Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года подчеркнула важность продовольственной безопасности и содействия устойчивому сельскому хозяйству. Почва является основой сельского хозяйства, и ее характеристики изменяются как в пространстве, так и во времени.[8,22] Среди свойств почвы глубина почвы играет важную роль в росте сельскохозяйственных культур. В большинстве случаев корни растений в основном зависят от глубины почвы, обеспечивая листья и стволы питательными веществами и водой. Поэтому глубина почвы считается ключевым фактором для оценки потенциала земли для ведения сельского хозяйства. В этой работе глубина почвы определялась как глубина от поверхности почвы до каменного или паралитического контакта, как в Глобальной почвенной карте. Однако определение глубины почвы выполнялось в полевых условиях в течение длительного времени, что было дорогостоящим и медленным процессом.

Поскольку существует тесная взаимосвязь между характеристиками формы рельефа и свойствами почвы, для оценки глубины почвы часто применяется цифровой анализ местности (DTA). Этот подход позволяет оценить глубину почвы с меньшими затратами и более коротким циклом по сравнению с традиционным полевым обследованием. Были созданы различные статистические модели для количественной оценки глубины почвы с использованием атрибутов местности, полученных на основе цифровой модели рельефа (DEM).

Некоторые исследователи обнаружили, что свойства почвы тесно связаны с ее исходным материалом. Например, почва, образованная известняком, может быть более мелкой и глубокой глиной, чем почва, образованная другим исходным материалом, тогда как граниты могут образовывать относительно более грубую и неглубокую почву. Это указывает на то, что отношения между атрибутами почвы и ландшафта также могут различаться в зависимости от исходных материалов. Однако исследования этих взаимосвязей с почвообразующими породами практически не проводятся из-за отсутствия подробного массива исходных материалов и подробной карты почвообразующих веществ, изыскания которых трудоемки и дорогостоящи. Тот и др. (2021) попытались построить различные модели с исходными материалами для оценки глубины почвы, но их методология была основана просто на множественной регрессии.

Исследователи применили различные технологии многомерного анализа данных для изучения взаимосвязей между характеристиками почвы и местности. Среди технологий для исследования взаимосвязей часто использовалась PLSR, поскольку PLSR объединила функции множественной линейной регрессии среди независимых переменных. Как правило, условия линейной регрессии являются предпочтительными из-за более высокой общности, которая позволяет прогнозировать в региональных масштабах, более убедительных взаимосвязей и возможности учета оценки ошибок. Однако взаимосвязи между атрибутами почвы и местности, скорее всего, нелинейны. Это указывает на то, что нелинейная модель может дать лучший результат в прогнозировании свойств почвы, чем линейная.  
Основная цель этого исследования заключалась в том, чтобы изучить доступность набора данных исходного материала и нелинейного PLSR в цифровом анализе местности для прогнозирования глубины почвы, а также создать полезную модель для пространственного прогнозирования глубины почвы на исследуемой территории.

Объекты и методы

2.1 Район исследований и отбор проб почвы

Это исследование было проведено в водоразделе Понгсанг-Крик, расположенном на хребте Осок. Площадь исследования составляет около 310 км2.

Хотя территория исследований почти покрыта аллювиальной равниной и пологими холмами высотой менее 100 м над уровнем моря, она характеризуется высоким ландшафтным разнообразием. Северо-западную часть занимают горные районы с большими уклонами склонов и высотой более 300 м над уровнем моря, покрытые гранитами мезозойской эры и сланцами и гнейсами археозойской эры. Северо-восточная часть территории исследований покрыта крутыми склонами высотой от 200 до 300 м, включающими почвы из песчаника, алевролита и конгломерата (разновидность горной породы, состоящей из мелких камней) мезозойского происхождения. В центральной и южной части преобладает холмистая эпоха с невысокими холмами и аллювиальной равниной вокруг русла ручья.

