

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ван Сюэянь, Сунь Цзюньцзяо, Ли Ян Пространственно-временная эволюция экосистемных услуг провинции Ляонин // Human Progress. 2026. Том 12, Вып. 6. URL: http://progress-human.com/images/2026/Tom12_6/Wang.pdf DOI 10.46320/2073-4506-2026-6a-11.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ ПРОВИНЦИИ ЛЯОНИН¹

Ван Сюэянь

доктор философии,
Институт энергетики и водного хозяйства,
Шэньянский технологический институт,
г. Шэньян, Китай

,

Сунь Цзюньцзяо

магистр,
Институт энергетики и водного хозяйства,
Шэньянский технологический институт,
г. Шэньян, Китай

Ли Ян

Аспирант,
Высшая школа психологии Педагогического института,
Тихоокеанский государственный университет,
г. Хабаровск, Российская Федерация

Аннотация. На основе данных о землепользовании за шесть периодов (2000-2023 гг.) с помощью модели InVEST оценены пространственно-временные изменения четырёх экосистемных услуг провинции Ляонин: водообеспеченности, запасов углерода, удержания почв и качества среды обитания. Результаты показывают, что водообеспеченность с перегибом в 2010 году сначала возрастала, а затем снижалась; основным движущим фактором выступают межгодовые колебания количества осадков. Запасы углерода увеличились с $28,66 \times 10^8$ т до $29,69 \times 10^8$ т (прирост 3,6%), причём более быстрый рост в 2000-2005 гг. хорошо согласуется с реализацией программы «Возвращение пахотных земель под леса». Удержание почв сначала повышалось, а после пика в 2010 году снижалось, при доминирующей роли восточных горных районов. Качество среды обитания характеризовалось незначительными

¹ Исследование выполнено при поддержке Совместной программы научно-технического плана провинции Ляонин (2023-MSLH-206, 2024JH2/102600212, 2024-MSLH-342), а также Фундаментального научно-исследовательского проекта Департамента образования провинции Ляонин (LJ212413201006, JYTQN2023282, LJ212413201010).

межгодовыми колебаниями, однако его пространственная дифференциация выражена отчётливо: высокие значения сосредоточены в восточных горах. Все четыре услуги имеют пространственный паттерн «высокий восток, низкий запад», что в основном обусловлено пространственной взаимосвязью рельефа, осадков и растительного покрова. На основе выявленных закономерностей рекомендуется в восточных горах консолидировать существующие экологические функции, на центральной равнине координировать сельскохозяйственное и городское развитие, а в западных холмах усилить меры по охране почв.

Ключевые слова: экосистемные услуги, модель InVEST, пространственно-временная динамика, провинция Ляонин.

Введение

Экосистемные услуги – это материальные и нематериальные блага, которые естественные экосистемы предоставляют человеку непосредственно или опосредованно через свои структуры, процессы и функции. К ним относятся обеспечивающие, регулирующие, поддерживающие и культурные услуги [1], [2]. Устойчивое предоставление экосистемных услуг, являющихся основой выживания человека и социально-экономического развития, имеет критически важное значение для поддержания региональной экологической безопасности и благосостояния населения [3]. Однако на фоне усиливающегося глобального изменения климата и роста антропогенной нагрузки более двух третей экосистемных услуг в мире находятся в состоянии деградации: всё острее проявляются такие проблемы, как утрата биоразнообразия, ослабление углерододепонирующей функции, дефицит водных ресурсов [4], [5]. В условиях продвижения в Китае концепции экологической цивилизации и достижения целей «двойного углерода» возникает настоятельная необходимость в системной оценке региональных экосистемных услуг для научного обоснования оптимизации территориального пространства и точного регулирования «красных линий» экологической защиты [6], [7].

Методы оценки экосистемных услуг эволюционировали от ранних стоимостных оценок к количественному анализу, основанному на моделировании экологических процессов. Среди них модель InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, интегрированная оценка экосистемных услуг и компромиссов) благодаря модульной архитектуре, пространственно-явным результатам, умеренным требованиям к исходным данным и возможности одновременной оценки множества услуг стала одним из наиболее широко применяемых инструментов [1]. В последние годы отечественные и зарубежные

исследователи провели большое количество работ с использованием этой модели в разных регионах. На бассейновом уровне исследования комбинировали модель InVEST с теорией цепей для построения экологических безопасных паттернов либо количественно анализировали пространственно-временную динамику водообеспеченности, запасов углерода, удержания почв и качества среды обитания, а также выявляли движущие факторы этих изменений [8-11]. На городском и архипелаговом уровнях оценивались пространственные паттерны различных экосистемных услуг; было установлено, что леса и водные объекты играют ключевую роль в предоставлении услуг, а растительный покров является основным фактором, определяющим пространственную дифференциацию большинства из них [12], [13]. Кроме того, ряд исследований обратился к механизмам взаимосвязи между изменениями землепользования и экосистемными услугами, выявив сложное влияние трансформации землепользования на экосистемные услуги [14], [15]. Указанные работы предоставили важную научную основу для регионального экологического управления, однако большинство из них сосредоточено на речных бассейнах, архипелагах или отдельных городах. Комплексная оценка с длительным временным рядом и охватом множества услуг для всего провинциального уровня на северо-востоке Китая, особенно для провинции Ляонин, остаётся недостаточно разработанной.

Провинция Ляонин расположена на юге северо-восточного региона Китая. Её восточные горы являются отрогами Чанбайшаня, крупным водосборным бассейном рек Ляохэ и Ялуцзян, а также ключевым районом сохранения биоразнообразия. Центральная равнина Ляохэ — это не только национальная основная зона производства зерна, но и ядерное пространство для городской агломерации Центрального и Южного Ляонина. Западные низкогорья и холмы характеризуются хрупкой функцией удержания почв и высокой эрозионной восприимчивостью. Длительное время доминирующая роль тяжёлой промышленности и быстрая урбанизация привели к интенсивным изменениям землепользования, таким как фрагментация лесов, деградация водно-болотных угодий и эрозия почв [16], [17]. Хотя некоторые исследования уже затрагивали запасы углерода или водоудерживающую способность в локальных районах провинции Ляонин, по-прежнему отсутствует комплексная оценка множества услуг на провинциальном уровне с длительным временным рядом, что затрудняет понимание пространственно-временной эволюции четырёх экосистемных услуг и не позволяет обеспечить надёжную поддержку зонированного экологического управления.

