\[CrossRef\]](#) 21.
- Чанакчи, Х.; Сидик, В.; Килич, И.Х. Влияние бактериального осаждения карбоната кальция на сжимаемость и прочность органического грунта на сдвиг. Обнаружены почвы. 2015, 55, 1211–1221. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
22. Ченг, Ю.Дж.; Тан, СС; Пэн, ХН. Применение микробиологического осаждения карбонатов для борьбы с поверхностной эрозией лессов. англ. геол. 2021, 294, 106387. [\[CrossRef\]](#)
23. Цзян, Нью-Джерси; Тан, СС; Инь, Л.Ю. Применимость метода микробной кальцификации для борьбы с эрозией поверхности песчаных склонов. Дж. Матер. Гражданский. англ. 2019, 31, 04019250. [\[CrossRef\]](#)
24. Лай, Ю.; Ю, Дж.; Лю, С. Экспериментальное исследование по улучшению механических свойств песка из хвостов железа с помощью MICP при низком pH. Констр. Строить. Матер. 2021, 273, 121729. [\[CrossRef\]](#)
25. Мэн, Х.; Гао, Ю.; Он, Дж. Микробно-индуцированные осаждения карбонатов для борьбы с ветровой эрозией пустынной почвы: полевые испытания. Геодерма 2021, 383, 114723. [\[CrossRef\]](#)
26. Ван, Л.; Рен, З.; Ван, Х. Взаимосвязь микроструктуры и свойств в цементном растворе с поверхностной обработкой, вызванной микробами. карбонатные осадки. Композиции. Часть Б, англ. 2022, 239, 109986. [\[CrossRef\]](#)
27. Ченг, Л.; Корд-Рувинш, Р.; Шахин, М.А. Цементация песчаной почвы микробиологически индуцированным осаждением кальцита при различных степени насыщения. Может. Геотех. Дж. 2013, 50, 81–90. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
28. Чжао, Ц.; Ли, Л.; Ли, К. Факторы, влияющие на улучшение инженерных свойств почвы, обработанной MICP, катализируемое бактериями и уреазой. Дж. Матер. Гражданский. англ. 2014, 26, 04014094. [\[CrossRef\]](#)
29. Тан, СС; Инь, ЛУ; Цзян, Нью-Джерси Факторы, влияющие на эффективность почвы, обработанной микробиологическим карбонатным осаждением (MICP) : обзор. Окружающая среда. Науки о Земле. 2020, 79, 94. [\[CrossRef\]](#)
30. Чой, С.Г.; Чанг, И.; Ли, М. Обзор инженерно-геологических свойств песков, обработанных микробиологически индуцированным кальцием. карбонатное осаждение (MICP) и биополимеры. Констр. Строить. Матер. 2020, 246, 118415. [\[CrossRef\]](#)
31. Фахардо, М.; МакБрэтни, АВ; Филд, диджей Оценка отслаивания почвы с помощью распознавания изображений. Обработка почвы 2016, 163, 119–129. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
32. Зе, З.; Вадим П.; Светлана Н. Особенности дезинтеграции криолитогенных суглинков разной влажности: Москва. покровный суглинок (rgQIII), практический пример. англ. геол. 2019, 258, 105159. [\[CrossRef\]](#)
33. Касмерчак, К.С.; Мейсон, Дж.А.; Лян, М. Лазерный дифракционный анализ стабильности и распада агрегатов в лесах и лугах. почвы северной Миннесоты, США. Геодерма 2019, 338, 430–444. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
34. Лю, Х.; Чжан, Х.; Конг, Л. Распад гранитных остаточных почв при различной степени выветривания. англ. геол. 2022, 305, 106723. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
35. Сунь, Ю.; Лю, К.; Сюй, Х.С. Влияние различных модификаторов на дезинтеграцию улучшенного гранитного остаточного грунта во влажных и сухие циклы. Межд. Дж. Мин. наук. Технол. 2022, 32, 831–845. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
36. Чжан С.; Тан, Х.М. Экспериментальное исследование механизма распада ненасыщенной гранитной остаточной почвы. Rock Soil Mech. 2013, 34, 1668–1674.
37. Мейер, Ф.; Банг, С.; Мин, С.; Стетлер, Л.; Банг, С. Микробиологически индуцированная стабилизация почвы: применение *Sporosarcina Pasteurii* для борьбы с летучей пылью. В Geo-Frontiers 2011: Достижения в области геотехнической инженерии; Американское общество инженеров-строителей: Рестон, Вирджиния, США, 2011 г.; стр. 4002–4011.
38. Ван, Р.; Тан, СС; Пан, Х.; Шен, З.; Лю, Ю.; Лу, Х. Биотехнологический подход к удалению взвешенных веществ из биогазовой суспензии. посредством микробиально-индуцированного осаждения кальцита (MICP). Дж. Чистый. Прод. 2024, 459, 142537. [\[CrossRef\]](#)
39. Катеби, Х.; Фахми, А.; Урия, А.; Бабаян Амини, А.; Кафил, Х.С. Микробиологическая обработка поверхности песка *Sporosarcina Pasteurii* для Улучшение устойчивости к ветровой эрозии в озере Урмия. Прил. Окружающая среда. Почвоведение. 2021, 8893115. [\[CrossRef\]](#)
40. Брюс Дональд, А. Глоссарий терминологии по цементированию. Дж. Геотех. Геоокружение. англ. 2005, 131, 1534–1542. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.