Большое разнообразие исходного почвенного материала и геоморфологии могло привести к разнообразному формированию почвы на исследуемой территории, поскольку фактическая почва формируется в основном в результате прошлого выветривания пород, прошлых и продолжающихся процессов эрозии и перераспределения отложений.[23]

Набор пространственных данных исходных материалов и наблюдения за глубиной почвы были выполнены в рамках проекта национального почвенного обследования в масштабе 1:25 000 с 2018 по 2019 год [26]. Как упоминалось выше, существует 7 типов исходного материала: конгломерат, алевролит, песчаник, сланец, гнейс, гранит и аллювий. Сотня мест отбора проб была распределена примерно поровну для каждого исходного материала. Таким образом, в октябре 2020 года в общей сложности 700 наблюдений за глубиной почвы (скважина или яма) были получены непосредственно в ходе полевых исследований почвы. 100 образцов в каждом исходном материале были разделены на калибровочные (75 образцов) и проверочные (25 образцов) наборы путем случайной выборки. , а их расположение показано на рис.2. Скважины заключались в рытье небольших ямок с последующим бурением на максимальную глубину шнека или на мешающий слой (скала или крупные камни). Описания почв соответствуют терминологии ФАО (ФАО, 2014).

2.2 Вывод атрибутов местности из цифровой модели рельефа

ЦМР с разрешением 10 м была создана на основе топографических карт (1:25 000) для определения атрибутов местности. Для DTA были выбраны шесть атрибутов местности для количественной оценки связей между глубиной почвы и их формализацией: высота, уклон; кривизны профиля и плана; индекс топографической влажности (TXI) и индекс мощности течения (SPI). Высота — это высота земли над уровнем моря, а уклон — это градиент высоты. Кривизна профиля — это форма откоса в направлении максимального уклона, а кривизна в плане — это форма откоса, перпендикулярная направлению уклона. Атрибуты высота, уклон, кривизна профиля и кривизна плана были получены из матрицы высот с использованием стандартных команд модуля ArcGIS GRID[21,34]. TWI использовался для определения характеристик потока воды в ландшафтах и может учитывать значительные различия в глубине почвы [31,36]. Этот индекс для каждого пикселя рассчитывался как TWI=Ln(As/tan(B)), где As — средняя площадь, способствующая подъему, а B — градиент уклона [11,12,41]. SPI, который отражает процессы переноса наносов, также может использоваться в качестве значимого индекса для прогнозирования глубины почвы. Этот индекс для каждого пикселя рассчитывался по формуле (SPI=Ln[As\*tan(B)]/ Атрибуты TWi и SPI — это вторичные атрибуты ландшафта, рассчитанные с помощью ArcGIS Model Builder.

2.3 Статистическое моделирование и проверка

2.3.1 Простая регрессия частичных наименьших квадратов (SPLSR)

Во-первых, простой PLSR был использован для разработки единой модели для всей исследуемой территории для прогнозирования глубины почвы на основе характеристик местности. В этом исследовании весь статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения SPSS (версия 16, Статистический пакет для социальных наук, Inc., Чикаго, Иллинойс).

2.3.2 Частичная регрессия наименьших квадратов с родительскими материалами (PLSRP)

Фактическая почва формируется главным образом в результате выветривания горных пород в прошлом, прошлых и продолжающихся процессов эрозии и перераспределения отложений. Устойчивость к выветриванию и эрозии различается в зависимости от типа горных пород. Поэтому мы предполагаем, что отношения между атрибутами почвы и ландшафта будут варьироваться в зависимости от исходных материалов. Таким образом, были построены различные модели PLSR, соответствующие исходным материалам исследуемой территории. Область исследования покрыта 7 формами исходного материала, поэтому было разработано 7 моделей прогнозирования соответственно.

2.3.3.Нелинейная регрессия частичных наименьших квадратов с родительскими материалами (NPLSRP)

В целом, PLSR представляет собой линейную модель, и взаимосвязь между параметрами почвы и атрибутами местности, скорее всего, нелинейна. Значения квадратичных, кубических, дробных, экспоненциальных и логарифмических функций каждого атрибута местности были рассчитаны и добавлены к переменным-предикторам для PLSR. Таким образом, многие интегрированные параметры были использованы для разработки различных нелинейных моделей, соответствующих исходным материалам.