Исходя из вышеизложенного, данное исследование нацелено на провинцию Ляонин. На основе данных о землепользовании за шесть периодов (2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2023 гг.)

с помощью модели InVEST количественно оцениваются пространственно-временные изменения четырёх экосистемных услуг: водообеспеченности, запасов углерода, удержания почв и качества среды обитания. Цель работы – выявить пространственно-временные тенденции и закономерности дифференциации указанных экосистемных услуг в провинции Ляонин, предоставив научную основу для повышения экосистемных услуг, оптимизации территориального пространства и принятия решений в области экологического управления.

1. Характеристика района исследования

Провинция Ляонин расположена на юге Северо-Восточного Китая, её географические координаты — от 118°53' до 125°46' восточной долготы и от 38°43' до 43°26' северной широты. Общая площадь суши составляет около 148 тыс. км². В административном отношении провинция включает 14 городов окружного уровня. Рельеф в целом понижается с востока на запад: с востока на запад последовательно сменяются горы, равнины и холмы. Территория относится к умеренному континентальному муссонному климату с отчётливо выраженными четырьмя сезонами. Среднегодовая температура воздуха составляет 5-10°C, среднегодовое количество осадков варьируется от 400 до 1000 мм, уменьшаясь от юго-восточного побережья к северо-западным внутренним районам. Осадки выпадают в основном с июня по август, составляя более 60% годовой суммы. В провинции насчитывается много рек, крупнейшие из них — Ляохэ, Хуньхэ, Тайцзыхэ, Далинхэ и Ялуцзян. Река Ляохэ, протекая через большую часть территории провинции, впадает в Бохайский залив и является самой длинной рекой в регионе. Провинция Ляонин — это важная старая промышленная база и основной район производства зерна в Китае. В 2024 году численность постоянного населения провинции составила 40,778 млн человек, а валовой региональный продукт достиг 3 261,27 млрд юаней.

2. Методы исследования и источники данных

2.1 Методы исследования

2.1.1 Водообеспеченность

Услуга водообеспеченности оценивается на основе гипотезы тепло-водного баланса Будыко. Расчёт годовой водообеспеченности выполняется для каждого растрового элемента. Годовая водообеспеченность Y_x в растровом элементе x вычисляется по формуле (1):

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

Где Y_x — годовая водообеспеченность растрового элемента x (мм); P_x — среднегодовое количество осадков в растровом элементе x (мм); AET_x — фактическая годовая

эвапотранспирация в растровом элементе x (мм). Глубина корневой системы и коэффициенты культур для различных типов землепользования определены на основе ранее опубликованных исследований [18] с учётом местных условий провинции Ляонин (табл. 1).

Таблица 1

Биофизические параметры модуля водообеспеченности

Тип землепользования	Глубина корневой системы, мм	Коэффициент культур	Вегетационный индекс
Пашня	2000	0,75	1
Лес	5200	0,9	1
Луга	2400	0,8	1
Водные объекты	100	1	0
Застроенные земли	100	0,3	0
Прочие земли	100	0,3	0

2.1.2 Запасы углерода

Услуга по оценке запасов углерода основана на типах землепользования. Для каждого типа землепользования значение плотности углерода умножается на соответствующую площадь, после чего рассчитываются запасы углерода в четырёх пулах: надземная биомасса, подземная биомасса, почвенный органический углерод и мёртвое органическое вещество (подстилка). Затем вычисляется суммарный запас углерода путём сложения полученных значений по формуле (2):

$$C_{\text{общий}} = C_{\text{надземная}} + C_{\text{подземная}} + C_{\text{мёртвое}} + C_{\text{почва}} \quad (2)$$

Где $C_{\text{общий}}$ — общий запас углерода (т); $C_{\text{надземная}}$ — запас углерода в надземной биомассе; $C_{\text{подземная}}$ — запас углерода в подземной биомассе; $C_{\text{мёртвое}}$ — запас углерода в мёртвом органическом веществе; $C_{\text{почва}}$ — запас почвенного органического углерода.

Параметры плотности углерода были определены на основе ранее опубликованных исследований [19] и рекомендованных значений модели InVEST с последующей локальной корректировкой применительно к условиям провинции Ляонин (табл. 2).

Таблица 2

Параметры плотности углерода по типам землепользования, т/га

Тип землепользования	Надземная биомасса	Подземная биомасса	Почвенный органический углерод	Мёртвое органическое вещество
Пашня	10,61	50,368	105,247	9,534
Лес	26,463	72,338	154,18	13,7
Луга	22,032	53,988	96,994	7,068
Водные объекты	0,187	0	0	0

Застроенные земли	0,811	0	20,972	0
Прочие земли	7,939	21,701	154,18	13,7

2.1.3 Удержание почв

Оценка услуги удержания почв выполнялась с использованием модуля коэффициента доставки наносов модели InVEST. Принцип расчёта заключается в следующем: при отсутствии растительного покрова на поверхности потенциальная эрозия почвы оценивается путём комплексного учёта топографических и климатических факторов по формуле (3); при наличии растительного покрова фактическая потеря почвы количественно определяется с помощью универсального уравнения потерь почвы, как показано в формуле (4):

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (3)$$

$$ULSE = R \times K \times LS \times P \times C \quad (4)$$

где $RKLS$ — потенциальная эрозия почвы; R — фактор эрозионной способности дождя; K — фактор эродруемости почвы; LS — фактор длины и крутизны склона; P — фактор эффективности природоохранных мероприятий; C — фактор растительного покрова и управления; $USLE$ — фактическая эрозия почвы.

На основе результатов расчёта по формулам (3) и (4) удержание почв (SD) может быть получено по формуле (5):

$$SD = RKLS - USLE \quad (5)$$

Фактор R оценивался на основе ежегодных данных об осадках для расчёта регионального фактора эрозионной способности дождя. Фактор K рассчитывался с использованием модели EPIC на основе гранулометрического состава почвы и содержания органического углерода. Фактор LS извлекался из цифровой модели рельефа. Фактор C вычислялся на основе данных NDVI. Фактор P присваивался в зависимости от типа землепользования и крутизны склона (табл. 3).

Таблица 3

Значения факторов C и P для различных типов землепользования

Тип землепользования	Фактор растительного покрова C	Фактор природоохранных мероприятий P
Пашня	0,05	0,35
Лес	0,03	1
Луга	0,04	1
Водные объекты	0	0
Застроенные земли	0	0

Неиспользуемые земли	1	1
----------------------	---	---

2.1.4 Качество среды обитания

Модуль качества среды обитания учитывает пространственное распределение факторов угрозы, степень их воздействия на среду обитания, а также чувствительность типов местообитаний к этим угрозам. На основе этого выполняется расчёт индекса качества среды обитания для каждого растрового элемента. Качество среды обитания Q_{xj} в растровом элементе x для типа землепользования j вычисляется по формуле (6):

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (6)$$

где Q_{xj} — индекс качества среды обитания; H_j — пригодность местообитания для типа землепользования j ; D_{xj} — степень деградации местообитания; z — нормировочная константа; k — константа половинного насыщения. Степень деградации местообитания D_{xj} рассчитывается по формуле (7):

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_{yj} i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (7)$$

где R — количество факторов угрозы; Y_r — общее количество растровых элементов для фактора угрозы r ; W_r — вес фактора угрозы r ; r_{yj} — значение фактора угрозы r в растровом элементе y ; β_x — уровень доступности растрового элемента x ; S_{jr} — чувствительность типа землепользования j к фактору угрозы r . Величина i_{rxy} представляет собой воздействие фактора угрозы r из растрового элемента y на элемент x и вычисляется с использованием линейной (8) или экспоненциальной (9) функции затухания:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{линейное затухание}) \quad (8)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \quad (\text{экспоненциальное затухание}) \quad (9)$$

где d_{xy} — прямое расстояние между растровыми элементами x и y ; d_{rmax} — максимальное расстояние влияния фактора угрозы r .

Ссылаясь на ранее опубликованные исследования [18], в данной работе в качестве факторов угрозы выбраны пашни, застроенные земли и неиспользуемые земли. Чувствительность различных типов местообитаний к каждому фактору угрозы приведена в табл. 4.

Таблица 4

Пригодность местообитаний и чувствительность к факторам угрозы

Тип землепользования	Пригодность местообитания	Чувствительность к пашням	Чувствительность к застроенным землям	Чувствительность к неиспользуемым землям
Пашня	0,3	0,3	0,5	0,4
Лес	1,0	0,8	0,9	0,3
Луга	0,8	0,45	0,65	0,15
Водные объекты	0,9	0,65	0,85	0,28
Застроенные земли	0	0	0	0
Неиспользуемые земли	0,3	0,54	0,74	0

2.2 Источники данных

В данном исследовании использовались следующие основные данные: данные о землепользовании, цифровая модель рельефа, метеорологические данные, почвенные данные, данные о вегетационных индексах и др (NDVI). Конкретные источники приведены в табл. 5. Все данные были приведены к единой проекции и пересчитаны к пространственному разрешению 1 км × 1 км.

Данные о землепользовании охватывают шесть периодов (2000, 2005, 2010, 2015, 2020 и 2023 гг.) и классифицируются в соответствии с национальными стандартами на шесть типов: пашни, леса, луга, водные объекты, застроенные земли и неиспользуемые земли. В составе метеорологических данных количество осадков, температура и потенциальная эвапотранспирация представлены в виде ежегодных растровых данных. Почвенные данные извлечены из Всемирной базы почвенных данных и преобразованы в растровый формат.

Таблица 5

Основные источники данных

Наименование данных	Источник	Разрешение
Данные о землепользовании	Научно-сервисный центр по ресурсам и окружающей среде Китайской академии наук	30 м
Цифровая модель рельефа	Геопространственный облачный центр данных	30 м
Осадки	Национальный научный центр данных по системе Земля	1 км

Температура	Национальный научный центр данных по системе Земля	1 км
Потенциальная эвапотранспирация	Национальный научный центр данных по Тибетскому нагорью	1 км
Почвенные данные	Всемирная база почвенных данных (HWSD v1.2)	1 км
NDVI	MODIS (MOD13A3)	1 км

3. Результаты и анализ

В период 2000-2023 гг. водообеспеченность провинции Ляонин характеризовалась резкими колебаниями (рис. 1). С 2000 по 2010 год суммарный объём водообеспеченности увеличился с $65,36 \times 10^6 \text{ м}^3$ до $127,98 \times 10^6 \text{ м}^3$, среднегодовой темп роста составил около 7,0%. В последующий период наблюдалось сначала снижение, затем рост; в 2023 году показатель восстановился до $87,67 \times 10^6 \text{ м}^3$, что на 31,5% ниже пикового значения. Наиболее интенсивный рост (25,2%) пришёлся на 2005-2010 гг. Пространственно высокие значения водообеспеченности были сосредоточены в восточных горных районах. Город Даньдун занимал первое место во все рассматриваемые периоды: в 2023 году на его долю приходилось 15,3% от общего объёма по провинции. Восточные города (Фушунь, Телин, Бэньси) также сохраняли относительно высокие показатели на протяжении всего периода. В западных и прибрежных городах водообеспеченность была сравнительно низкой; город Паньцзинь неизменно демонстрировал самые низкие значения в провинции — в 2023 году всего $1,88 \times 10^6 \text{ м}^3$. Временная динамика водообеспеченности существенно различалась по городам. Восточные города (Даньдун, Телин, Бэньси) обнаруживали выраженную одновершинную динамику с пиком около 2010 года. Центральные города (Шэньян, Аньшань) характеризовались медленным ростом с последующим незначительным снижением. Прибрежные города (Паньцзинь, Инкоу) оставались на низком уровне без заметной тенденции к росту.