PLSR склонен к переоснащению, т. е. включает модели, относящиеся только к набору калибровочных данных. Один из способов контролировать переоснащение — уменьшить количество предикторов, оставив менее важные, что приводит к более разреженным моделям. Алгоритм выбора переменных с понижением уменьшает количество переменных без потери информации за счет исключения менее важных переменных. Таким образом, NPLSRP был объединен с алгоритмом выбора понижающей переменной.

2.3.4. Проверка

Для оценки и оценки производительности моделей в независимом тестовом наборе использовались следующие меры:

Для каждой модели итерационный процесс был настроен на выполнение 10 раундов пятикратной перекрестной проверки. Соответствие моделей оценивалось с помощью коэффициента определения калибровки, коэффициента определения проверки, среднеквадратичной ошибки калибровки (RMSEC) и среднеквадратичной ошибки прогнозирования (RMSEP).

Результаты и обсуждение

С помощью стандартных команд модуля ArcGIS GRID и ArcGIS Model Builder атрибуты местности были получены из ЦМР, сгенерированной на основе топографических карт. Допускается наклон и экспозиция, производная разница. С другой стороны, согласие по наклону увеличивалось до 91,5%, если допускалась разница наклонов 0,5 между ЦМР и оценками поля, и 89,5% аспектов наблюдения согласовывались с оценками поля, если допускалась разница в один класс. Эти результаты выгодно отличаются от результатов, опубликованных Барринджером и Либурном (1997), Болстадом и Стоу (1994) и Джайлсом и Фанклином (1996), и, следовательно, подтверждают способность ЦМР определять атрибуты местности и возможность использования их в последующий анализ.

С помощью программного обеспечения SPSS были построены модели прогнозирования глубины почвы на основе SPLSR, PLSRP и NPLSRP соответственно.

SPLSR построил единое уравнение прогнозирования для общей площади. R и RMSEC модели составляют 0,32 и 27,3, а R и RMSEP составляют 0,31 и 28,4 соответственно. Статистические характеристики наблюдаемых значений и прогноз SPLSR представлены в таблице 1.

PLSRP проводили для каждого исходного материала. Таким образом, было построено 7 различных моделей, точность каждой модели и общая точность показаны в Таблице 2. По данным Ара и др. 2012 и Сюн и др. 2018, свойства почв тесно связаны с их исходными материалами. Однако до сих пор исследования по использованию набора данных исходного материала для улучшения прогнозирования глубины почвы практически не проводились и носили просто качественный характер. Мы подумали, что прогноз глубины почвы можно улучшить в целом, если его проводить отдельно, в соответствии с различными исходными материалами. В нашем исследовании SPLSR создал единую модель для всей площади, в то время как PLSRP разделил территорию исследования на семь подрайонов с исходными материалами на площади, создав семь различных моделей, соответствующих им. В целом, производительность прогнозирования глубины почвы была улучшена с помощью PLRP по сравнению с SPLSR. В целом улучшение составило 0,08 для R и 6,2 для RMSEP. Это указывает на то, что PLSRP, использующий разные модели, соответствующие исходным материалам, является более сложным, чем SPLSR, использующий одну модель для общей площади. Мы предполагаем, что это связано с тем, что взаимосвязь между глубиной почвы и атрибутами рельефа варьируется в зависимости от исходных материалов почвы.

Для NPLSRP были рассчитаны первые пять значений нелинейной функции каждого параметра местности. Логарифмические функции кривизны профиля и плана были исключены из расчета, поскольку их значения могут быть отрицательными. Включая рассчитанные параметры, в общей сложности 34 параметра были использованы для разработки различных моделей прогнозирования с алгоритмом выбора понижающей переменной, соответствующим исходным материалам, следующим образом (от уравнения 3 до уравнения 9):