За период 2000-2023 гг. общий запас углерода в провинции Ляонин возрос с $2,866 \times 10^9$ т до $2,969 \times 10^9$ т, прирост составил 3,6% (рис. 2). Наиболее быстрый рост наблюдался в 2000-2005 гг.; в 2005 году запас достиг пика ($2,976 \times 10^9$ т). В последующее десятилетие он колебался в пределах $2,913\text{-}2,929 \times 10^9$ т, а после 2015 года начал медленно восстанавливаться, однако в 2023 году оставался ниже уровня 2005 года. Пространственное распределение запасов углерода характеризовалось паттерном «высокий восток, низкий запад». В 2023 году города Чаоян, Даньдун и Фушунь были лидерами: их суммарная доля составляла 34,2% от общепровинциального запаса. Города Паньцзинь, Ляоян и Инкоу замыкали список, их совокупная доля — всего 8,0%. Ареал высоких значений расширился: количество городов с запасом углерода более $2,5 \times 10^8$ т увеличилось с 3 в 2000 году до 5 в 2023 году. Траектории

изменений по городам различались: Чаоян, Хулудао, Фусинь и Дандун демонстрировали устойчивый рост, причём в Чаояне прирост был максимальным (13,6%). Бэньси, Фушунь и Телин относились к типу «сначала рост, затем стабилизация» — после 2005 года их показатели в основном стабилизировались. Далянь, Шэньян, Аньшань, Ляоян и Цзиньчжоу принадлежали к типу «колебательное восстановление»: после 2010 года их показатели постепенно восстанавливались. Паньцзинь был единственным городом с непрерывным снижением запасов углерода, величина снижения составила 17,2%.

В 2000-2023 гг. удержание почв в провинции Ляонин в целом следовало тренду «сначала рост, затем снижение» (рис. 3). Пик был достигнут в 2010 году ($49,03 \times 10^6$ т), после чего последовало колебательное снижение; в 2023 году показатель составил $27,80 \times 10^6$ т. По сравнению с 2000 годом конечное значение выросло почти в 5 раз, но всё же оставалось более чем на 40% ниже пикового. Пространственно способность удержания почв в восточных горных районах была намного выше, чем в других регионах. Города Дандун, Бэньси и Фушунь доминировали во все периоды; в 2023 году их суммарный вклад составил почти 60% от общепровинциального объёма. В западных и прибрежных городах показатели были низкими; несмотря на значительный рост в городе Чаоян, его абсолютное значение всё равно оставалось существенно ниже, чем в восточных горных районах. Траектории изменений удержания почв по городам заметно различались. Восточные горные города (Дандун, Бэньси, Фушунь) имели высокие суммарные значения и высокую волатильность, пики в основном приходились на 2010 год. Центральные равнинные города (Шэньян, Аньшань, Ляоян) оставались на низком уровне с относительно плавной динамикой. Паньцзинь неизменно был самым низким в провинции.

В отличие от резких колебаний водообеспеченности, запасов углерода и удержания почв, качество среды обитания в провинции Ляонин в целом было стабильным во времени и не обнаруживало значимого тренда к повышению или понижению (рис. 4). Среднее по провинции значение колебалось в пределах 0,58-0,66; относительный максимум пришёлся на 2010 год, а в 2023 году составило 0,59, что практически соответствует уровню 2000 года. Наиболее яркой особенностью качества среды обитания является его пространственная дифференциация. Город Бэньси стабильно занимал самый высокий уровень во все периоды; восточные горные города, такие как Дандун и Фушунь, постоянно превышали отметку 0,77. Паньцзинь неизменно находился в нижней точке, за ним следовал Шэньян. Разрыв между восточными горами и равнинно-прибрежной зоной (равнина Ляохэ – прибрежная полоса) на протяжении длительного времени превышал 0,5, и эта поляризованная структура почти не изменилась за весь период исследования, что свидетельствует о том, что качество среды

обитания контролируется в первую очередь природными фоновыми условиями, а не краткосрочными антропогенными воздействиями.

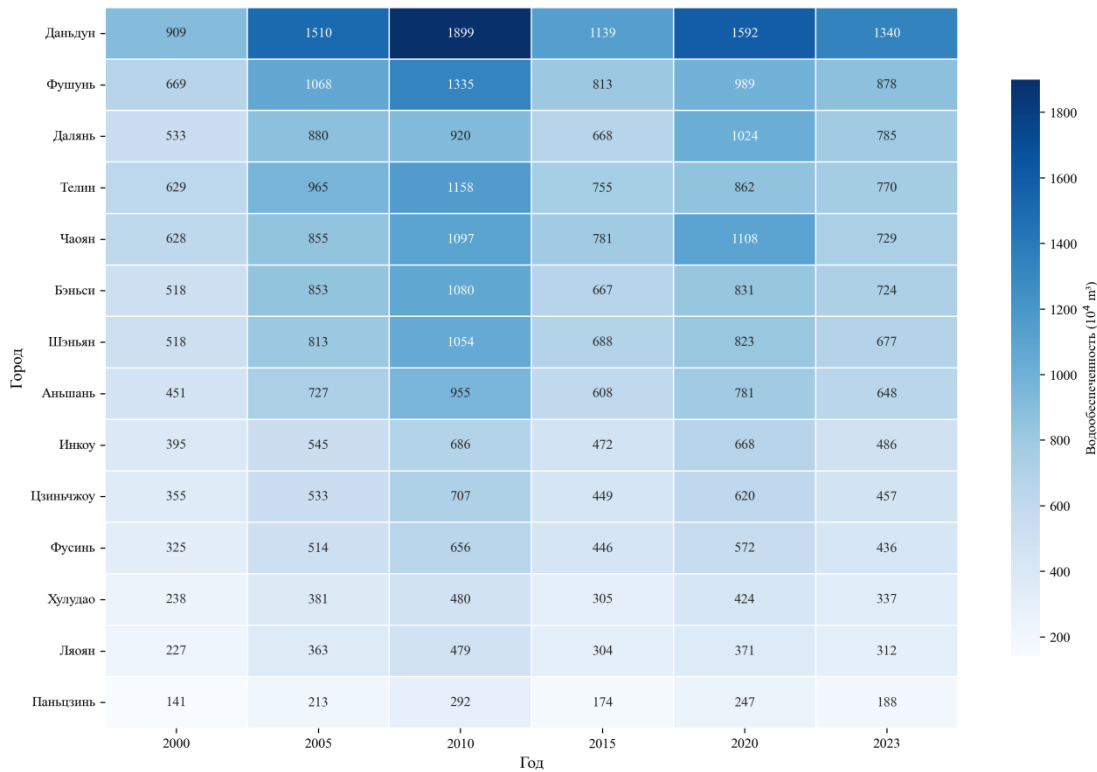


Рисунок 1. Тепловая карта изменений водообеспеченности по городам провинции Ляонин за 2000-2023 гг.

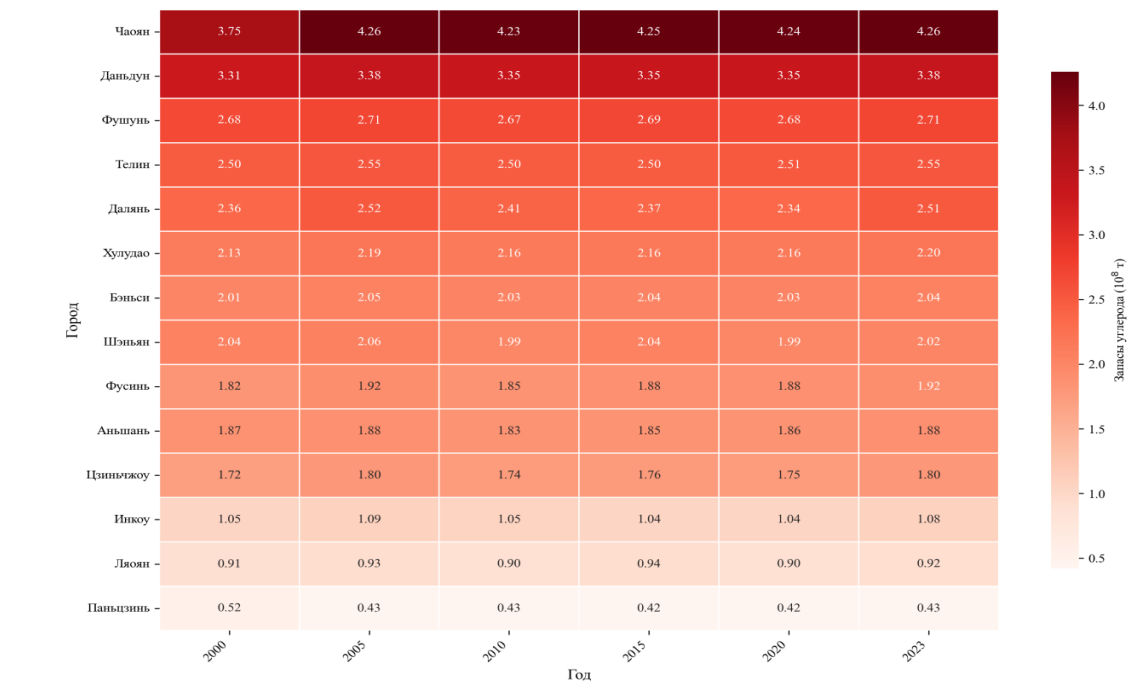
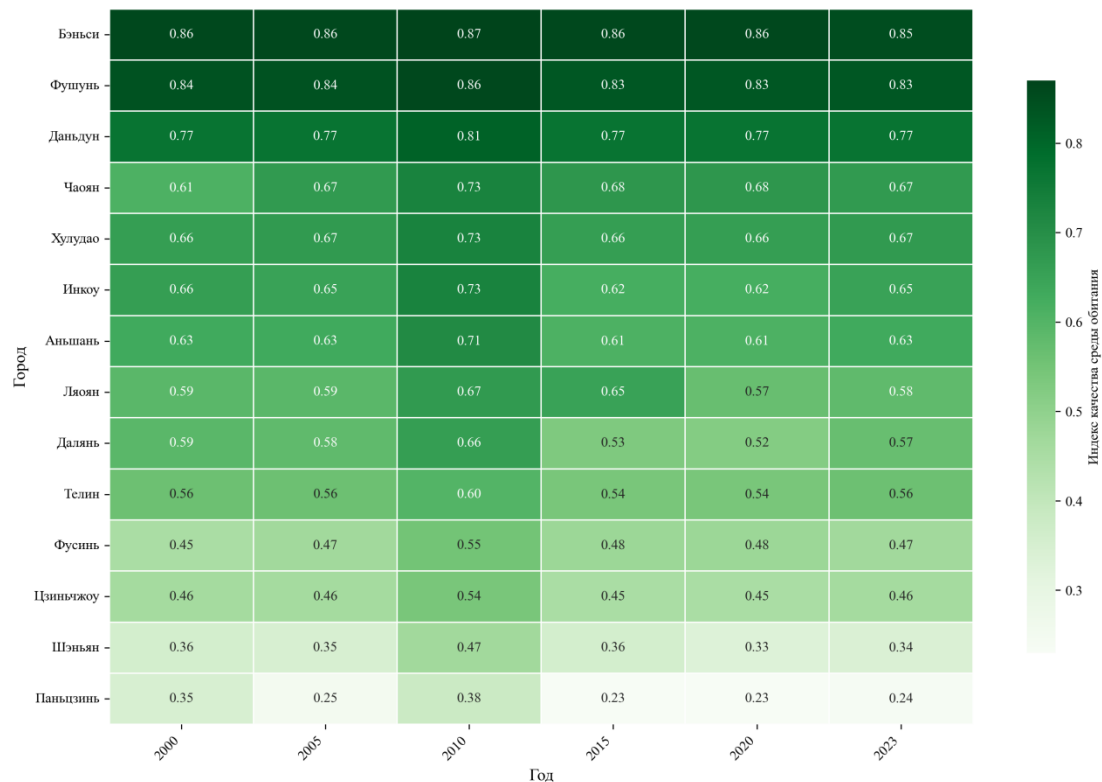


Рисунок 2. Тепловая карта изменений запасов углерода по городам провинции Ляонин за 2000-2023 гг.