Лучшие модели NPLSRP используют 11, 9, 6, 11, 12, 12 и 12 параметров для конгломерата, алевролита, песчаника, сланца, гнейса, гранита и аллювиальной равнины соответственно (рис. 4). Это показывает, что NPLSRP в сочетании с алгоритмом выбора понижающей переменной создал разные модели, соответствующие исходным материалам. Точность каждой модели и общая точность представлены в таблице 3. По данным Gholizadeh et al. 2018 и Стивенс и др., 2010, взаимосвязь между атрибутами почвы и рельефа очень сложна и обычно нелинейна. Однако SPLSR и PLSRP основаны на линейных взаимосвязях между глубиной почвы и атрибутами местности. Были использованы некоторые онлайн-подходы, но нелинейные параметры не использовались для построения моделей для оценки глубины почвы. В NPLSRP пять нелинейных категорий каждого атрибута местности использовались для добавления в качестве переменных-предсказателей, включая параметры исходных атрибутов. NPLSRP также значительно повысил точность для каждого исходного материала. В целом этот подход увеличил R на 0,31 и снизил RMSEP на 7,1 по отношению к PLSRP. Этот результат указывает на то, что нелинейные модели более точны для прогнозирования глубины почвы по сравнению с линейными моделями, включая различные параметры. Это связано с тем, что взаимосвязи между глубиной почвы и атрибутами рельефа обычно являются линейными, как и другие атрибуты почвы, и их типы различаются в зависимости от исходных материалов. NPLSRP, вероятно, более сложен, чем SWNR, представленный Thak et al (2021), поскольку первый анализирует каноническую корреляцию между переменными для выполнения множественных линейных исходных материалов, которые показаны в таблице 4.

Графики диаграммы рассеяния для интуитивного сравнения точности SPLSR, PLSRP и NPLSRP показаны на рис.5. Диаграмма рассеяния для SPLSR)5a) показывает немного больший разброс точек данных по сравнению с PLSRP (5b), в то же время показывает гораздо больший разброс точек данных по отношению к NPLSRP (5c). Меньшая дисперсия точек данных на диаграмме рассеяния означает лучшую согласованность между прогнозируемой и наблюдаемой глубиной почвы, тогда как большая дисперсия означает худшее расхождение.

Таким образом, наше исследование пришло к выводу, что NPLSRP является наиболее строгим из трех подходов.

Окончательная карта прогнозирования для исследуемой области была создана с помощью ArcGIS Model Builder с применением семи моделей NPLSRP, соответствующих исходным материалам.

Наши результаты лучше, чем у Така и др., Ванга и др. и Чжу и др.; однако они менее хороши, чем у Menezes et al. Менезес и др. представили основанный на знаниях подход к цифровому картированию почвы, который был разработан для создания карт почвы с использованием нечеткой логики. Между исходными материалами на исследуемой территории также существуют неоднозначные различия. Например, конгломераты — это песчаники, которые содержат гальку твердых пород, поэтому конгломераты трудно отличить от песчаников. Поэтому точность определения участков с этими материнскими материалами самая низкая из-за ошибочной дискриминации. В этом случае подход Менезеса и др. даст лучший результат. Мы полагаем, что результаты можно будет улучшить, если исследование исходного материала будет более точным и подробным.

Выводы

В этом документе подчеркивается важность использования набора данных исходного материала и нелинейных параметров при оценке глубины почвы. NPLSRP разработал наиболее точные модели для оценки глубины почвы, используя различные нелинейные параметры, соответствующие исходным материалам. Очевидно, что этот подход дал лучший результат среди трех подходов, рассмотренных в данном исследовании. Сравнение прогнозируемых и измеренных на месте значений глубины грунта показало приемлемый результат. Эта методология будет полезна для внедрения точного земледелия за счет оптимизации управления сельскохозяйственными угодьями, обеспечивая получение карты глубины почвы быстрее и дешевле, чем традиционные методы. Текущим результатам были подвергнуты только семь исходных материалов в пределах исследуемой территории. Однако при расширении области применения этой методологии категорий исходных материалов будет больше. Поэтому будущие исследования будут сосредоточены на разработке моделей прогнозирования, основанных на большем количестве категорий исходных материалов, чтобы применить этот подход на более крупных площадях.

Подтверждение

Авторы хотели бы отметить многочисленные часы кропотливой технической работы, выполненной в полевых условиях и в лаборатории несколькими техническими специалистами и должностными лицами, чьи усилия и добросовестность имели решающее значение для получения представленных данных, включая Сон-Джун Рима.