**Рисунок 3. Тепловая карта изменений удержания почв по городам провинции
Ляонин за 2000-2023 гг.**



**Рисунок 4. Тепловая карта изменений индекса качества среды обитания по
городам провинции Ляонин за 2000-2023 гг**

4. Обсуждение и выводы

4.1 Обсуждение

4.1.1 Движущие факторы временной эволюции экосистемных услуг

В 2000-2023 гг. водообеспеченность провинции Ляонин характеризовалась чёткой динамикой: сначала рост, затем снижение, с достижением общепровинциального пика в 2010 году и последующим быстрым спадом. Основным фактором, определяющим межгодовые колебания водообеспеченности, являются изменения количества осадков. Анализ экстремальных осадков за исследуемый период показывает, что 2010 год был одним из годов с аномально высоким количеством осадков в провинции за последние 50 лет. В 2003-2010 гг. наблюдался значительный рост осадков, а после 2010 года – их снижение. Такая тенденция (сначала рост, затем снижение) хорошо согласуется с динамикой водообеспеченности, что подтверждает ведущую роль климатических факторов в межгодовой изменчивости этого показателя. Кроме того, за исследуемый период потенциальная эвапотранспирация в провинции Ляонин демонстрировала значительную тенденцию к снижению, пространственно убывая с запада на восток. Общее уменьшение эвапотранспирации в определённой степени

усилило рост стока, тем самым повысив положительное влияние колебаний осадков на водообеспеченность.

Запасы углерода в провинции Ляонин быстро росли в 2000-2005 гг., а после 2005 года вышли на плато. Этот временной рубеж хорошо согласуется с реализацией программы «Возвращение пахотных земель под леса». В 2001 году провинция Ляонин приступила к её осуществлению; после десяти лет масштабного лесоразведения лесистость провинции повысилась до 38,2%. Увеличение площадей лесопосадок напрямую способствовало росту способности к депонированию углерода. Мониторинг программы в городе Чаоян показал, что за 36 лет площадь озеленения пустующих гор достигла 2746 км², а площадь возврата пахотных земель под зелёные насаждения составила около 933 км², что свидетельствует о значительной эффективности программы [20]. После 2005 года запасы углерода в восточных горных районах стабилизировались, что указывает на достижение относительного равновесия лесных углеродных пулов и отражает долгосрочный кумулятивный эффект программы защиты естественных лесов Северо-Востока.

Удержание почв в провинции Ляонин резко возросло в 2005-2010 гг., а в последующий период снижалось с колебаниями. Данная динамика обусловлена этапностью восстановления растительности. На начальном этапе реализации программы «Возвращение пахотных земель под леса» после прекращения вспашки происходило быстрое увеличение растительного покрова, что способствовало эффективному перехвату дождевых осадков и замедлению поверхностного стока. На более позднем этапе почвы под пологом леса постепенно стабилизировались, эрозия естественным образом ослабла, и удержание почв перешло от роста к медленному снижению. В то же время способность экосистемных услуг в районах Суннэньской равнины и равнины Ляохэ несколько снизилась, что связано с интенсивной социально-экономической деятельностью. Интенсивность эрозии почв в западных низкогорных и холмистых районах Ляонина продолжала снижаться, что отражает эффективность таких мер, как возвращение пахотных земель под леса и борьба с эрозией на склоновых землях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что проекты экологической реставрации являются фундаментальным фактором улучшения удержания почв, а снижение показателя после 2005 года отражает закономерный переход процесса естественного восстановления от этапа быстрой реконструкции к этапу стабильного поддержания.

В отличие от первых трёх услуг, на которые существенное влияние оказывают антропогенная деятельность или колебания осадков, качество среды обитания в провинции Ляонин в целом оставалось стабильным во времени, не демонстрируя заметного роста или

снижения. При этом его пространственная дифференциация выражена чрезвычайно ярко. Данная особенность указывает на то, что качество среды обитания контролируется главным образом природными фоновыми условиями: рельефом, типом растительности, распределением водных объектов и т.д. В восточных горах, характеризующихся высокой лесистостью и низкой степенью хозяйственного освоения, на протяжении длительного времени поддерживается высокое качество среды обитания. Напротив, в прибрежных равнинных районах (например, в Паньцзине) из-за интенсивной застройки и сельскохозяйственной деятельности естественные местообитания сжимаются, вследствие чего качество среды обитания остаётся низким в течение длительного времени.

4.1.2 Причины пространственной дифференциации и региональные сравнения

Четыре экосистемные услуги в провинции Ляонин пространственно демонстрируют паттерн «высокий восток, низкий запад», что в основном обусловлено пространственной взаимосвязью рельефа, осадков и растительного покрова. Восточные горы, являясь отрогами Чанбайшаня, отличаются более высоким рельефом, где влажные воздушные массы с океана поднимаются, формируя обильные осадки; в сочетании с высокой лесистостью это обеспечивает высокие показатели водообеспеченности, запасов углерода, удержания почв и качества среды обитания на уровне провинции. Центральная равнина Ляохэ имеет плоский рельеф, здесь преобладают пашни и застроенные земли, растительный покров ограничен, поэтому все услуги находятся на среднем уровне. Западные низкогорья и холмы испытывают дефицит осадков, отличаются разреженной растительностью и исторически высокой эрозией почв, что делает их «низиной» для большинства услуг. Данная пространственная дифференциация хорошо согласуется с градиентом региональных водно-тепловых условий. Исследования показали, что потенциальная эвапотранспирация в провинции Ляонин убывает с запада на восток, а водные условия на востоке значительно лучше, чем в центре и на западе [21], что даёт климатическое объяснение западно-восточным различиям в экосистемных услугах.

По сравнению с другими провинциями северо-востока Китая прирост запасов углерода в провинции Ляонин (3,6%) является относительно скромным. Запасы углерода в лесной растительности трёх северо-восточных провинций составляют около 27,5% от общих запасов лесной растительности по всей стране, при этом провинция Хэйлунцзян занимает первое место по величине углеродного пула — во многом благодаря обширным девственным лесам Большого и Малого Хингана [22]. В провинции Ляонин леса сосредоточены в основном в восточных горах, тогда как центральные и западные равнины заняты пашнями и городскими

территориями. Прирост углеродного пула здесь обеспечивается главным образом за счёт вовлечения малопродуктивных земель и восстановления деградированных лесных угодий в рамках программы «Возвращение пахотных земель под леса», а не за счёт расширения естественных лесов. Таким образом, потенциал увеличения углеродного пула в провинции Ляонин относительно невелик.

4.1.3 Значение для экологического управления

Учитывая описанную выше пространственную дифференциацию и явные различия во временной динамике различных услуг, экологическое управление должно основываться на стратегии зонирования и применять меры, адаптированные к конкретным условиям, избегая унифицированных подходов к охране или развитию.

Восточные горы (Бэньси, Даньдун, Фушунь) представляют собой зону с высокими показателями экосистемных услуг в провинции: здесь высокая лесистость, водоудержание, запасы углерода, удержание почв и качество среды обитания находятся в относительно сбалансированном состоянии. В этом регионе экосистемные услуги в основном стабилизировались, поэтому акцент управления следует сместить с расширения на консолидацию существующего фонда. С одной стороны, необходимо строго охранять существующие лесные земли, ограничивать масштабную хозяйственную деятельность и предотвращать фрагментацию местообитаний. С другой стороны, рекомендуется оптимизировать структуру леса путём прореживания и посадки местных пород для повышения стабильности углеродного пула. Кроме того, следует контролировать объёмы новых лесопосадок, чтобы избежать снижения водообеспеченности из-за роста эвапотранспирации. Наконец, в этом регионе целесообразно установить «красные линии» экологической защиты и внедрить управление по принципу негативного перечня.

Центральная равнина (Шэньян, Аньшань, Ляоян) характеризуется преобладанием пашен и застроенных земель. Водообеспеченность, удержание почв и качество среды обитания здесь находятся на среднем или низком уровне, причём негативное влияние урбанизации проявляется достаточно отчётливо. Основное внимание следует уделять согласованию противоречий и усилению слабых звеньев. Создание полезащитных лесных полос на межах и вдоль канав способствует повышению удержания почв. Контроль неупорядоченного расширения городов, сохранение экологических коридоров и зелёных зон могут смягчить тенденцию к снижению качества среды обитания. Внедрение ресурсосберегающих методов обработки почвы (минимальной, нулевой) и возвращение соломы в поле уменьшают эрозию и увеличивают содержание органического углерода в

почве. В быстро урбанизирующихся районах следует строго соблюдать соотношение сине-зелёных пространств, не допуская дальнейшего вытеснения экологических земель.

Западные низкогорья и холмы (Чаоян, Фусинь) характеризуются дефицитом осадков, разреженным растительным покровом и слабой функцией удержания почв, что делает их экологически уязвимой зоной провинции. Несмотря на определённые успехи программы «Возвращение пахотных земель под леса», абсолютные значения удержания почв остаются низкими. Ключевое внимание в управлении следует сосредоточить на восстановлении и укреплении этих территорий. Необходимо продолжить перевод склоновых пашен и эрозионных оврагов под леса и луга, одновременно с комплексным обустройством малых водосборов создавая террасы, пруды-отстойники и другие противозерозионные сооружения. Также следует развивать засухоустойчивые кустарниковые и травянистые растения, формируя устойчивый растительный покров и постепенно повышая способность почв к удержанию. Предлагается объявить данный район ключевым на провинциальном уровне для борьбы с эрозией почв и увеличить его финансовую и техническую поддержку.

Выводы

(1) Пространственно-временные изменения четырёх экосистемных услуг в провинции Ляонин характеризуются значительной неоднородностью: водообеспеченность и удержание почв быстро и синхронно возрастали в 2005-2010 гг., а после 2010 года обе пошли на убыль, их тренды в целом совпадают; запасы углерода быстро росли в 2000-2005 гг., после чего вышли на плато; качество среды обитания оставалось стабильным на всём протяжении. Это указывает на то, что изменения различных экосистемных услуг не синхронны, и судить об общей динамике региональной экосистемы по какой-либо одной услуге невозможно.

(2) Несмотря на увеличение растительного покрова в провинции Ляонин, индекс качества среды обитания не продемонстрировал синхронного улучшения; разрыв между восточными горами и равнинами длительное время превышал 0,5, что свидетельствует о том, что рост растительного покрова происходил в основном в регионах с благоприятной экологической базой и не смог в достаточной мере смягчить деградацию местообитаний вокруг городов.

(3) Высокая степень пространственной согласованности (все услуги высоки на востоке и низки на западе) обусловлена стабильной пространственной взаимосвязью рельефа, осадков и растительного покрова, а не краткосрочными политическими или климатическими колебаниями. Поэтому стратегия зонированного управления должна опираться на природно-географические рамки, избегая унифицированных мер, оторванных от рельефа.

(4) В целях обеспечения региональной экологической безопасности предлагается: восточные горы – зона «красных линий» экологической защиты с негативным перечнем; центральная равнина – усиление полегающих лесов и контроль сине-зелёных пространств; западные холмы – выделить в качестве ключевого района провинциального значения для борьбы с эрозией почв.

Список литературы

1. Mukhopadhyay A., Hati J.P., Acharyya R., et al. Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2025, 25(2). P. 389-405.
2. Yu M., Xu G., Chen J., et al. Research progress and prospects for assessment models of terrestrial ecosystem services. *Chinese Journal of Ecology*, 2026, P. 1-17.
3. Fu. B., Zhang L. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(04). P. 441-446.
4. Yang B., Xue D., Miao P., et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of ecosystem supply and demand bundles: a case study in the Sichuan-Yunnan Ecological Buffer Area, China. *Sustainability*, 2024, 16(12). P. 4977.
5. Sun X., Geng Q., Wang Y., et al. Review of Research on Ecosystem Services Value Assessment and Accounting. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2025, (06). P. 8-13.
6. Guo Z., Liu Y., Zhang L., et al. Research progress and prospect of ecosystem services. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(03). P. 928-936.
7. Zhang B., Min Q., Jiao W., et al. Research progress and perspective on ecosystem services trade-offs. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14). P. 5517-5532.
8. Wu A., Shi M., Zhang Y., et al. Analysis of Ecosystem Services and Driving Factors in the Pearl River Basin Based on the PLUS-InVEST-GeoDetector Model. *Environmental Science*, 2026, P. 1-31.
9. Zhong X., Chen Y. Spatial and temporal evolution and simulation prediction of carbon storage in Ziyang City based on InVEST and CA-Markov models. *Journal of Neijiang Normal University*, 2026, P. 1-8.
10. Dang Z.H., Hu B.Q., Gao C.L., et al. Construction and optimization of the ecological security pattern of Pinglu Canal Economic Zone based on the InVEST-circuit theory model. *Land*, 2025, 14(5). P. 1103.
11. Li Z., Hu J.F., Hou S.L., et al. Quantifying ecosystem service trade-offs/synergies and their drivers in Dongting Lake region using the InVEST model. *Sustainability*, 2025, 17(12). P. 6072.
12. Liu M.M., Zhao S. Spatial assessment of ecosystem services in Zhoushan Archipelago based

on InVEST model. *Sustainability*, 2025, 17(9). P. 3913.

13. Zhang Y.Y., Zhang K.Q., Wei S.N., et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of ecosystem services based on InVEST-OPGD model: a case study in Kunming. *Environmental Research Communications*, 2025, 7(6). P. 065029.

14. Wan H., Wang F., Zhang W., et al. Assessment of ecosystem service functions in Cangzhou City based on multi-source data. *Progress in Geophysics*, 2025, 40(05). P. 1943-1953.

15. You G., Wang P., Cao J., et al. Analysis of spatial-temporal evolution and coupling effects of land use and ecosystem services in a resource-based city. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2025, 45(01). P. 117-127.

16. Zhao H., Liu G., Yang Z., et al. Ecosystem Services Assessment and Multi-Scenario Prediction in Liaoning Province from 2000 to 2020. *Environmental Science*, 2024, 45(07). P. 4137-4151.

17. Wu H. Regulation mechanism of ecological security pattern in Liaoning Province based on ecosystem services. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025.

18. Song J. Research on synergistic driving mechanism and regulation strategy of ecosystem service trade-off in Heilongjiang Province based on Bayesian network. Harbin: Northeast Agricultural University, 2025.

19. Cui J.H., Wei Z.Z., Li X.L., et al. An integrated land use–carbon modeling framework for net carbon emissions and spatial optimization in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 525. P. 146545.

20. Shuai Y., Huo Y., Qu G., et al. Dynamic monitoring of Grain for Green Program at Chaoyang City, Liaoning Province based on Landsat images during 1985-2020. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(03). P. 113-122.

21. Cao Y., Qi J., Wang F., et al. Evolution law and attribution analysis of potential evapotranspiration in Liaoning Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10). P. 3519-3525.

22. Tian H., Zhu J., He X., et al. Projected biomass carbon stock of arbor forest of three provinces in Northeastern China based on random forest model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(04). P. 40-50.

SPATIAL AND TEMPORAL EVOLUTION OF ECOSYSTEM SERVICES IN LIAONING PROVINCE

Wang Xueyan

PhD,

Institute of Energy and Water Conservancy,
Shenyang Institute of Technology,
Shenyang, China

Sun Junjiao

Master's degree,

Institute of Energy and Water Conservancy,
Shenyang Institute of Technology,
Shenyang, China

Li Yang

Postgraduate student,

Higher School of Psychology, Pedagogical Institute,
Pacific National University,
Khabarovsk, Russian Federation

Abstract. Based on land use data for six periods (2000-2023), the InVEST model is used to estimate spatiotemporal changes in four ecosystem services in Liaoning Province: water availability, carbon reserves, soil retention, and habitat quality. The results show that water availability with an inflection in 2010 first increased and then decreased; the main driving factor is the interannual fluctuations in precipitation. Carbon stocks increased from 28.66×10^8 tons to 29.69×10^8 tons (an increase of 3.6%), with faster growth in 2000-2005. It is well consistent with the implementation of the program «Return of arable land to forests». Soil retention initially increased, and after the peak in 2010 decreased, with the dominant role of the eastern mountainous regions. The quality of the habitat was characterized by insignificant interannual fluctuations, but its spatial differentiation was clearly expressed: high values are concentrated in the eastern mountains. All four services have a spatial pattern of «high east, low west», which is mainly due to the spatial relationship of relief, precipitation and vegetation cover. Based on the identified patterns, it is recommended to consolidate existing ecological functions in the eastern mountains, coordinate agricultural and urban development in the central plain, and strengthen soil protection measures in the western hills.

Key words: ecosystem services, InVEST model, spatial and temporal dynamics, Liaoning Province.